

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

ARTHUR YOSHIO SAITO

**ENSAIOS E ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE MATERIAIS POLIMÉRICOS VOLTADOS À
INDÚSTRIA DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2021

ARTHUR YOSHIO SAITO

**ENSAIOS E ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE MATERIAIS POLIMÉRICOS VOLTADOS À
INDÚSTRIA DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel do curso de
Engenharia Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, campus
Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Haroldo Lhou
Hasegawa

LONDRINA

2021

TERMO DE APROVAÇÃO

ENSAIO E ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS POLIMÉRICOS VOLTADOS À INDÚSTRIA DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS

por

Arthur Yoshio Saito

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado(a) em 26 de novembro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Haroldo Lhou Hasegawa
Prof.(a) Orientador(a)

Amadeu Lombardi Neto
Membro titular

Roger Nabeyama Michels
Membro titular

AGRADECIMENTOS

Seguramente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa etapa de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas que tenham a certeza de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço à Deus, que mostrou e me guiou por todo o caminho até agora.

Agradeço à minha família, por todo o suporte, paciência e amor que demonstraram durante toda a vida, sobretudo, nesse momento de transição.

Agradeço à UTFPR, professores e especialmente aos meus colegas de graduação, que foram extremamente importantes para o meu crescimento. Certamente não estaria escrevendo esse parágrafo sem eles. Aos meus amigos, Gabriel, William, Lucas, Nicolas, Giovanna e Vanessa, que foram essenciais em minha vida.

Agradeço ao meu orientador Haroldo Hasegawa, pela sabedoria e paciência com que me guiou.

Agradeço à empresa que possibilitou esse trabalho, local onde grande parte deste estudo foi realizado. Sobretudo, agradeço aos colegas e amigos que lá trabalham e foram de grande ajuda durante a realização desse trabalho. Agradecimentos especiais à minha líder Fernanda Pagani, aos pesquisadores Murilo Tambolim, Bruno Augusto e Cláudio Souza.

RESUMO

SAITO, Arthur Yoshio. **Ensaio e análise comparativa das propriedades mecânicas de materiais poliméricos voltados à indústria de embalagens flexíveis**. 2021. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Engenharia Mecânica- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Embalagens flexíveis multicamadas são usualmente laminadas com adesivo em estrutura que possui BOPET externo e filme soprado de polietileno como selante na superfície interna. Essa combinação é importante e bem consolidada devido à sua alta integridade, funcionalidade e hermeticidade dentro da aplicação. Questões contemporâneas envolvendo requisitos de sustentabilidade são fatores que colocam esse tipo de estrutura em xeque, visto que certas organizações ou fundações reguladoras e emissoras de certificações sustentáveis preparam estrutura monomaterial, em geral, sem a presença do BOPET na construção. Testes mecânicos foram conduzidos, realizando estudo comparativos entre o BOPET, três opções de BOPP e duas opções de PE-MDO. As propriedades aferidas nesse estudo foram seu módulo secante através de norma ASTM D882 e resistência térmica através de norma interna desenvolvida dentro de uma indústria de embalagens flexíveis. Constatou-se que os materiais possuem propriedades que podem vir a serem usuais em aplicações com requisitos mecânicos menos críticas, sendo antes necessário a realização de testes de maquinabilidade para cada um dos materiais de estudo.

Palavras-chave: BOPET. BOPP. MDO. Sustentabilidade. Polímero.

ABSTRACT

SAITO, Arthur Yoshio. **Testing and comparative analysis of the mechanical properties of polymeric materials for flexible packaging industry.** 2021. 68 p. TCC – Mechanical Engineering Bachelor – Federal University of Technology – Paraná (UTFPR). Londrina, 2021.

Multilayer flexible packages are usually adhesive laminates that contain BOPET external film and blown polyethylene film as a sealant over the inner surface. This combination is important and well consolidated due to its high integrity, functionality, and tightness within the application. Contemporary issues involving sustainability requirements are factors that question this type of structure, as certain organizations or regulatory foundations and sustainable certifiers prescribe a monomaterial structure, without BOPET in the product design. Mechanical tests were conducted, performing comparative studies between BOPET, three BOPP options and two PE-MDO options.. The properties measured in this study were its modulus secant through ASTM D882 and thermal resistance through an internal standard developed within a flexible packaging industry. Test results showed that the materials have properties that may come to be widespread in applications with less critical mechanical requirements. Machinability tests for each material are required.

Keywords: BOPET. BOPP. MDO. Sustainability. Polymer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de uma macromolécula de polímero	5
Figura 2 – Curva característica experimental de uma análise de calorimetria de varredura diferencial	9
Figura 3 – Influência da cristalinidade e peso molecular na rigidez de plásticos	10
Figura 4 – Representação da unidade repetitiva do polietileno	11
Figura 5 – Representação dos diferentes tipos de cadeia apresentados pelo polietileno	13
Figura 6 – Representação da unidade repetitiva do polipropileno e sua respectiva fórmula química.....	14
Figura 7 – Exemplo de produto com utilização de BOPP.....	16
Figura 8 – Fórmula química do PET.....	17
Figura 9 – Aumento de propriedades mecânicas observado no BOPP e BOPET.....	19
Figura 10 – Tecnologias de orientação direcional de filmes para embalagens	20
Figura 11 – Processo de orientação na direção de máquina	21
Figura 12 – Processo de Tenter Frame	22
Figura 13 – Máquina de ensaios universais – Modelo Instron 3360	26
Figura 14 – Equipamento para aferição de espessura – micrômetro <i>Absolute</i> – Mitotoyo	27
Figura 15 – Guilhotina para corte de corpo de prova com largura de 1 polegada	27
Figura 16 – Curva de tensão deformação para materiais sem região de deformação linear.....	28
Figura 17 – Curva de tensão deformação para amostra retirada dos corpos de ensaio..	29
Figura 18 – Curva de selagem típica de embalagens flexíveis.....	30
Figura 19 – Seladora Térmica Brugger HSG-CC Heat Sealing Machine	30
Figura 20 – Curva de ensaio secante 1% da estrutura PET de referência	33
Figura 21 – Curva de ensaio secante 2% da estrutura BOPP tipo A	35
Figura 22 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para BOPP de fornecedor B – Direção de máquina	37
Figura 23 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para BOPP de fornecedor B – Direção transversal	37
Figura 24 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para BOPP de fornecedor C – Direção de máquina	39
Figura 25 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para BOPP de fornecedor C – Direção transversal	40

Figura 26 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para MDO de fornecedor D – Direção de máquina	42
Figura 27 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para MDO de fornecedor D – Direção transversal.....	42
Figura 28 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para MDO de fornecedor E – Direção de máquina.....	44
Figura 29 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para MDO de fornecedor E – Direção de transversal.....	45
Figura 30 – Aspecto observado em casos de pequenas deformações.....	46
Figura 31 – Aspecto observado em casos de deformações expressivas na região de sela e em suas adjacências.....	47
Figura 32 – Aspecto observado em casos de deformações expressivas na região de sela e em suas adjacências.....	47
Figura 33 – Aspecto de deformação de BOPET	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades típicas aferidas em embalagens flexíveis	7
Tabela 2 – Densidade relativa entre as classificações de polietileno	12
Tabela 3 – Propriedades mecânicas típicas das resinas de polietileno.....	14
Tabela 4 – Propriedades típicas do polipropileno.....	16
Tabela 5 – Propriedades típicas de um filme PET.....	18
Tabela 6 – Propriedades típicas do polipropileno e do polipropileno biorientado.....	23
Tabela 7 – Materiais de estudo.....	25
Tabela 8 – Condições de ensaio de rigidez, conforme norma ASTM D882 – 12.....	26
Tabela 9 – Parâmetros de selagem e setup da máquina seladora	31
Tabela 10 – Dados de ensaio secante 1% para estrutura PET de referência.....	32
Tabela 11 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor A – Direção de máquina.....	33
Tabela 12 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor A – Direção transversal	34
Tabela 13 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor B – Direção de máquina.....	35
Tabela 14 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor B – Direção transversal	36
Tabela 15 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor C – Direção de máquina ..	38
Tabela 16 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor C – Direção transversal	39
Tabela 17 – Valores de módulo secante para MDO de fornecedor D – Direção de máquina	41
Tabela 18 – Valores de módulo secante para MDO de fornecedor D – Direção transversal	41
Tabela 19 – Valores de módulo secante para MDO de fornecedor E – Direção de máquina	43
Tabela 20 – Valores de módulo secante para MDO de fornecedor E – Direção transversal	44
Tabela 21 – Relação comportamento X temperatura para BOPET referência	49
Tabela 22 – Relação comportamento X temperatura para BOPP A	50
Tabela 23 – Relação comportamento X temperatura para BOPP do tipo B	51
Tabela 24 – Relação comportamento X temperatura para BOPP do tipo C	52
Tabela 25 – Relação comportamento X temperatura para MDO do tipo A	53
Tabela 26 – Relação comportamento X temperatura para MDO do tipo B	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 – Objetivos Gerais	3
1.1.2 – Objetivos específicos	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 POLÍMEROS	5
2.2 POLÍMEROS E SUAS PROPRIEDADES	6
2.3 POLIOLEFINAS	10
2.4 POLIETILENO TERAFTALATO	17
2.5 PROCESOS FÍSICOS DE TRANSFORMAÇÃO FÍSICO – ORIENTAÇÃO	19
2.6 RESISTÊNCIA TÉRMICA	24
3 METODOLOGIA	25
3.1 MATERIAIS	25
3.2 MÉTODOS	25
3.2.1 Rigidez	25
3.2.2 Resistência Térmica.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 TESTE DE RIGIDEZ	32
4.1.1 Pet Referência.....	32
4.1.2 BOPP A.....	33
4.1.3 BOPP B.....	35
4.1.4 BOPP C.....	38
4.1.5 MDO A.....	40
4.1.6 MDO B.....	43
4.2 RESISTÊNCIA TÉRMICA	46
4.2.1 Pet Referência.....	48
4.2.2 BOPP A.....	50
4.2.3 BOPP B.....	51

4.2.4 BOPP C.....	52
4.2.5 MDO A.....	53
4.2.6 MDO B.....	54
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Não é exagero afirmar que as embalagens foram e continuam sendo uma ferramenta importante para o desenvolvimento do ser humano. No início, as embalagens foram importantes para o auxílio no transporte de utensílios, ferramentas e alimentos em peregrinações promovidas pelo sistema de vida nômade que levavam. Com o surgimento da agricultura as embalagens tiveram uma importância ainda maior, pois além de auxiliar no transporte de produtos, também eram utilizados para estocar e guardar insumos e alimentos, ou seja, com o desenvolvimento das sociedades e de novas necessidades, o uso das embalagens tornou-se cada vez mais importante tanto que atualmente, o modo de vida moderno fez com que as demandas da sociedade com as embalagens, transformaram estas em ferramentas que necessitam agregar outras funcionalidades além da proteção e transporte, sendo que as embalagens atualmente são meios para conservação de produtos, marketing e a agregação de valor não somente ao produto mas também ao consumidor pois muitas das embalagens, atualmente são desenhadas para posterior reuso como recipientes, como por exemplo potes de sorvetes entre outros.

Atualmente o material polimérico ou os plásticos são os materiais mais empregados no mercado de embalagens, sendo os mais utilizados o polietileno (PE), Polipropileno biorientado (BOPP) e o Politereftalato de etileno (PET).

Dentre as diversas necessidades contemporâneas intrínsecas ao mercado de embalagens, destaca-se a sustentabilidade, ou seja, desenvolver produtos visando a prevenção e/ou minimização dos impactos ambientais, somado a este fato atualmente deve-se também levar em consideração o conceito de economia circular.

Devido às demandas de propriedades e de funcionalidades exigidas pelos produtos, as embalagens muitas vezes necessitam ser constituídas de diversos componentes poliméricos e resinas com incompatibilidade química entre si, o que dificulta ou até mesmo inviabiliza uma abordagem sustentável, além deste ponto, também dificulta a reciclabilidade a existência de produtos fabricados com a combinação de PE, BOPP, PET, papel cartonado e folhas de alumínio por exemplo, a fim de atender demandas específicas de determinados produtos.

Além disso, a reciclabilidade de embalagens plásticas relaciona-se também à viabilidade de implementação de determinadas rotas de reciclagem, de modo que se

opta por seguir uma ou outra opção de plástico a ser reciclado, sendo os mais comuns as rotas de poliolefinas e/ou PET. As rotas de reciclagem de tais materiais, dentro do contexto de embalagens flexíveis, referem-se primariamente à reciclagem mecânica, onde o plástico passa pelas etapas de moagem, lavagem, secagem, aglutinação e reprocessamento, originando novamente o grânulo de polímero. A reciclagem conjunta de diferentes polímeros gera produtos com propriedades finais pobres, devido à incompatibilidade química e física entre eles. As poliolefinas, como PE e PP possuem certa compatibilidade, de maneira que as propriedades mecânicas finais são razoáveis e podem ser utilizadas dependendo da severidade da aplicação.

Segundo as diretrizes do projeto de desenvolvimento reciclável de embalagens plásticas flexíveis, concebido pela fundação Ellen MacArthur, uma embalagem deve conter, ao menos, 80% de sua estrutura composta de polietileno ou polipropileno, a fim de valorizar a cadeia de reciclagem de poliolefinas. Ainda, a presença de folhas de alumínio, politereftalato de etileno (PET) ou cloreto de polividileno (PVDC) na estrutura inviabilizam o processo de reciclagem dentro da cadeia de poliolefinas, de forma que fica vetada a utilização de qualquer percentual desses materiais no desenho de uma embalagem sob um olhar sustentável. Essas diretrizes independem das diferentes tecnologias de classificação de reciclagem, de forma a atenderem requisitos de reciclagem química ou mecânica. (FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR, 2020).

Nessa visão, filmes que se utilizam de polipropileno biorientado (BOPP) como alternativa ao Politereftalato de etileno (PET) vêm com a proposta de sustentabilidade e reciclagem através da promoção do processo de reciclagem, integração ao reaproveitamento de poliolefinas e da redução da geração de resíduos através da substituição de materiais mais espessos à um filme de menor espessura de BOPP.

Dessa forma, o presente trabalho de conclusão de curso, teve como objetivo realizar estudos comparativos das propriedades mecânicas em filmes de polipropileno biorientado (BOPP), utilizado em diversos segmentos do mercado de embalagens, em uma empresa produtora de embalagens flexíveis localizada no norte do Paraná. Esse estudo foi conduzido contemplando três tipos de filmes de BOPP consolidados comercialmente e os testes mecânicos foram conduzidos segundo norma ASTM D882 – 12 – *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting* para avaliação de rigidez de filme e, paralelamente avaliou-se a resistência térmica dos

mesmos filmes através de procedimento desenvolvido internamente pela empresa. Alternativamente, avaliou-se filmes de polietileno de alta densidade submetidos ao processo de orientação em direção de máquina (*Machine Direction Orientation – MDO*) seguindo a mesma justificativa e métodos apresentados acima.

1.1 – OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

O trabalho teve como objetivo realizar análises laboratoriais comparativas entre três tipos de filmes de polipropileno biorientado (BOPP) e dois filmes de polietileno de alta densidade, submetidos ao processo de orientação em direção de máquina (MDO), a fim de se verificar a viabilidade e impacto de sua utilização como alternativa ao PET dentro do mercado de embalagens flexíveis no Brasil. Dessa forma, propõe-se a realização dos testes de resistência térmica e rigidez de todos os materiais supracitados acima, individualmente. Além disso, para verificar a funcionalidade térmica das cinco películas acima, propõe-se um ensaio de selagem fazendo o uso das películas em configuração de laminação junto a um substrato de polietileno.

Os ensaios mecânicos laboratoriais foram realizados sob a justificativa de atender as demandas industriais pautadas em sustentabilidade e princípios de economia circular, onde torna-se mais vantajoso reutilizar e reciclar recursos o máximo quanto for possível, reinserindo-os no início da cadeia produtiva, ao invés de extrair matéria prima virgem.

1.1.2 Objetivos específicos

O presente trabalho objetivou a aferição das propriedades mecânicas de três alternativas de BOPP e dois filmes MDO. As propriedades mecânicas aferidas são:

- Resistência térmica seguindo norma interna;
- Rigidez, segundo norma

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido à natureza de produção e processamento de embalagens e filmes, visando atingir as características físico-químicas requisitadas pelo mercado, é necessária uma complexa composição de materiais e resinas de natureza incompatível entre si, de forma que o valor de reciclabilidade desse tipo de bem tende a ser pequeno e conseqüentemente, o processo de reciclagem se torna difícil, sendo necessárias diversas etapas e recursos tecnológicos para a limpeza e separação dos materiais que compõem uma embalagem. Nesse contexto, a utilização de polímeros biodegradáveis como o PET em estruturas convencionais de embalagens flexíveis, mesmo quando presentes em baixas quantidades, levam à contaminação das rotas de reciclagem de poliolefinas, de forma a reduzir o inviabilizar o processo de reciclagem e reaproveitamento dessa classe de polímeros.

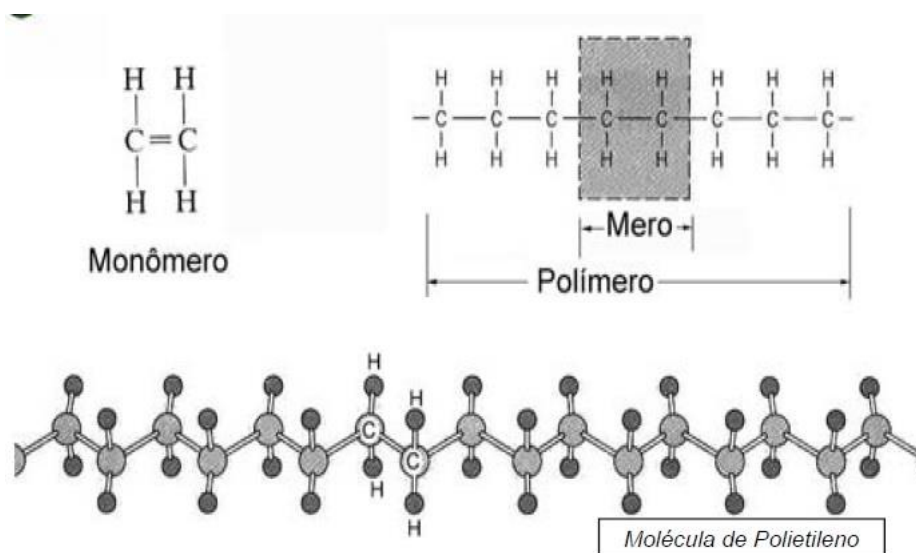
Dessa forma, a importância desse trabalho reside na proposta de substituição do PET por alternativas com melhores traços de sustentabilidade, tendo por alvo a rota de reciclagem de poliolefinas, trazendo valor para o mercado de plástico dentro de um contexto de economia circular ou integração da cadeia produção-utilização-consumo.

2 REFERENCIAL TEORICO

2.1 POLÍMEROS

Polímero refere-se a macromoléculas compostas por unidades de repetição denominadas meros, que se ligam entre si através de ligações covalentes, formando assim, a cadeia polimérica. Para a síntese de um polímero, é imprescindível que um monômero se combine com, ao menos, outros dois monômeros a fim de que a polimerização ocorra. (CANEVAROLO, 2002).

Figura 1 – Representação de uma macromolécula de polímero



Fonte: adaptado de “Generalidades e estrutura de polímeros – USP”

Existem diversas formas de classificação de polímeros em estado sólido, sendo as mais interessantes a classificação quanto ao grau de cristalinidade e quanto a estrutura química. Em relação ao grau de cristalinidade, as moléculas dos polímeros são classificadas em semicristalinas ou amorfas, sendo que qualquer desordem ou falta de alinhamento como torções, dobras e enrolamentos na cadeia resultam em regiões amorfas. O grau de cristalinidade pode variar desde completamente amorfo até quase totalmente (aproximadamente 95%) cristalino. Em termos de estrutura química, os polímeros podem possuir cadeia estritamente carbônica, apresentado apenas carbono em seu mero ou estrutura principal, ou cadeia heterogênea, onde há

a presença de um heteroátomo como oxigênio, nitrogênio, silício etc. (CANEVAROLO, 2002 e CALLISTER, 2016).

Em termos de propriedades físicas, polímeros são altamente dependentes do comprimento das moléculas ou, em outras palavras, de sua massa molar. Dada a grande variação de valores de massa molar apresentada pelos materiais poliméricos, é possível a produção de diversos tipos de polímeros, para atender demandas específicas do mercado. Além disso, as características físicas do polímero dependem também das diferenças nas estruturas das cadeias moleculares, como o grau de ramificação, linearidade, ligações cruzadas e em rede, além das configurações isométricas (CANEVAROLO, 2002 e CALLISTER, 2016).

2.2 POLÍMEROS E SUAS PROPRIEDADES

No contexto de embalagens flexíveis, sua integridade estrutural é um aspecto crítico para a proteção do produto em seu interior. Dessa forma, o entendimento do comportamento físico-químico dos materiais poliméricos empregados nesse tipo de aplicação é fundamental para a seleção do tipo de resina ou material a ser empregado em necessidades específicas de produto. A tabela 1 ilustra as principais propriedades mecânicas avaliadas durante o desenvolvimento de um filme ou embalagem, bem como sua importância específica.

Tabela 1 – Propriedades típicas aferidas em embalagens flexíveis

Propriedade	Método ASTM	Importância
Densidade	D792	Custo e controle de camadas do coextrusado
Índice de fluidez	D1238	Fluidez do polímero em processo de coextrusão
Viscosidade	-	processabilidade
Módulo Secante	D882	Determinação de rigidez do filme polimérico
Resistência à tração	D882	Aferição de tensionamento da embalagem ou filme.
Alongamento na ruptura	D882	Aferição de resistência e alongamento da embalagem ou filme.
Resistência ao rasgo	D1922 (ELmendorf) D1004 (Graves)	Aferição de propagação de fratura da embalagem ou filme.
Temperatura de derretimento	D3418	Relaciona-se à temperatura de início de sela e temperatura de extrusão
Temperatura de transição vítrea	E1356 (DSC) E1640 (DMA)	Necessário para determinar temperatura de processamento; material se torna quebradiço abaixo da Tg
Temperatura de resfriamento	D3418	Relacionado a rapidez de resfriamento durante processo de conversão de filme.
Resistência ao impacto	D3420 (Spencer) D1709 (Dart Drop)	Aferição de resistência ao impacto
Resistência à perfuração	F1306, D2582	Resistencia à perfuração lenta
Clareza, opacidade e brilho	D1746 (Clarity); D1003 (Haze); D2547 (gloss)	Relacionado a propriedades e necessidades óticas
Taxa de permeabilidade de oxigênio (OTR)	F1927, D3985, F2622	Barreira de oxigênio
Taxa de permeabilidade de vapor de água (WVTR)	F1249, E96	Barreira à umidade

Fonte: Adaptado de MORRIS (2016).

As características físicas de um produto polimérico, em qualquer de seja o estado, é essencialmente determinada pelo nível de mobilidade das cadeias poliméricas, sendo essa função do nível de agitação dos átomos nas moléculas e, portanto, diretamente proporcional à temperatura. Assim, compreender as

características físico-químicas inerentes à um polímero é essencial para o entendimento de seu comportamento termomecânico, sendo que em aplicações de engenharia, existem três temperaturas de transição que devem ser conhecidas: Temperatura de transição vítrea (T_g), Temperatura de fusão cristalina (T_m) e Temperatura de cristalização (T_c). (CANEVALORO,2002).

A temperatura de transição vítrea trata-se do valor médio da faixa de temperatura de aquecimento de um polímero que permite mobilidade de fase amorfa, ou seja, modifique a região amorfa da cadeia polimérica por conformação. Essa temperatura diz respeito estritamente às regiões amorfas do polímero, ou em outras palavras, não modifica características da rede cristalina em caso de polímeros semicristalinos. Abaixo da T_g , a energia interna do polímero é insuficiente para permitir deslocamentos de cadeias e acima da T_g , as cadeias adquirem mobilidade, tornando o material mais maleável (CANEVAROLO,2002 e MANO, 1991).

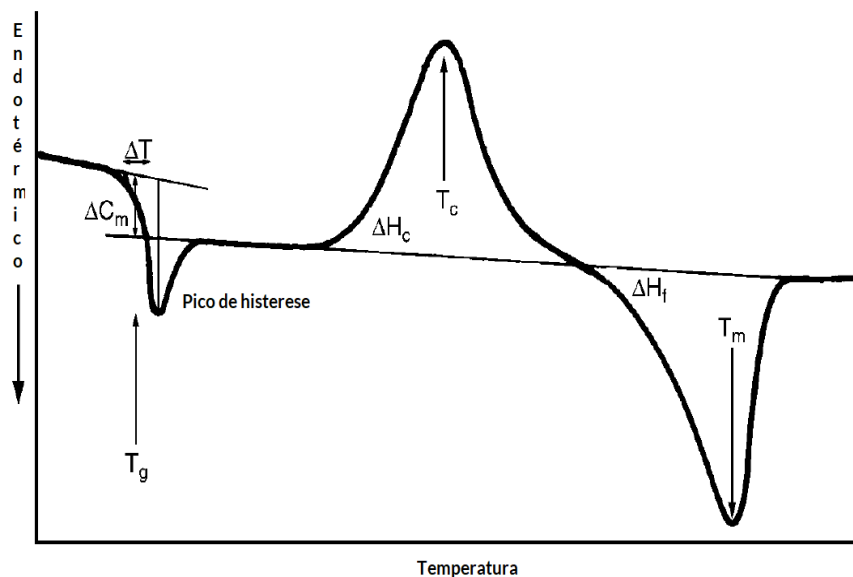
A temperatura de fusão cristalina (T_m) o valor médio da faixa de temperatura na qual as regiões ordenadas dos polímeros se desagregam e fundem e, portanto, não havendo mais organização das cadeias em rede, caracterizando estado viscoso. A T_m ocorre acima da T_g e é exclusiva de polímeros semicristalinos. De forma geral, a temperatura de fusão é mais elevada quanto maior o grau de cristalização. A temperatura de cristalização define-se em situação de resfriamento de um polímero semicristalino a partir de seu estado fundido, onde um número grande suficiente de cadeias poliméricas se reorganiza de maneira regular dentro da massa polimérica fundida, de modo que se têm a formação de uma estrutura cristalina em determinados pontos do fundido. A temperatura média da faixa onde essa recristalização ocorre é denominada de Temperatura de cristalização (CANEVAROLO,2002 e MANO, 1991).

Essas três temperaturas, em termos de engenharia, determinam a faixa térmica de utilização do material polimérico e seu conseqüente nível de rigidez. Por exemplo, polímeros com alta cristalinidade e/ou orientados, como o PET, podem ser utilizados a temperaturas de no máximo 100°C abaixo da T_m , sendo que temperaturas superiores já iniciam fusão de pequenos cristais, instabilizando dimensionalmente a peça e/ou produto. A temperatura de transição vítrea é indiferente para o caso, tendo em vista a característica pouco amorfa desse tipo de polímero. Paralelamente, polímeros com cristalinidade média como o polietileno (PE), devem ser utilizados em

faixa entre a T_g e a T_m , evitando assim que sejam quebradiços ou maleáveis em excesso. (CANEVAROLO,2002).

As três temperaturas citadas podem ser determinadas experimentalmente através de um *Differential scanning calorimeter* (DSC) ou calorimetria de varredura diferencial, que fornecem as mudanças na capacidade de calor, fornecendo as transições exotérmicas e endotérmicas através do fornecimento de calor quantitativo para a amostra de teste e referência, de modo que ambas as temperaturas permaneçam iguais. A absorção de calor da amostra polimérica gera um gradiente de temperatura entre as células, que é convertida em voltagem e potência, de maneira que o resultado é uma curva onde podem ser observados os picos endo e exotérmicos, além do pico de histerese, responsável pela caracterização de cada material, como exemplificado na figura 2. (SPERLING, 2006 e AFFINKO, 2018)

Figura 2 – Curva característica experimental de uma análise de calorimetria de varredura diferencial

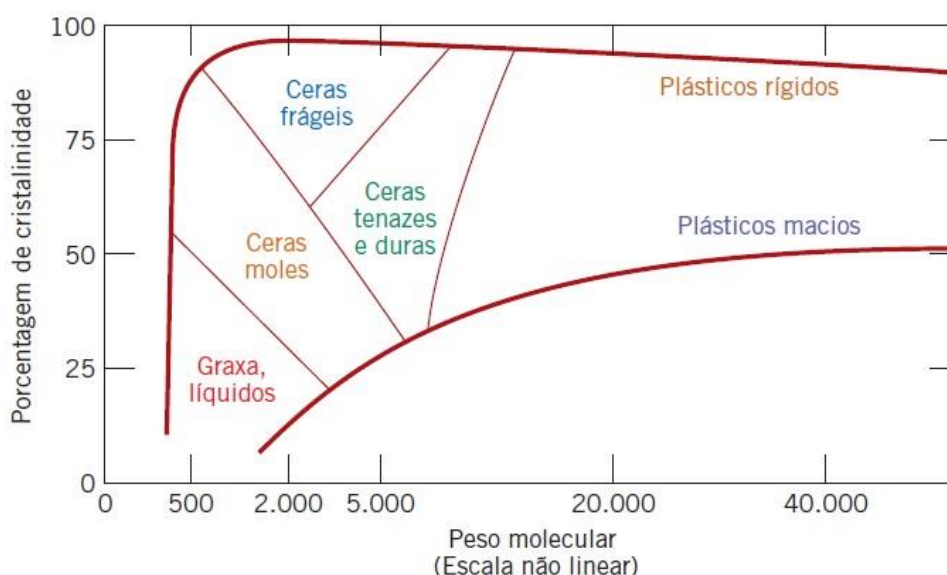


Fonte: Adaptado de Sperling (2006)

Uma importante característica mecânica dos polímeros é a sua rigidez, diretamente relacionada a seu módulo de Young, de modo que, quanto maior o valor do módulo, maior será a rigidez do polímero. É medido através da razão entre tensão e deformação, dentro do limite elástico, onde a deformação é completamente

reversível e proporcional à tensão. Essa propriedade, em materiais poliméricos, é obtida através da inclinação da curva em baixas deformações, em geral, até 1% ou 2% de deformação. Essa propriedade se relaciona intrinsecamente com a cristalinidade, onde observa-se que polímeros de alta cristalinidade possuem maior rigidez. Isso se deve pois, nas regiões cristalinas, onde as cadeias se compactam densamente em segmentos ordenados, há grande quantidade de ligações secundárias entre os segmentos de cadeias adjacentes e, nas regiões amorfas, em virtude da falta de alinhamento de cadeias, essa ligação secundária é menos influente. (CANEVAROLO, 2002; CALLISTER, 2016 e MANO, 1991).

Figura 3 – Influência da cristalinidade e peso molecular na rigidez de plásticos



Fonte: Callister (2016).

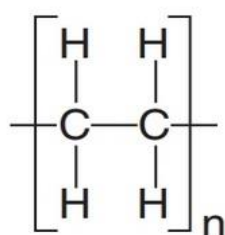
2.3 POLIOLEFINAS

A classe das poliolefinas são polímeros originários de monômeros de hidrocarboneto alifático insaturado, contendo uma dupla ligação carbono-carbono reativa. Cada poliolefina caracteriza-se por um mero sucessivo na série, contendo um grupo CH_2 a mais, tendo como exemplos o etileno (C_2H_4), propileno (C_3H_6) e o butileno (C_4H_8). (CANEVAROLO, 2002 e GODDART et AL, 2009).

Dentro da classe das poliolefinas, existem dois polímeros que são extensamente utilizados dentro da indústria de embalagens devido à suas propriedades para a aplicação, sendo eles o polietileno (PE) e o polipropileno (PP).

Os homopolímeros de polietileno são uma das estruturas químicas mais simples dentre os polímeros, consistindo em átomos de hidrogênio e carbono, com fórmula química $(C_2H_4)_N$ conforme ilustrado na figura 4. (MORRIS, 2016).

Figura 4 – Representação da unidade repetitiva do polietileno



Fonte: Goddart et al (2019)

Em termos práticos, o polietileno é valorizado devido à três propriedades principais, sendo elas a resistência mecânica, capacidade de selagem e barreira à vapor de água. Entretanto, esse material possui variedade de tipos, caracterizado por diferenças em sua ramificação dentro da cadeia principal, peso molecular, tipo de comonômero e sua distribuição, e principalmente pela sua cristalinidade, que por sua vez é dependente de sua densidade. Dessa forma, pode-se classificar o polietileno em grupos de acordo com sua densidade, cada qual com diferentes características de desempenho, propriedades térmicas, físicas e reológicas. (MORRIS, 2016; INSTITUTO DE EMBALAGENS, 2016).

A densidade e conseqüente cristalinidade do polietileno pode variar de 0,970g/cm³ até cerca de 0,88 g/cm³, sendo que o aumento de densidade favorece o aumento de propriedades mecânicas como resistência a tração, rigidez, estabilidade térmica e barreira à vapor de água. A transparência, alongamento, capacidade de selagem e resistência ao impacto são propriedades que se reduzem com o aumento da densidade. Desse modo, é comum classificar o PE em termos de densidade, onde historicamente tem-se disponível o polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno linear de baixa densidade (PELBD) e o

polietileno de ultrabaixa densidade, como mostrado na tabela 2. (Goddart, 2019 e MORRIS, 2016).

Tabela 2 – Densidade relativa entre as classificações de polietileno

Classe de Polietileno	Densidades (g/cm³)
PEAD	0,940 – 0,970
PEBD	0,915 – 0,939
PELBD	0,916 – 0,940
PEUBD	0,880 – 0,915

Fonte: Modern Plastics Handbook. McGraw-Hill (1984). Adaptado de Morris, 2016.

Polímeros com altos níveis de cristalinidade, possuem menos volume por unidade de massa, ou em outras palavras maior densidade, tendo em vista que as cadeias possuem maior nível de empacotamento em relação à fase amorfa. (MORRIS, 2016).

O polietileno de baixa densidade caracteriza-se por ramificações laterais longas, ocasionadas por abstração de hidrogênio durante a polimerização ou polimerização de radical livre. Essas ramificações longas conferem ao polímero boas propriedades de flexibilidade, transparência e facilidade de processamento, devido à menor pressão do fundido em decorrência das cadeias mais longas. Dentro do cenário das embalagens flexíveis, o PEDB é utilizado em processo de coextrusão plana ou a sopro, com aplicações de filme selante ou adesivo e/ou como mistura e aditivo a fim de melhorar a processabilidade. O polietileno de alta densidade contém, substancialmente, nenhuma quantidade de ramificações laterais, ou seja, possui estrutura linear, com maior empacotamento das moléculas, o que resulta em um material mais rígido e denso (MORRIS, 2016; SPERLING, 2006; GODDART, 2016).

Dentre a classe do polietileno, o PEAD é o que possui maior nível de cristalinidade, por volta de 50% a 60% e, portanto, possui alta rigidez, alta resistência térmica e boa resistência à tração. Em aplicações voltadas a embalagens flexíveis, a resina de PEAD é comumente utilizada como barreira ao vapor de água em processo de extrusão a sopro e como laminado, caso submetido ao processo de orientação de máquina (MDO), para obtenção de rigidez na embalagem. O polietileno linear de baixa densidade (PELBD) difere-se de um PEBD pois possui uma estrutura linear que inclui

ramificações curtas e, embora ocupem a mesma faixa de densidades, suas propriedades diferem-se devido a essa diferença nas cadeias poliméricas, que por sua vez, dependem da forma de produção (polimerização) do PELBD. (MORRIS, 2016; SPERLING, 2006; GODDART, 2016).

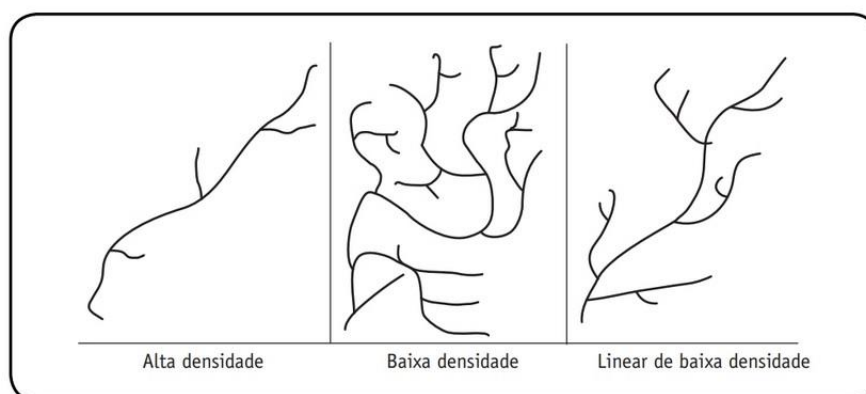
Para o caso do PELBD, conforme apontado por Morris (2016, p 80):

Uma série de parâmetros de produção influenciam nas propriedades do PELBD: Teor de comonomero. Níveis mais altos de buteno, hexeno ou octeno reduzem a cristalinidade e densidade. Densidades mais baixas resultam em maior flexibilidade (menor módulo) e melhor tenacidade. Tipo de comonomero. Polietilenos hexenos e octenos geralmente têm propriedades físicas superiores do que polietileno buteno. Tipo de catalisador. Catalise em base cromo geralmente produzem PELBD com distribuição de peso molecular mais amplo, apesar de ser mais frequentemente utilizado na produção de PEAD com alto peso molecular. Catalisadores Ziegler-Natta apresentam distribuição de peso molecular mais heterogêneo e distribuição de comonomeros com maior quantidade de comonomeros nas cadeias com menor peso molecular. Catalisadores do tipo *Single Site* apresentam distribuição de peso molecular e distribuição de comonomeros de forma mais controlada. Processo de produção: O processo (gás, solução ou lama), número de catalises e número de reatores em série influenciam a distribuição de peso molecular e composição de comonomeros.

Em termos estruturais, o PELBD apresenta maior resistência física em todos os aspectos, em relação ao PEBD. Possui maior resistência ao rasgo, extensibilidade, resistência ao impacto e, como não existem ramificações de cadeia longa, apresenta maior resistência ao rasgo. (GODDART et al, 2016).

A figura 5 esquematiza uma representação das cadeias de PEAD, PEBD e PELBD.

Figura 5 – Representação dos diferentes tipos de cadeia apresentados pelo polietileno



Fonte: Goddart et al , 2006

A tabela 3 evidencia algumas das propriedades dos diferentes tipos de resinas de polietileno, de acordo com sua densidade.

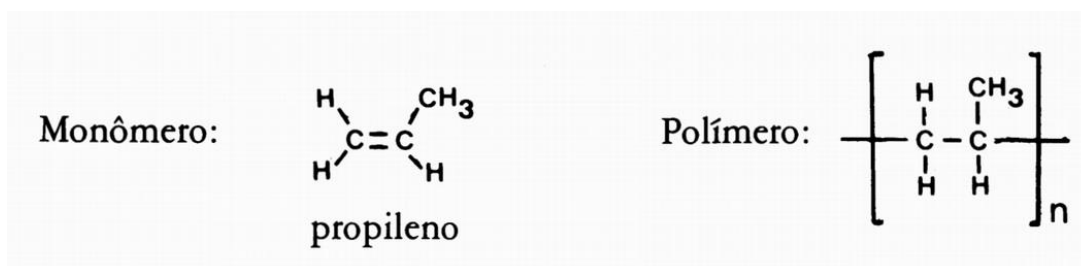
Tabela 3 – Propriedades mecânicas típicas das resinas de polietileno

Propriedade	PEAD	PEBD	PELBD
Densidade	0.94 – 0.97	0.91 – 0.94	0.90 – 0.94
Grau de cristalinidade (% de densidade)	62 - 82	42 - 62	34 – 62
Módulo de flexão (psi em 73°F) X 1000	145 - 225	35 - 48	40 – 160
Módulo de tração (psi em 73°F) X 1000	155 - 200	25 - 50	3 – 130
Alongamento à tensão de ruptura (%)	10 - 1500	100 – 650	100 – 950
Temperatura de fusão (°C)	125 - 132	98 - 115	100 – 125
Temperatura de distorção térmica (°C)	80 - 90	40 - 44	55 - 80

Fonte: Adaptado de Instituto de Embalagens (2016)

O Polipropileno (PP) é uma poliolefina produzida através da polimerização de moléculas de propileno, as quais são o monômero presente no PP, em longas cadeias poliméricas ou redes. Existem diversas formas de ligar tais monômeros, entretanto a forma comercial amplamente mais utilizada é feita com catalizadores que produzem cadeias cristalinas, dando origem a um produto semicristalino com boas características físicas, químicas e mecânicas. (KARIAN, 2003).

Figura 6 – Representação da unidade repetitiva do polipropileno e sua respectiva fórmula química



Fonte: Mano B. E. (1991)

O PP é extremamente versátil devido à suas boas propriedades e processabilidade em larga escala através do processo de extrusão ou injeção. Essas propriedades podem variar através da modificação da regularidade e distribuição das cadeias ou taticidade, do tamanho médio das cadeias, e incorporação de outros tipos de comonomeros como o etileno. Nesse contexto, existem três tipos de polipropileno disponíveis comercialmente, cada um com determinadas especificações, sendo eles os homopolímeros, os copolímeros de bloco e os copolímeros aleatórios. (KARIAN, 2003).

O PP do tipo copolímero randômico é formado por cadeias compostas de etileno e propileno, sendo assim, possuem propriedades distintas devido à presença de comonomeros de etileno em sua estrutura molecular, se aproximando do polietileno em termos de propriedades mecânicas. É utilizado em aplicações que requerem ponto de fusão mais baixo, maior flexibilidade de maior transparência. O Homopolímero, como remete o próprio nome, trata-se do polipropileno contendo apenas propileno em no estado sólido semicristalino. Nesse estado, as cadeias do polímero se entrelaçam em arranjos compactados denominados cristalitos ou lamelas, que se ligam entre si através de cadeias de polímeros que saem de um cristalito para outro. Esse processo de cristalização é o que determina a espessura das lamelas e conseqüentemente, a quantidade de energia necessária para fundi-los, ou seja, a temperatura de fusão T_m . Possui maior grau de finalidade geral e pode ser usado em diferentes aplicações, sendo o mais comum dentro do universo das embalagens flexíveis, tipicamente utilizado como camada estrutural em filmes balão ou *blow film* ou em sua versão orientada (BOPP) pelo processo de *cast film*. O PP do tipo copolímero de bloco incorpora cerca de 5% a 15% de etileno, possui por característica marcante a resistência ao impacto e é tradicionalmente utilizada em aplicações de embalagens rígidas. (KARIAN, 2003; INSTITUTO DE EMBALAGENS, 2016 e MORRIS, 2016).

As vantagens do PP em termos práticos de embalagens flexíveis residem em sua boa barreira contra umidade, impressibilidade, transparência e boa rigidez. Quando necessário, é possível a introdução de aditivos durante seu processo de produção, de forma a auxiliar na funcionalidade do material para o qual se destina a aplicação. Assim, são utilizados sozinhos ou como substratos para laminação, sendo esse último submetido ao processo de orientação biaxial através de tecnologias de

tenter frame ou *double bubble*. Exemplos de produtos onde o polipropileno biorientado (BOPP) é utilizado são em embalagens de biscoitos, que requerem algumas das propriedades mecânicas mencionadas, sobretudo, barreira à umidade e boa rigidez, conforme mostra a figura 7.

Figura 7 – Exemplo de produto com utilização de BOPP



Fonte: Instituto de Embalagens (2016)

A tabela 4 esquematiza algumas das propriedades do polipropileno, de forma geral.

Tabela 4 – Propriedades típicas do polipropileno

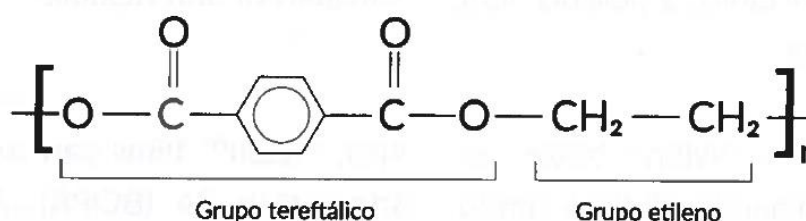
Propriedade	Valor
Densidade (g/cm ³)	0.905
Módulo de flexão secante 1% (MPa)	1100 - 2100
Resistencia a tração no escoamento (Mpa)	32 – 40
Alongamento no escoamento (%)	6 – 12
Temperatura de distorção termica (°C)	91 - 133

Fonte: Adaptado de Instituto de Embalagens (2016)

2.4 POLIETILENO TERAFTALATO

O polietileno tereftalato – PET é classificado com um termoplástico de poliéster, sendo formado pela polimerização-condensação de etileno-glicol e ácido tereftálico ou dimetil-tereftalato. Sua fórmula química complexa possui dois grupos distintos, sendo eles o grupo tereftálico e o grupo do etileno, conforme mostra a figura 8. É extensivamente utilizado na indústria de embalagens flexíveis em sua forma biorientada, com características únicas de resistência térmica, rigidez, resistência a intempéries do meio externo e boas propriedades barreira a odores. (INSTITUTO DE EMBALAGENS, 2016 e ABDEL-BARY, 2003).

Figura 8 – Fórmula química do PET



Fonte: Instituto de Embalagens (2016)

Filmes de PET biorientados são produzidos através do processo de *tenter frame*, onde o PET sofre cristalização devido ao estiramento e orientação, produzindo um filme transparente, estável e resistente ao calor. Em algumas aplicações é revestido com alumínio ou metalizado para oferecer maiores propriedades de barreira ao oxigênio. É tipicamente laminado a um filme selante como o polietileno a fim de combinar as propriedades selantes e flexíveis do PE com a resistência mecânica do PET, configurando boa parte das estruturas de embalagens existentes atualmente no mercado (MORRIS, 2016).

A Tabela 5 relaciona algumas das propriedades mecânicas do PET.

Tabela 5 – Propriedades típicas de um filme PET

Propriedade	PET	PET Orientado
Densidade	1,29 – 1,40	1,40
T _g (°C)	73 – 80	73 – 80
T _m (°C)	245 - 265	245 – 265
Módulo de tração (GPa)	2,8 – 4,1	-
Alongamento à tensão (%)	30 - 3000	70 - 110
Resistencia a tração (MPa)	48 – 72	220 – 270
Temperatura de distorção termica (°C)	38 - 129	-

Fonte: Abdel-Bary (2003)

2.5 PROCESOS FÍSICOS DE TRANSFORMAÇÃO DE POLÍMEROS – ORIENTAÇÃO

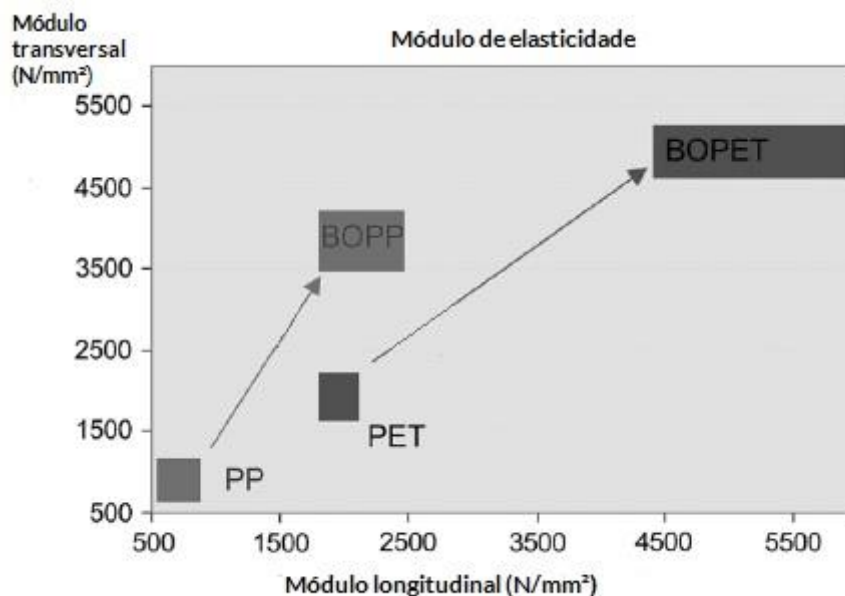
Polímeros podem ser submetidos à métodos físicos de transformação, sob as quais envolvem apenas mudanças na forma do material, sem que ocorra nenhuma reação química entre eles. Para Canevarolo (2003, p. 222):

Orientação: Por meio do estiramento no estado sólido em temperaturas abaixo, mas próximas de T_m, força-se a movimentação das cadeias da fase amorfa, bem como a reorientação dos cristais da fase cristalina. A estrutura normalmente esferulítica é realinhada para uma estrutura do tipo *shish-kebab*, aumentando muito as propriedades mecânicas na direção de orientação. Tal transformação física é usada na produção de fibras, que podem ser monoorientadas (ráfia de PP para sacaria em geral) ou biorientadas como o BOPP (polipropileno biorientado) para a produção de filmes muito resistentes, como por exemplo, embalagens de ovos de pascoa.

Assim, a orientação biaxial ou monodirecional em filmes plásticos representam um processo de refinamento aplicável, sobretudo, em materiais semicristalinos, como polipropileno, poliestirenos e polietileno, a fim de aumentar suas propriedades mecânicas, ópticas e de barreira através do processo de estiramento e consequente

aumento de cristalinidade. A figura 9 evidencia o ganho em resistência mecânica obtido através da orientação, utilizando BOPP e PET biorientado (BOPET) como exemplos. (JR. WAGNER, 2003).

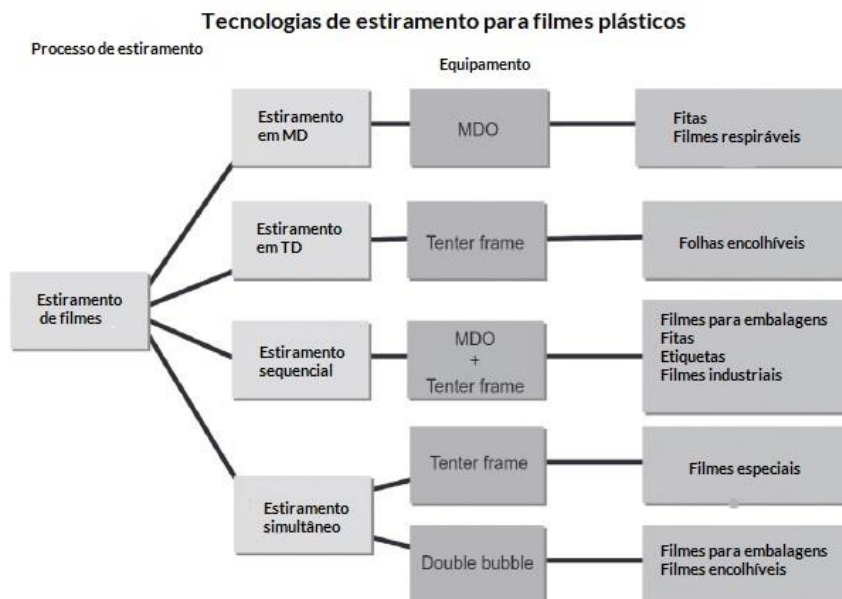
Figura 9 – Aumento de propriedades mecânicas observado no BOPP e BOPET



Fonte: Adaptado de Jr. Wagner (2010), tradução nossa.

Existem diversos processos de orientação e alongamento para filmes plásticos, como mostra a figura 10, com destaque para o *machine direction orienter* (MDO) e o *tenter frame*. A orientação biaxial, ou seja, nas direções de máquina (*machine Direction – MD*) e transversal (*transversal Direction – TD*) é tipicamente realizada de forma sequencial, ou seja, o filme é primeiro submetido à orientação na direção de máquina MD, e em seguida na direção transversal TD, através dos processos de MDO e *Tranversal Direction Orientation* (TDO). O procedimento realizado via *tenter frame* segue esse sequenciamento. (JR. WAGNER, 2010).

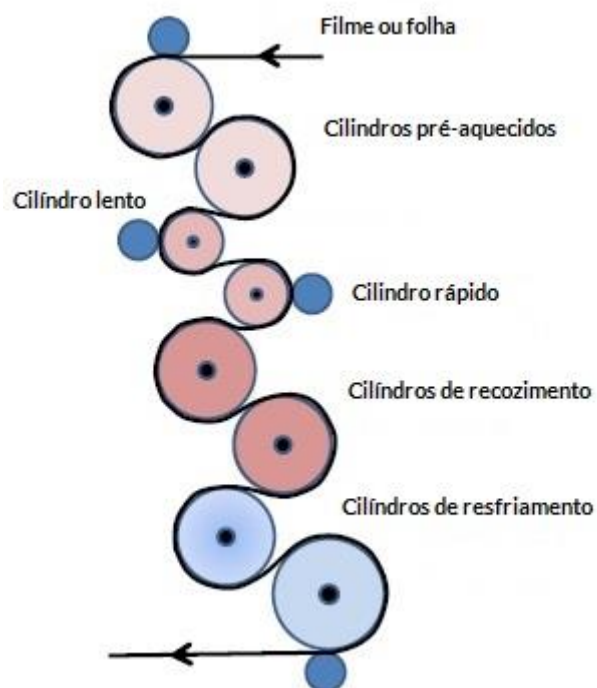
Figura 10 – Tecnologias de orientação direcional de filmes para embalagens



Fonte: Adaptado de Jr. Wagner (2010), tradução nossa

O MDO é realizado através de rolos sequenciais aquecidos, sendo que os primeiros rolos aquecem o material na temperatura de estiramento e então destinados a rolos de embobinamento que operam em diferentes velocidades, sendo essa diferença de velocidade o fator que determina o grau de orientação. Ao final do processo, o filme orientado é então destinado a rolos de recozimento para fixar orientação e por fim, resfriado a temperatura ambiente nos rolos finais, conforme mostra a figura 11. (MORRIS, 2016).

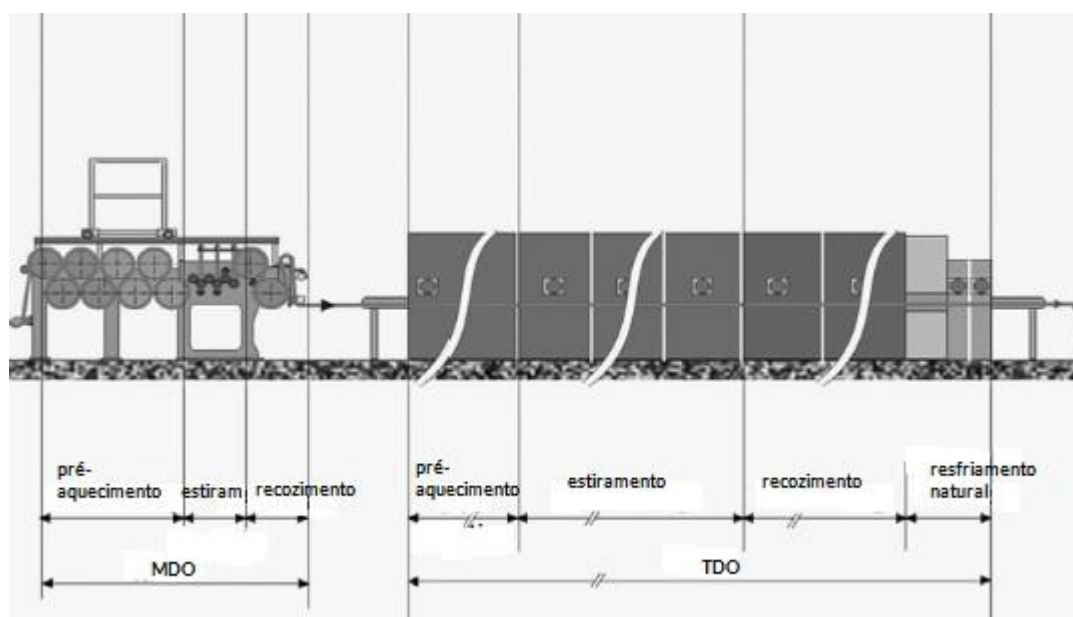
Figura 11 – Processo de orientação na direção de máquina



Fonte: Adaptado de Morris (2016). Tradução nossa.

No processo de orientação *Tenter frame*, o polímero é sequencialmente orientado na direção de máquina e transversal, respectivamente. Dessa forma, primeiro se emprega o procedimento de MDO e ao final deste, o filme é então aquecido novamente em sua temperatura de estiramento e grampos são fixados nas laterais dos filmes e acelerados na direção transversal a esses, estirando-os e conseqüentemente, orientando-os. Por fim, o filme é termofixado através de um recozimento, adquirindo estabilidade dimensional. (MORRIS, 2016).

Figura 12 – Processo de Tenter Frame



Fonte: Adaptado de Jr. Wagner (2010). Tradução nossa.

O polipropileno biorientado (BOPP) é, como remete o nome, um material à base de polipropileno submetido ao processo de estiramento biaxial e possui excelente brilho, além de aceitar impressão sob o filme se tratado superficialmente. Sua aplicação é majoritariamente em embalagens flexíveis, sobretudo em *snaks*, onde é geralmente utilizado em uma ou mais camadas. O material oferece excelente resistência à umidade externa, mantendo o alimento em seu interior crocante, e devido ao processo de orientação, o principal ganho de propriedade mecânica refere-se à rigidez, ao mesmo tempo em que se perde capacidade de selagem. Dessa forma, em geral, é comumente laminado junto à um PE, a fim de manter a propriedade de selagem em embalagens. (INSTITUTO DE EMBALAGENS, 2016 KARIAN, 2003).

Tabela 6 – Propriedades típicas do polipropileno e do polipropileno biorientado

Propriedade	PP	BOPP
Densidade	0,89 – 0,91	0,89 – 0,91
T_G (°C)	-10	-10
T_m (°C)	160-175	160-175
Módulo de tração (GPa)	1,1 – 1,5	1,7 – 2,4
Alongamento à tensão (%)	500-650	120-240
Resistencia a tração (MPa)	31 - 43	120 – 240
Temperatura de distorção termica (°C)	107 - 121	

Fonte: Abdel-Bary (2003)

O polietileno, antes da orientação, possui regiões de cristais ordenados, em forma de placas, unidos através de moléculas que vão de um cristal a outro. Ao redor desses cristais está presente a região amorfa, onde as moléculas são arranjadas randomicamente. Durante o processo de orientação direcional, as moléculas da região amorfa se alinham na direção de orientação até que estejam completamente estiradas e nesse ponto, os cristais também começam a se alinhar paralelamente a superfície do filme. Essa transformação física gera consequências nas propriedades do filme de PE, com destaque para o aumento de rigidez (de duas a três vezes mais), menor opacidade, aumento da resistência em tração e melhora significativa em propriedade barreira contra vapor de água e oxigênio. (JR. WAGNER, 2010).

2.6 RESISTENCIA TÉRMICA

Uma importante propriedade térmica dentro do universo de embalagens flexíveis é a temperatura de distorção ao calor, definida como a temperatura a partir da qual o escoamento viscoso no polímero é mais pronunciado, sendo aferida empiricamente, permitindo avaliar a adequação ou não do material para aplicações

variadas. Quanto mais alta essa temperatura, maior a resistência à deformação ao calor. Esse parâmetro, em termos práticos, é fundamental em processos de selagem das embalagens pois evidencia a máxima temperatura e força de selagem final de cada estrutura em filmes multi e monocamadas. (MANO, 1991 e MORRIS, 2016).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada possui caráter quali-quantitativa, ou seja, combina elementos de interpretação e visualização dos resultados através de resultados numéricos, mas também se avalia qualitativamente em termos de funcionalidade. O teste de rigidez é quantitativo e, portanto, possui valores para comparação direta. O teste de resistência mecânica é naturalmente empírico e funcional, onde avalia-se aspectos físicos-visuais dos materiais. (MARCONI e LAKATOS, 2004)

Trata-se de um trabalho com caráter de aplicação, baseado em uma pesquisa com procedimento experimental e de campo.

3.1 MATERIAIS

Os materiais a serem ensaiados serão coletados de diferentes fornecedores, conforme descrito na tabela 7. Os filmes de polietileno serão coletados dentro da empresa na qual os testes foram realizados, onde será realizada o processo de laminação com as camadas de MDO e BOPP citadas. Por motivos de sigilo, os fornecedores foram substituídos por símbolos.

Tabela 7 – Materiais de estudo

Material	Fornecedor
BOPP tipo A	A
BOPP tipo B	B
BOPP tipo C	C
MDO tipo A	D
MDO tipo B	E
PET 12	F

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Rigidez

Durante o teste de rigidez, as condições são estabelecidas pela norma ASTM D882 – 12 – *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*, onde as principais condições relevantes são citadas na tabela 8.

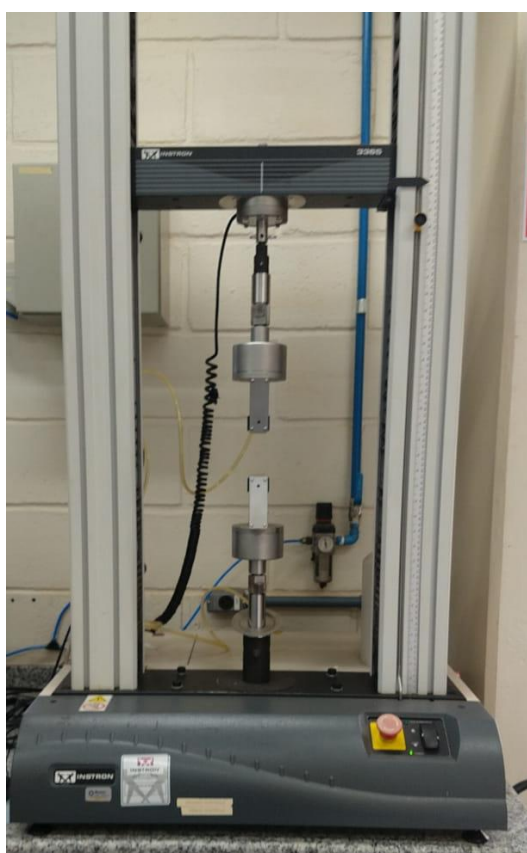
Tabela 8 – Condições de ensaio de rigidez, conforme norma ASTM D882 – 12.

Largura nominal	Entre 5mm e 25,4mm
Uniformidade de espessura	Permite-se variação de, no máximo, 5% da espessura ao longo do comprimento do corpo de prova
Distância entre as garras	250 mm
Nº de corpos de ensaio	No mínimo, 05.
Velocidade de separação das garras, ou velocidade de ensaio	25mm/min

Fonte: Adaptado de ASTM D882-12

O teste mecânico de rigidez e força de selagem foi realizada através de uma máquina universal de ensaios, modelo Instron 3360 e com *software* Bluehill®. O equipamento citado é mostrado na figura 13.

Figura 13 – Máquina de ensaios universais – Modelo Instron 3360



Fonte: Autor (2021)

Dessa forma, para o teste de rigidez, é necessária a aferição da espessura do material, verificada através do relógio comparador *Absolute*, mostrado na figura 14. Ademais, é necessário a preparação dos corpos de ensaio em largura definida em norma, de modo que se utilizou uma guilhotina, na largura de 1 polegada, conforme figura 15.

Figura 14 – Equipamento para aferição de espessura – micrômetro *Absolute* – Mitutoyo.



Fonte: Autor (2021)

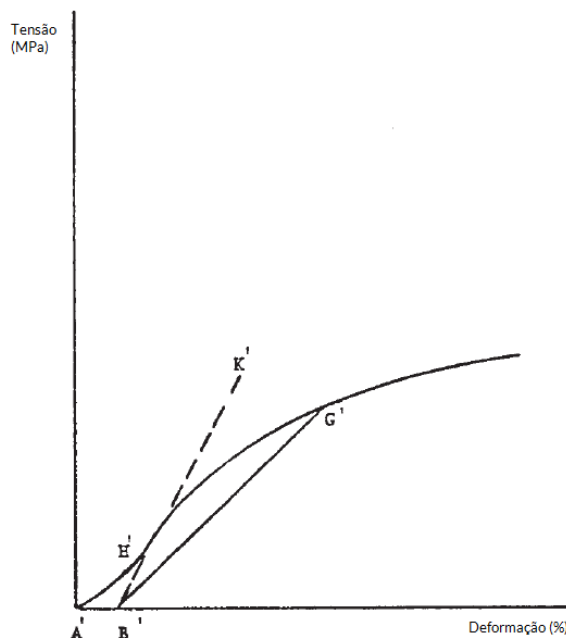
Figura 15 – Guilhotina para corte de corpo de prova com largura de 1 polegada



Fonte: Autor (2021)

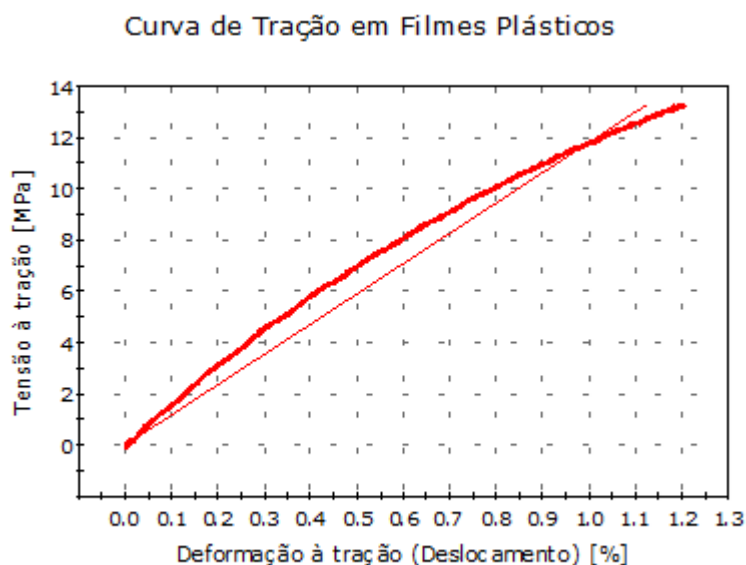
O teste de rigidez de filmes plásticos, dado que o material não apresenta região linear na curva de tensão deformação, utiliza-se uma correção, construindo uma tangente da máxima inclinação no ponto de inflexão (H') da curva experimental. Essa curva é estendida para intersectar o eixo de deformação (B'). Utilizando essa intersecção como ponto zero de deformação, a tensão em qualquer ponto da curva real pode ser dividida pela deformação naquele ponto para obter o módulo secante (inclinação da reta $B' G'$), conforme figura 16.

Figura 16 – Curva de tensão deformação para materiais sem região de deformação linear.



Fonte: Adaptado de ASTM D882-12 (2021)

Figura 17 – Curva de tensão deformação para amostra retirada dos corpos de ensaio



Fonte: Autor (2021)

Com a finalidade de exemplificação do tipo de curva levantada, extraiu-se o dado de uma amostra, construindo a figura 17 onde adotou-se a metodologia de Módulo Secante 1%.

Dessa forma, o material foi cortado na largura especificada de uma polegada, e posicionada entre as garras da máquina de ensaio, com distanciamento de 250mm e velocidade de ensaio de 25mm/min. Assim, aferiu-se os valores de módulo secante de cada um dos materiais supracitados na tabela 7, de forma a ser possível realizar comparação dos valores obtidos.

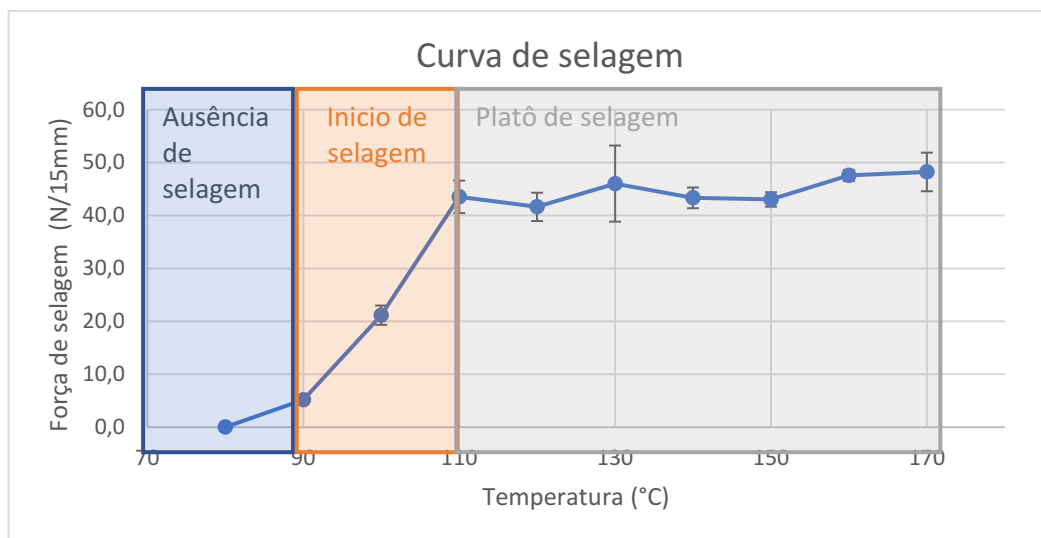
3.2.2 – Resistência Térmica

Para o teste de resistência térmica dos filmes da tabela 7, utilizou-se critério e norma desenvolvida internamente dentro da empresa. Para esse teste, utilizou-se uma seladora térmica, conforme mostrado na figura 18, com parâmetros de selagem especificados na tabela 8.

A selagem de filmes é conduzida laboratorialmente através de condições controladas e seladora térmica em condições específicas. Um levantamento de gráfico de força de selagem por temperatura é conhecida por curva de selagem, provendo informações sobre performance e janela operacional de selagem, onde existem três

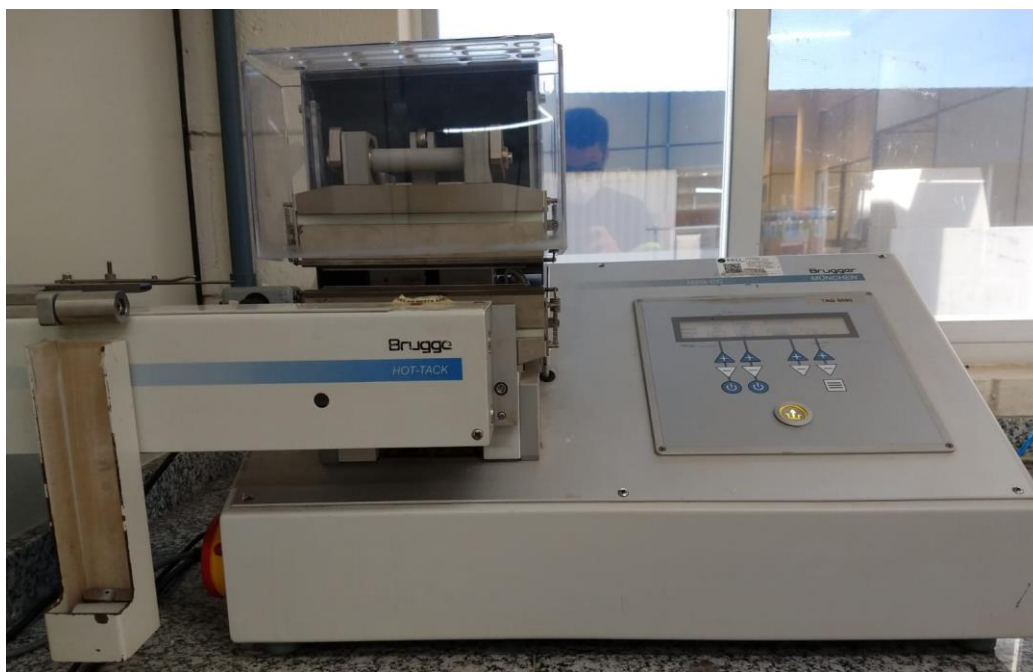
regiões distintas a serem observadas, sendo elas a região de ausência de selagem, a iniciação de selagem e o platô de selagem. A figura 17 ilustra uma curva de selagem convencional.

Figura 18 – Curva de selagem típica de embalagens flexíveis



Fonte: Material interno (2021)

Figura 19 – Seladora Térmica Brugger HSG-CC Heat Sealing Machine



Fonte: Autor (2021)

Tabela 9 – Parâmetros de selagem e setup da máquina seladora

Tempo de contato entre as mandíbulas e filme	0,5 segundos
Pressão das mandíbulas	200N/10cm ²
Direção do filme	TD – Direção transversal
Região de contato do filme	Dentro/Dentro

Fonte: Adaptado de material interno (2021)

A análise dos resultados é realizada através de dois critérios, sendo o primeiro a presença de deformação na selagem em si e na área ao redor da selagem. Em termos de selagem, avalia-se primeiro a condição de selagem ou ausência dela e em seguida a deformação térmica ou ausência dela. Na área ao redor, avalia-se visualmente a condição de ausência de deformação expressiva, deformação expressiva e deformação com encolhimento de filme. Nesse critério, considera-se o limite de resistência térmica do material o momento no qual existe deformação térmica na área de selagem e na área ao redor da mesma. Dessa forma, obtém-se a temperatura máxima na qual o material polimérico resiste ao calor, nas condições do teste desenvolvido para avaliação funcional de um filme polimérico para a indústria de flexíveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados, tabelas e gráficos gerados através dos testes no Instron e software *Bluehill 3*, onde a precisão e casas decimais é ditada pelo equipamento.

4.1 TESTE DE RIGIDEZ

Esse teste tem por principal objetivo a avaliação de rigidez dos filmes, parâmetro importante para características de estabilidade, passo de fotocélula e impressabilidade. A estabilidade refere-se à capacidade do produto se manter em pé durante seu armazenamento e gondolas do mercado. Passo de fotocélula refere-se à uma forma de leitura da máquina de envase durante processo de formatação do produto, momento em que o filme é tensionado e pode sofrer deformação excessiva em caso de baixa rigidez.

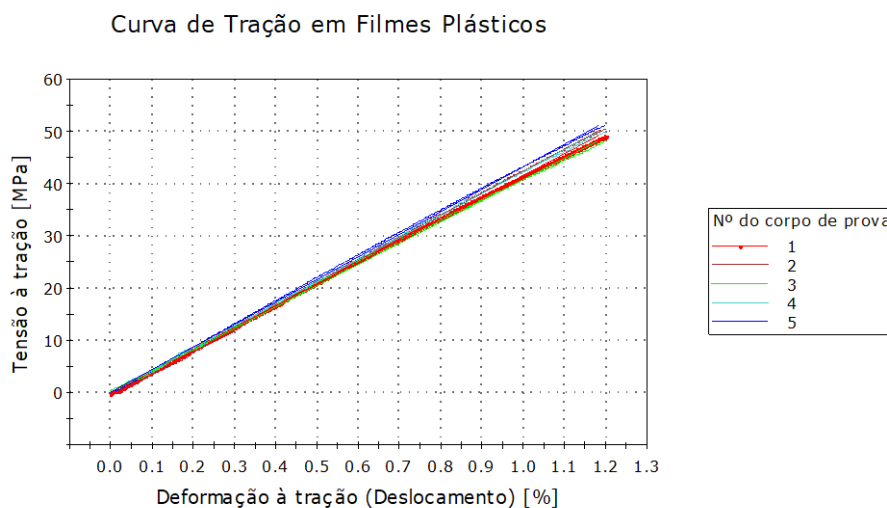
4.1.1 Pet - Referência

A Tabela 10 contempla os dados de rigidez para um filme de poliéster biorientado.

Tabela 10 – Dados de ensaio secante 1% para estrutura PET de referência

Corpo de Prova	Espessura [um]	Módulo Secante [MPa]
PET 12	12,00	4150,0
PET 12	12,00	4240,0
PET 12	12,00	4070,0
PET 12	12,00	4220,0
PET 12	12,00	4320,0
Média	12	4200,0
Desvio padrão	0	95,7
Coefficiente de Variação	0	2,3

Figura 20 – Curva de ensaio secante 1% da estrutura PET de referência



Fonte: Autor (2021)

A semelhança entre os resultados obtidos no ensaio de rigidez do PET fez com que houvesse a sobreposição das curvas, onde as curvas secantes acabam por sobrepor a curva do próprio material, evidenciando um comportamento extremamente representativo em relação aos resultados numéricos, visto que a secante se aproxima da curva característica do material.

Utilizou-se tais valores como referência de comparação para os demais materiais. Como filmes de PET são igualmente biorientados durante seu processo de produção, o ensaio foi realizado em direção única, em sentido de máquina (*Machine Direction - MD*) e seus resultados extrapolados para a direção transversal.

4.1.2 BOPP A

As Tabelas 11 e 12 e Figura 21 referem-se aos resultados obtidos em ensaio de BOPP de fornecedor A.

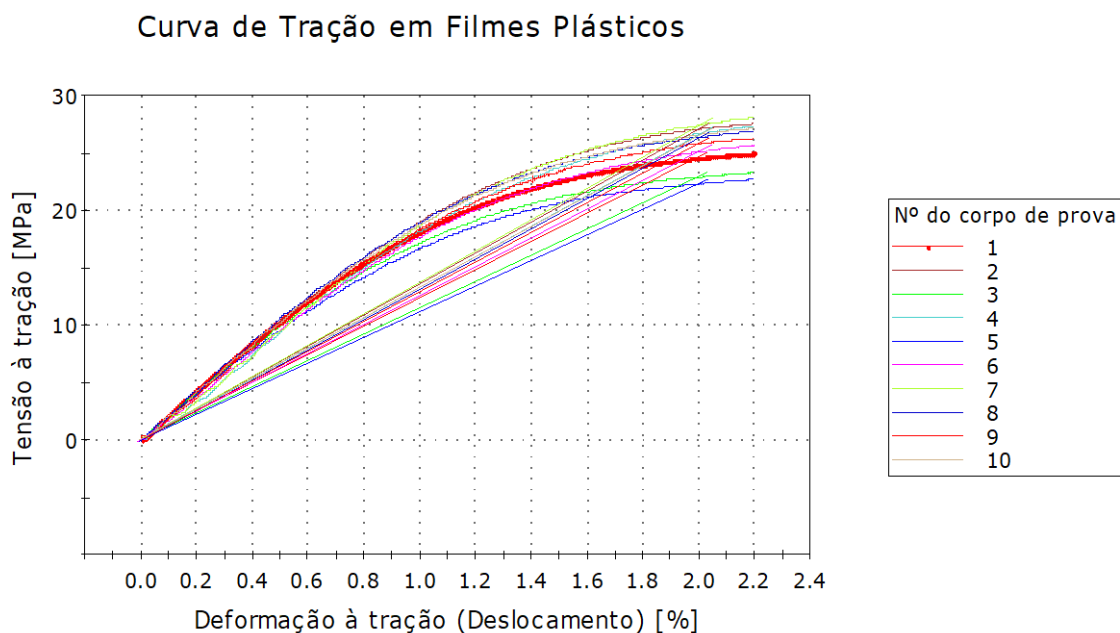
Tabela 11 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor A – Direção de máquina

BOPP tipo A MD		Machine Direction
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]
BOPP tipo A MD	21,0	1230,0
BOPP tipo A MD	20,0	1350,0
BOPP tipo A MD	21,0	1150,0
BOPP tipo A MD	20,0	1330,0
BOPP tipo A MD	21,0	1110,0
BOPP tipo A MD	20,0	1250,0
BOPP tipo A MD	19,0	1370,0
BOPP tipo A MD	20,0	1320,0
BOPP tipo A MD	20,0	1290,0
BOPP tipo A MD	20,0	1330,0
Mean	20,1	1268,8
StdDev	0,6	93,0
Max	21,0	1370,0
Min	19,0	1110,0

Tabela 12 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor A – Direção transversal

BOPP tipo A TD		Transversal Direction
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]
BOPP tipo A TD	21,0	2830,0
BOPP tipo A TD	20,0	2850,0
BOPP tipo A TD	21,0	2750,0
BOPP tipo A TD	20,0	2830,0
BOPP tipo A TD	21,0	2810,0
BOPP tipo A TD	20,0	2850,0
BOPP tipo A TD	19,0	2870,0
BOPP tipo A TD	20,0	2920,0
BOPP tipo A TD	20,0	2990,0
BOPP tipo A TD	20,0	2930,0
Mean	20,1	2863,0
StdDev	0,6	129,3
Max	21,0	2750,0
Min	19,0	2230,0

Figura 21 – Curva de ensaio secante 2% da estrutura BOPP tipo A



Fonte: Autor (2021)

Em comparação ao material de referência, nota-se que o BOPP possui rigidez aproximadamente quatro vezes menor, justificado pela natureza mais cristalizada da estrutura da cadeia química do PET. Ainda, o material apresenta grau de cristalinidade duas vezes maior em seu sentido transversal, sentido onde verifica-se maior rigidez.

4.1.3 BOPP B

As Tabelas 13 e 14 trazem os resultados do ensaio para o BOPP do fornecedor B.

Tabela 13 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor B – Direção de máquina

BOPP tipo B MD		Machine Direction	
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]	
BOPP tipo B MD	20,00	1700,00	
BOPP tipo B MD	20,00	1740,00	
BOPP tipo B MD	20,00	1660,00	
BOPP tipo B MD	18,00	1870,00	
BOPP tipo B MD	17,00	2040,00	
BOPP tipo B MD	19,00	1810,00	
BOPP tipo B MD	20,00	1610,00	
BOPP tipo B MD	20,00	1630,00	
BOPP tipo B MD	18,00	1870,00	
BOPP tipo B MD	20,00	1640,00	
Mean	19	1757	
StdDev	1	139	
Max	20	2040	
Min	17	1610	

Tabela 14 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor B – Direção transversal

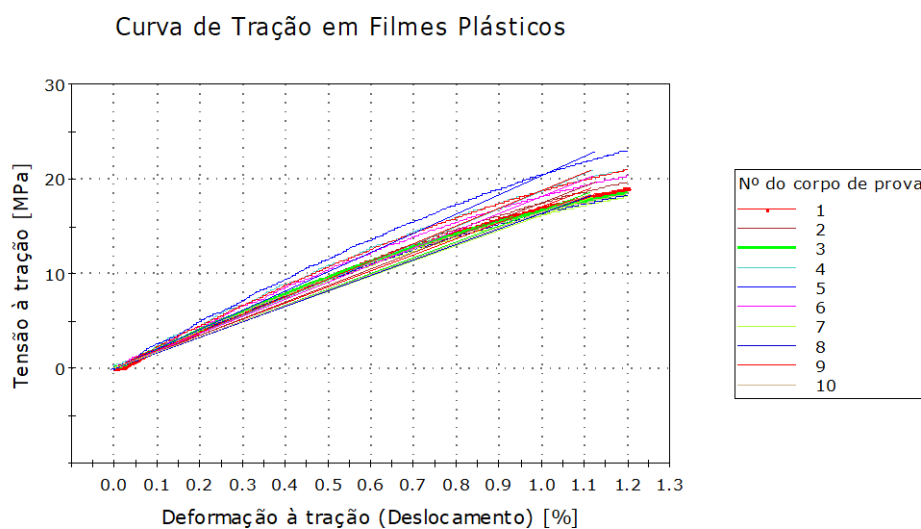
BOPP tipo B TD		Transversal Direction	
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]	
BOPP tipo B TD	20,00	3370,00	
BOPP tipo B TD	20,00	3530,00	
BOPP tipo B TD	20,00	3650,00	
BOPP tipo B TD	21,00	3330,00	
BOPP tipo B TD	21,00	3370,00	
BOPP tipo B TD	19,00	3790,00	
BOPP tipo B TD	20,00	3570,00	
BOPP tipo B TD	20,00	3480,00	
BOPP tipo B TD	20,00	3570,00	
BOPP tipo B TD	20,00	3500,00	
Mean	20	3516	
StdDev	1	141	
Max	21	3790	
Min	19	3330	

Nota-se que esse material possui módulo secante aproximadamente duas vezes maior em seu sentido transversal, o que indica que possui maior grau de

crystalinity nessa direção e, portanto, é duas vezes mais orientado em relação à direção de máquina.

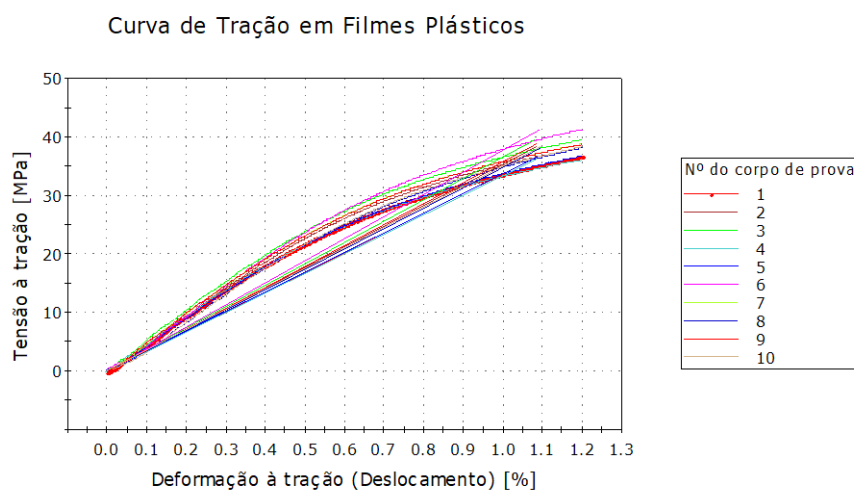
As Figuras 22 e 23 mostram as curvas características do material e suas respectivas secantes. Para o levantamento desses dados, utilizou-se a metodologia de Secante 1%.

Figura 22 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para BOPP de fornecedor B – Direção de máquina



Fonte: Autor (2021)

Figura 23 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para BOPP de fornecedor B – Direção transversal



Fonte: Autor (2021)

4.1.4 BOPP C

As tabelas 15 e 16 abaixo referem-se aos resultados de rigidez para o material do fornecedor C. Do mesmo modo, as curvas de comportamento tensão deformação para esse material em ensaio de rigidez são mostradas nas Figuras 24 e 25.

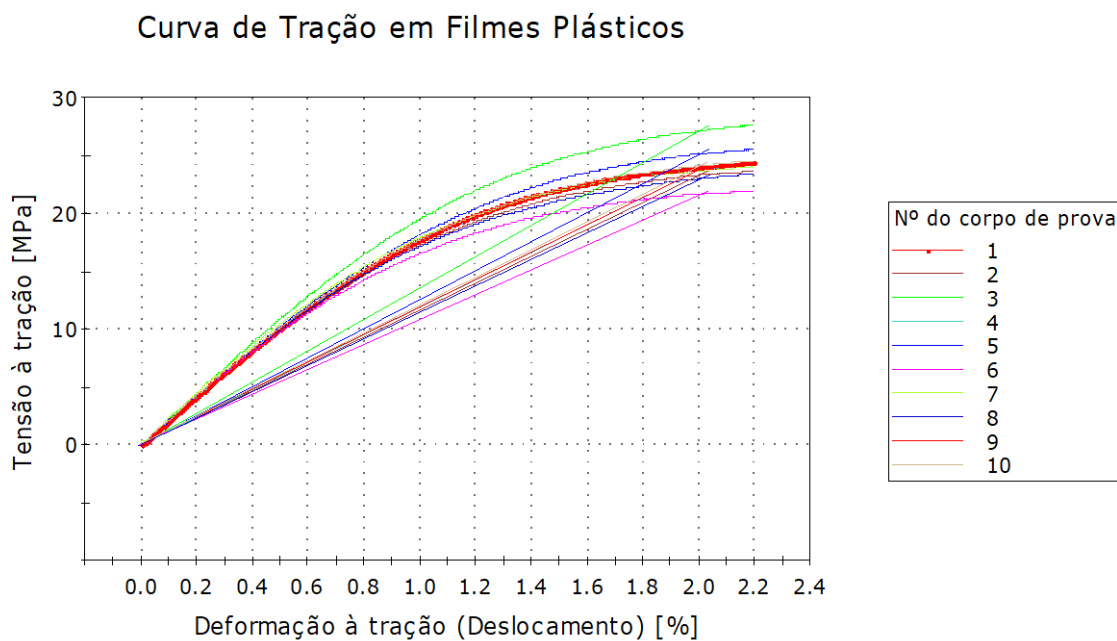
Tabela 15 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor C – Direção de máquina

BOPP tipo C MD		Machine Direction
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]
BOPP tipo C MD	20,00	1200,0
BOPP tipo C MD	21,00	1160,0
BOPP tipo C MD	19,00	1350,0
BOPP tipo C MD	20,00	1190,0
BOPP tipo C MD	20,00	1250,0
BOPP tipo C MD	20,00	1080,0
BOPP tipo C MD	20,00	1180,0
BOPP tipo C MD	20,00	1150,0
BOPP tipo C MD	20,00	1190,0
BOPP tipo C MD	20,00	1200,0
Mean	20	1195
StdDev	0	70
Max	21	1350
Min	19	1080

Tabela 16 – Valores de módulo secante para BOPP de fornecedor C – Direção transversal

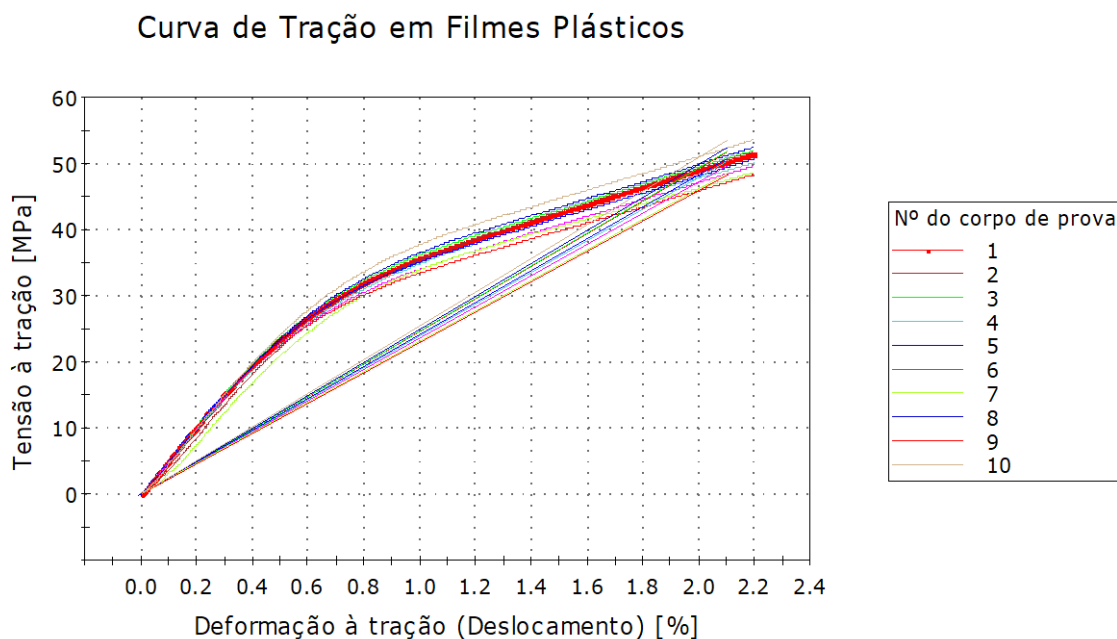
BOPP tipo C TD		Transversal Direction	
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]	
BOPP tipo C TD	20,00	2460,0	
BOPP tipo C TD	20,00	2460,0	
BOPP tipo C TD	20,00	2480,0	
BOPP tipo C TD	20,00	2390,0	
BOPP tipo C TD	20,00	2410,0	
BOPP tipo C TD	20,00	2360,0	
BOPP tipo C TD	21,00	2310,0	
BOPP tipo C TD	20,00	2490,0	
BOPP tipo C TD	20,00	2290,0	
BOPP tipo C TD	19,00	2550,0	
Mean	20	2420	
StdDev	0	83	
Max	21	2550	
Min	19	2290	

Figura 24 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para BOPP de fornecedor C – Direção de máquina



Fonte: Autor (2021)

Figura 25 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para BOPP de fornecedor C – Direção transversal



Fonte: Autor (2021)

Para o ensaio do material do terceiro fornecedor, nota-se comportamento semelhante ao BOPP do segundo fornecedor, com maior grau de orientação no sentido transversal, sendo aproximadamente duas vezes mais orientado em tal sentido.

4.1.5 MDO A

O quarto material analisado trata-se a um Polietileno MDO do fornecedor D Polysack. O material apresenta indicativo de orientação semelhante em ambas as direções.

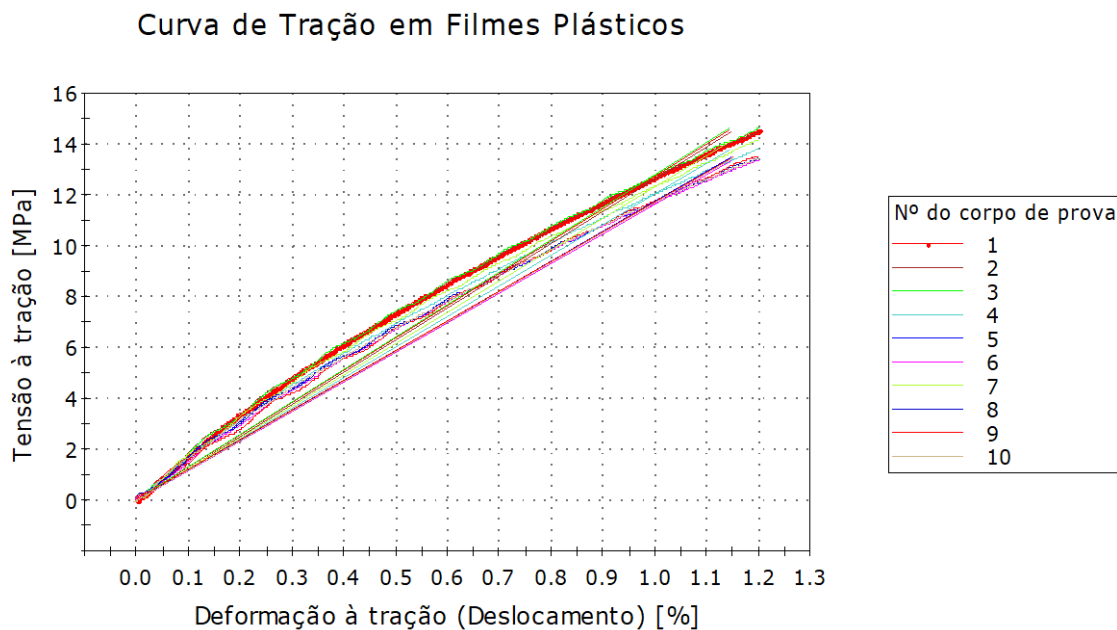
Tabela 17 – Valores de módulo secante para MDO de fornecedor D – Direção de máquina

MDO tipo A MD	Machine Direction	
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]
MDO tipo A MD	23,00	1270,00
MDO tipo A MD	24,00	1260,00
MDO tipo A MD	23,00	1280,00
MDO tipo A MD	24,00	1200,00
MDO tipo A MD	24,00	1170,00
MDO tipo A MD	24,00	1160,00
MDO tipo A MD	25,00	1230,00
MDO tipo A MD	24,00	1170,00
MDO tipo A MD	24,00	1180,00
MDO tipo A MD	25,00	1170,00
Mean	24	1209
StdDev	1	47
Max	25	1280
Min	23	1160

Tabela 18 – Valores de módulo secante para MDO de fornecedor D – Direção transversal

MDO tipo A MD	Transversal Direction	
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]
MDO tipo A MD	23,00	1070,00
MDO tipo A MD	20,00	1190,00
MDO tipo A MD	20,00	1290,00
MDO tipo A MD	25,00	986,00
MDO tipo A MD	24,00	990,00
MDO tipo A MD	25,00	999,00
MDO tipo A MD	23,00	1070,00
MDO tipo A MD	24,00	1040,00
MDO tipo A MD	24,00	1080,00
MDO tipo A MD	24,00	1100,00
Mean	23	1082
StdDev	2	95
Max	25	1290
Min	20	986

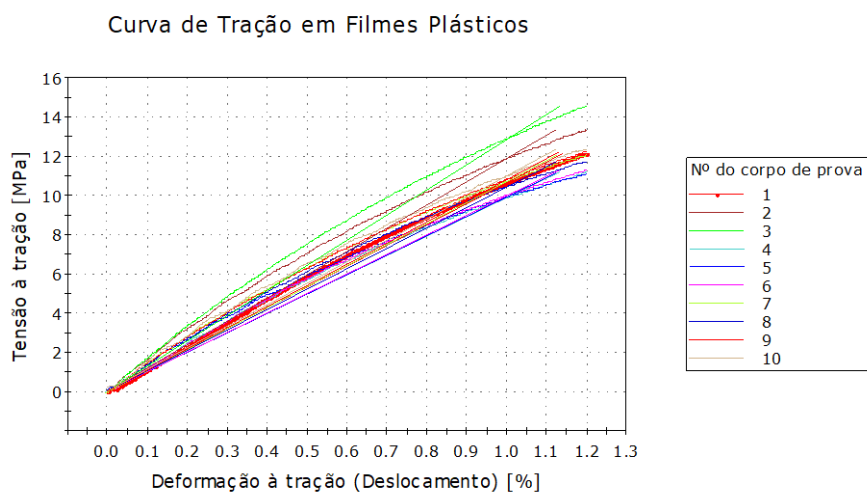
Figura 26 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para MDO de fornecedor D – Direção de máquina



Fonte: Autor (2021)

O material apresenta rigidez na direção de máquina próxima aos materiais dos fornecedores A, B e C mas não exibe módulo secante mais elevado no sentido transversal, justificado pelo fato de que trata-se de material orientado em direção única.

Figura 27 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para MDO de fornecedor D – Direção transversal



O quinto material submetido à análise trata-se de um polietileno MDO, do fornecedor E. As Tabelas 19 e 20 mostram os valores encontrados para ensaio de módulo secante nas direções de máquina e transversal, respectivamente. As Figuras 28 e 29 mostram as curvas do material em ambas as direções.

Do mesmo modo que o material anterior, este apresenta valores de rigidez semelhantes em ambas as direções. Entretanto, pode-se observar maior grau de cristalinidade nesse material, visto que apresenta maiores valores em módulo em ambas as direções.

4.1.6 MDO B

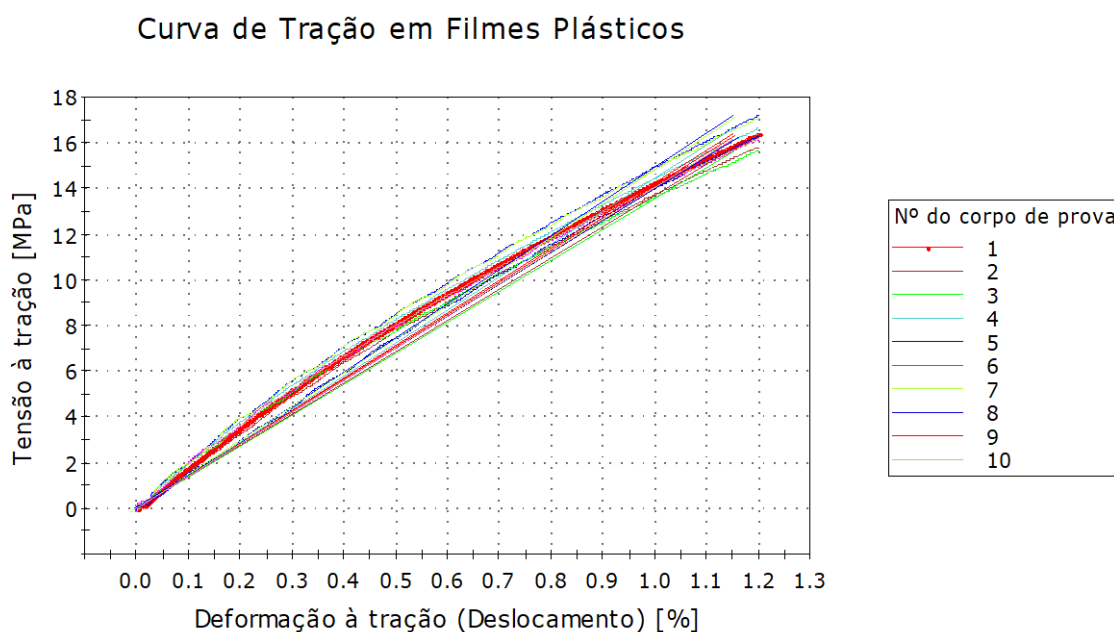
Tabela 19 – Valores de módulo secante para MDO de fornecedor E – Direção de máquina

MDO tipo B MD		Machine Direction
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]
MDO tipo B MD	25,00	1430,00
MDO tipo B MD	24,00	1370,00
MDO tipo B MD	25,00	1360,00
MDO tipo B MD	25,00	1440,00
MDO tipo B MD	25,00	1490,00
MDO tipo B MD	28,00	1400,00
MDO tipo B MD	26,00	1480,00
MDO tipo B MD	25,00	1400,00
MDO tipo B MD	28,00	1410,00
MDO tipo B MD	25,00	1400,00
Mean	26	1418
StdDev	1	43
Max	28	1490
Min	24	1360

Tabela 20 – Valores de módulo secante para MDO de fornecedor E – Direção transversal

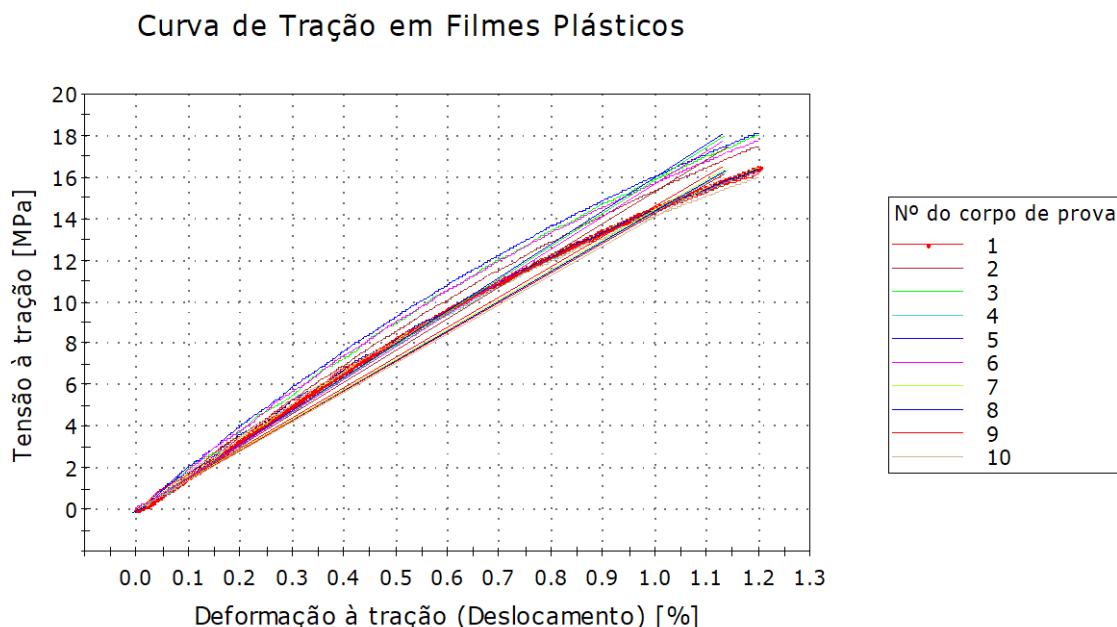
MDO tipo B TD	Transversal Direction	
Test#	Espessura [um]	Módulo Secante [Mpa]
MDO tipo B TD	25,00	1460,00
MDO tipo B TD	28,00	1530,00
MDO tipo B TD	25,00	1590,00
MDO tipo B TD	28,00	1430,00
MDO tipo B TD	25,00	1600,00
MDO tipo B TD	24,00	1570,00
MDO tipo B TD	26,00	1450,00
MDO tipo B TD	26,00	1440,00
MDO tipo B TD	25,00	1430,00
MDO tipo B TD	25,00	1410,00
Mean	26	1491
StdDev	1	74
Max	28	1600
Min	24	1410

Figura 28 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para MDO de fornecedor E – Direção de máquina



Fonte: Autor (2021)

Figura 29 – Curva de tensão x deformação de ensaio secante 1% para MDO de fornecedor E – Direção de transversal



Fonte: Autor (2021)

Em termos de comparativos numéricos, é evidente que as alternativas apresentam módulo razoavelmente inferior ao PET. Esse resultado é esperado, em vista da maior densidade do poliéster em relação ao PP e PE, bem como sua estabilidade química e cristalinidade superior aos materiais citados. Apesar disso, os materiais poleofínicos se apresentam como alternativa viável em casos em que os requisitos de rigidez não sejam estritamente severos para a aplicação, tendo em vista a existência de uma diversidade de mercados e as demandas de sustentabilidade, onde estruturas de uma só classe de polímeros é desejável.

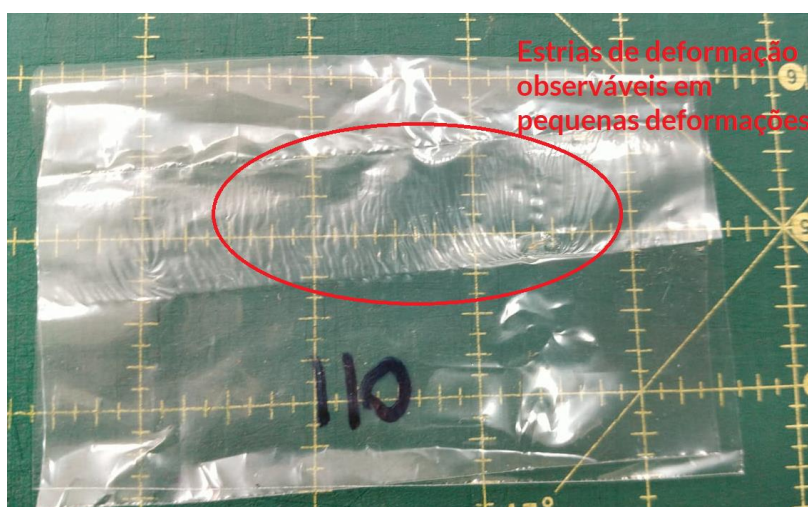
Sob outra perspectiva, os materiais analisados podem ser mais interessantes para confecção de produtos com maiores propriedades de alongamento, tendo em vista que menor grau de cristalinidade significa maior mobilidade das cadeias, o que se reflete fisicamente em maior capacidade de estiramento. Dessa forma, a comparação entre dois polímeros de diferentes classes pode conferir vantagens e desvantagens ao filme, entretanto as diferenças significativas de valores entre os materiais é fator que insere a necessidade de teste de maquinabilidade no cliente.

4.2 TESTE DE RESISTENCIA TÉRMICA

Os testes de resistência térmica seguiram a metodologia interna proposta, onde analisou-se a janela de selagem e o nível de deformação das amostras.

Poliiolefinas em geral não apresentam grande capacidade de resistência térmica dado que sua temperatura de fusão cristalina gira em torno de 130°C a 140°C, o que torna o material propenso para aplicações que exijam condição de sela, embora sua janela de selagem seja funcional até temperaturas de 160°C. Isso se deve à própria natureza das poliolefinas, que não apresentam em geral ligações primárias fortes em sua estrutura química ou grupos funcionais com grande estabilidade. Ao contrário, o poliéster possui alta resistência térmica pois apresenta ligações primárias fortes e grupos funcionais estáveis, como anéis aromáticos. As figuras abaixo apresentam os aspectos de deformação que puderam ser observados durante aplicação da metodologia proposta e conseqüente ensaio.

Figura 30 – Aspecto observado em casos de pequenas deformações



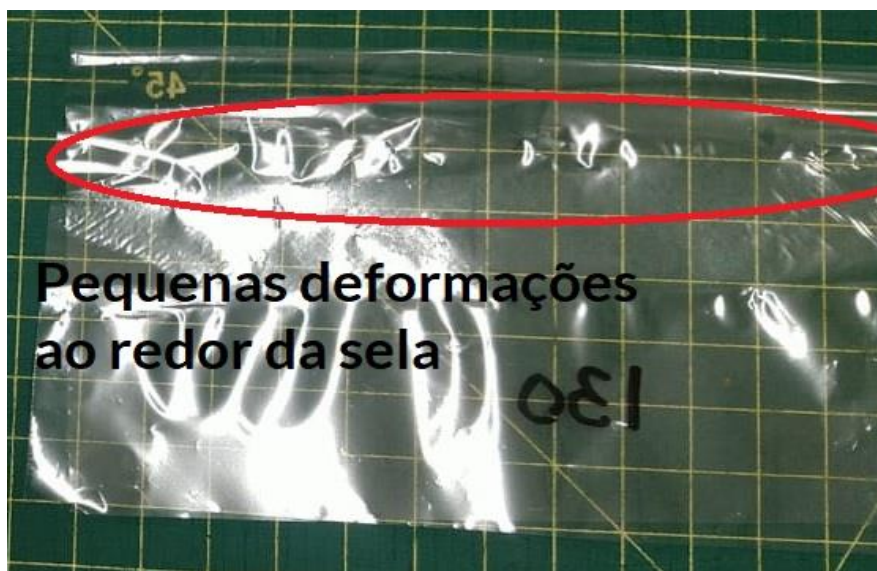
Fonte: Autor (2021)

Figura 31 – Aspecto observado em casos de deformações expressivas na região de sela e em suas adjacências



Fonte: Autor (2021)

Figura 32 – Aspecto observado em casos de deformações pequenas nas adjacências da região de sela



Fonte: Autor (2021)

4.2.1 Pet – Referência

O pet biorientado possui alta resistência térmica, sendo possível observar distorções significativas em sua estrutura em temperaturas a partir de 160°C, conforme segue na Figura 33.

Figura 33 – Aspecto de deformação de BOPET



Fonte: Autor (2021)

A Tabela 21 exibe os valores de temperatura e comportamento das amostras de BOPET referência.

Tabela 21 – Relação comportamento X temperatura para BOPET referência

BOPET	Direção de máquina			
	Corpo de Prova	Temperatura da Selagem (°C)	Área de selagem	Área ao redor
BOPET		100	OK	OK
BOPET		100	OK	OK
BOPET		100	OK	OK
BOPET		110	OK	OK
BOPET		110	OK	OK
BOPET		110	OK	OK
BOPET		120	OK	OK
BOPET		120	OK	OK
BOPET		120	OK	OK
BOPET		130	OK	OK
BOPET		130	OK	OK
BOPET		130	OK	OK
BOPET		140	OK	OK
BOPET		140	OK	OK
BOPET		140	OK	OK
BOPET		150	OK	OK
BOPET		150	OK	OK
BOPET		150	OK	OK
BOPET		160	Pequenas deformações	Pequenas deformações
BOPET		160	Pequenas deformações	Pequenas deformações
BOPET		160	Pequenas deformações	Pequenas deformações

Os subtópicos a seguir mostram os resultados de resistência térmica e selagem para os polímeros da classe de poliolefinas analisados.

4.2.2 BOPP A

A Tabela 22 mostra os valores de temperatura e condição de selagem do BOPP de fornecedor do tipo A.

Tabela 22 – Relação comportamento X temperatura para BOPP A

BOPP tipo A	Direção de máquina		
	Corpo de Prova	Temperatura da Selagem (°C)	Área de selagem
BOPP tipo A	100	OK	OK
BOPP tipo A	100	OK	OK
BOPP tipo A	100	OK	OK
BOPP tipo A	110	OK	OK
BOPP tipo A	110	OK	OK
BOPP tipo A	110	OK	OK
BOPP tipo A	120	OK	OK
BOPP tipo A	120	OK	OK
BOPP tipo A	120	OK	OK
BOPP tipo A	130	OK	OK
BOPP tipo A	130	OK	OK
BOPP tipo A	130	OK	OK
BOPP tipo A	140	OK	OK
BOPP tipo A	140	OK	OK
BOPP tipo A	140	OK	OK
BOPP tipo A	150	Pequenas deformações	Pequenas deformações
BOPP tipo A	150	Pequenas deformações	Pequenas deformações
BOPP tipo A	150	Pequenas deformações	Pequenas deformações
BOPP tipo A	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento
BOPP tipo A	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento
BOPP tipo A	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento

O material apresenta condição isenta de deformações em temperaturas inferiores à 150°C. A partir desse valor de temperatura, o material apresenta condição de degradação por temperatura, sendo que em temperatura de 160°C, existe perda de funcionalidade devido à encolhimento de filme. Segundo a metodologia adotada, considera-se limite de resistência térmica a partir do momento em que tanto a região de sela como seus arredores apresentam deformação visível, sendo nesse caso a temperatura de 150°C.

4.2.3 BOPP B

A Tabela 23 mostra os valores de temperatura e condição de selagem do BOPP de fornecedor do tipo B.

Tabela 23 – Relação comportamento X temperatura para BOPP do tipo B

BOPP Tipo B	Direção de máquina		
	Corpo de Prova	Temperatura da Selagem (°C)	Área de selagem
BOPP Tipo B	100	OK	OK
BOPP Tipo B	100	OK	OK
BOPP Tipo B	100	OK	OK
BOPP Tipo B	110	OK	OK
BOPP Tipo B	110	OK	OK
BOPP Tipo B	110	OK	OK
BOPP Tipo B	120	OK	OK
BOPP Tipo B	120	OK	OK
BOPP Tipo B	120	OK	OK
BOPP Tipo B	120	OK	OK
BOPP Tipo B	130	OK	OK
BOPP Tipo B	130	OK	OK
BOPP Tipo B	130	OK	OK
BOPP Tipo B	140	OK	OK
BOPP Tipo B	140	OK	OK
BOPP Tipo B	140	OK	OK
BOPP Tipo B	150	Pequenas deformações	Pequenas deformações
BOPP Tipo B	150	Pequenas deformações	Pequenas deformações
BOPP Tipo B	150	Pequenas deformações	Pequenas deformações
BOPP Tipo B	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento
BOPP Tipo B	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento
BOPP Tipo B	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento

O material de fornecedor B apresenta comportamento extremamente semelhante ao material do BOPP do tipo A, e portanto, também considera-se limite de resistência térmica em 150°C.

4.2.4 BOPP C

A Tabela 24 mostra os valores de temperatura e condição de selagem do BOPP de fornecedor do tipo C.

Tabela 24 – Relação comportamento X temperatura para BOPP do tipo C

BOPP tipo C		Direção de máquina	
Corpo de Prova	Temperatura da Selagem (°C)	Área de selagem	Área ao redor
BOPP tipo C	100	OK	OK
BOPP tipo C	100	OK	OK
BOPP tipo C	100	OK	OK
BOPP tipo C	110	OK	OK
BOPP tipo C	110	OK	OK
BOPP tipo C	110	OK	OK
BOPP tipo C	120	OK	OK
BOPP tipo C	120	OK	OK
BOPP tipo C	120	OK	OK
BOPP tipo C	120	OK	OK
BOPP tipo C	130	OK	OK
BOPP tipo C	130	OK	OK
BOPP tipo C	130	OK	OK
BOPP tipo C	140	OK	OK
BOPP tipo C	140	OK	OK
BOPP tipo C	140	OK	OK
BOPP tipo C	150	Deformação expressiva	Pequena deformação
BOPP tipo C	150	Deformação expressiva	Pequena deformação
BOPP tipo C	150	Deformação expressiva	Pequena deformação
BOPP tipo C	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento
BOPP tipo C	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento
BOPP tipo C	160	Deformação com encolhimento	Deformação com encolhimento

De forma semelhante ao material do tipo B, o BOPP do fornecedor C apresenta limite de resistência térmica em condições de temperatura inferior a 150°C. Entretanto, ao atingir esse valor, o material do tipo C já apresenta deformação expressiva, o que pode ser indicativo de rápida perda de funcionalidade a partir do momento em que se atinge tal valor de temperatura.

4.2.5 MDO A

A Tabela 25 mostra os valores de temperatura e condição de selagem do MDO de fornecedor do tipo A.

Tabela 25 – Relação comportamento X temperatura para MDO do tipo A

MDO tipo A		Direção de máquina	
Corpo de Prova	Temperatura da Selagem (°C)	Área de selagem	Área ao redor
MDO A	100	OK	OK
MDO A	100	OK	OK
MDO A	100	OK	OK
MDO A	110	Pequena deformação	OK
MDO A	110	Pequena deformação	OK
MDO A	110	Pequena deformação	OK
MDO A	120	Pequena deformação	OK
MDO A	120	Pequena deformação	OK
MDO A	120	Pequena deformação	OK
MDO A	130	Deformação expressiva	Pequena deformação
MDO A	130	Deformação expressiva	Pequena deformação
MDO A	130	Deformação expressiva	Pequena deformação
MDO A	140	Deformação com encolhimento de filme	Deformação expressiva
MDO A	140	Deformação com encolhimento de filme	Deformação expressiva
MDO A	140	Deformação com encolhimento de filme	Deformação expressiva
MDO A	150	Degradação	Encolhimento Expressivo
MDO A	150	Degradação	Encolhimento Expressivo
MDO A	150	Degradação	Encolhimento Expressivo

O MDO do fornecedor A começa a apresentar pequenas deformações de temperatura na faixa de 110°C. Tratando-se de um polietileno, espera-se reação visível do material nessa faixa, embora sua funcionalidade se preserve até temperatura de aproximadamente 130°C, onde existem deformações observáveis na região ao redor da sela, indicando encolhimento.

4.2.6 MDO B

A Tabela 26 mostra os valores de temperatura e condição de selagem do MDO de fornecedor do tipo B.

Tabela 26 – Relação comportamento X temperatura para MDO do tipo B

MDO tipo B		Machine direction	
Corpo de Prova	Temperatura da Selagem (°C)	Área de selagem	Área ao redor
MDO tipo B	100	OK	OK
MDO tipo B	100	OK	OK
MDO tipo B	100	OK	OK
MDO tipo B	110	Pequena deformação	OK
MDO tipo B	110	Pequena deformação	OK
MDO tipo B	110	Pequena deformação	OK
MDO tipo B	120	Pequena deformação	OK
MDO tipo B	120	Pequena deformação	OK
MDO tipo B	120	Pequena deformação	OK
MDO tipo B	130	Deformação expressiva	OK
MDO tipo B	130	Deformação expressiva	OK
MDO tipo B	130	Deformação expressiva	OK
MDO tipo B	140	Deformação com encolhimento de filme	Deformação expressiva
MDO tipo B	140	Deformação com encolhimento de filme	Deformação expressiva
MDO tipo B	140	Deformação com encolhimento de filme	Deformação expressiva
MDO tipo B	150	Degradação	Encolhimento Expressivo
MDO tipo B	150	Degradação	Encolhimento Expressivo
MDO tipo B	150	Degradação	Encolhimento Expressivo

O material apresenta condição com deformação considerável na região de 130°C em sua região de sela e o mesmo aspecto ao redor da região de selagem somente na região de 140°C. Esse tipo de comportamento indica capacidade funcional do material resistir melhor a degradações térmicas, na medida em que a região ao redor da aplicação de calor deforma-se apenas em temperatura mais elevada.

5. CONCLUSÕES

Em análise quantitativa, referente ao teste de rigidez, é evidente que os materiais propostos apresentam módulo razoavelmente inferior ao PET. Esse resultado é esperado, em vista da maior densidade do poliéster em relação ao PP e PE, estrutura química que apresenta maior energia de ligação e, portanto, maior estabilidade, bem como cristalinidade superior aos materiais citados. Apesar disso, os materiais da classe das poliolefinas se apresentam como alternativa viável em casos em que os requisitos de rigidez não sejam estritamente severos para a aplicação, tendo em vista a existência de uma diversidade de mercados e especialmente, as demandas de sustentabilidade, onde estruturas de uma só classe de polímeros é desejável.

Sob outra perspectiva, os materiais analisados podem ser mais interessantes para confecção de produtos com maiores propriedades de alongamento, tendo em vista que menor grau de cristalinidade significa maior mobilidade das cadeias, o que se reflete fisicamente em maior capacidade de estiramento. A utilização de tecnologias de transformação física de polímeros também é capaz de conferir maior liberdade de formulação dentro dos setores de desenvolvimento, tendo em vista que se pode controlar características mecânicas através do processo de orientação, em alternativa do trabalho com *grades* do PET. Dessa forma, a comparação entre dois polímeros de diferentes classes pode conferir vantagens e desvantagens ao filme, entretanto as diferenças significativas de valores entre os materiais é fator que insere a necessidade de teste de maquinabilidade no cliente.

De maneira direta, é notável a diferença de funcionalidade térmica entre os três tipos de materiais analisados. Nível de cristalinidade e resistência térmica estão intimamente ligados, onde maior nível de cristalinidade significa maior resistência térmica pois funciona como fator intensificador de forças secundárias e rigidez de cadeia. Dessa forma, o PET é notavelmente mais estável termicamente, seguido pelo polipropileno e polietileno, respectivamente.

Qualitativamente, o BOPP do tipo C parece possuir perda de funcionalidade mais acentuada em relação aos demais polipropilenos, devido a sua deformação térmica mais expressiva na temperatura de 150°C, o que se pode justificar devido à seu indicativo de menor nível de orientação e consequente rigidez em relação aos

BOPP A e B. Para os polietilenos MDO, ambos apresentam mesmo grau de resistência.

Ainda em termos de resistência térmica, a menor janela de operação de selagem dos materiais propostos é fator que pode gerar economia em termos energéticos para os proprietários de máquinas de formatação, visto que é necessário a redução da temperatura de selagem para estruturas com presença de polietileno ou polipropileno como substrato, não obstante ao cálculo de perdas por *setup*, onde faz-se necessário o balanceamento desse tipo de custo. Devido à presença de ligações primárias fortes na estrutura química do poliestireno (BOPET), encontrar um material que possa performar nas mesmas condições de resistência térmica é um desafio para a indústria, sobretudo levando em consideração as demandas de sustentabilidade. Os materiais propostos podem não atingir os mesmos requisitos de funcionalidade em temperaturas mais elevadas, mas se aproximam bastante em temperaturas intermediárias e podem ser utilizadas como alternativas mediante adaptações do filme selante, em geral, reduzindo sua temperatura de iniciação de selagem.

Para futuros estudos, existem algumas possibilidades de melhorias e a análise dentro de determinados segmentos de mercado é necessária para o entendimento de melhores nichos de aplicação do estudo. Alternativamente, a avaliação de uma dupla camada de BOPP ou MDO com o objetivo de alcançar mesmo nível de rigidez de um BOPET pode ser empregado, em caso de aplicações que demandem solicitações críticas de propriedades mecânicas. Para requisitos de resistência térmica, a aplicação de vernizes alta barreira ou *coatings* é um caminho em potencial e que já é empregado em determinadas soluções, em escala industrial. Em termos de ensaios, o emprego de um extensômetro para verificação quantitativa de grau de deformação é uma alternativa à metodologia empregada e pode contribuir para um melhor entendimento, embora exista uma dificuldade em quantificar a funcionalidade de uma determinada estrutura.

REFERÊNCIAS

ABDEL-BARY M. E.; **Handbook of plastic films** - Shawbury, UK – Rapra Technology, 2003.

ABIPLAST - Associação Brasileira Da Indústria Do Plástico. A Indústria de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil. São Paulo: São Paulo, 2020.

AFFINKO SOLUÇÕES EM POLÍMEROS. **DSC: O que é e para que serve?** 2018. Disponível em <https://afinkopolimeros.com.br/dsc-o-que-e-e-para-que-serve/>. Acesso em 06 de agosto de 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002. (modelo de referência com autoria coletiva)

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução** – Rio de Janeiro, LTC, 2016.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CEFLEX – **A circular economy for flexible packaging. Project barrier design for recyclability guidelines for plastic-based flexible barrier packaging** – disponível em <<https://ceflex.eu/projectbarrier>>. Acesso em julho de 2021.

CETESB e ABRE - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e Associação Brasileira De Embalagem. **Embalagem e sustentabilidade**: desafios e orientações no contexto da economia circular. 1.ed. São Paulo, 2016

COLTRO, Leda. **Reciclagem de Embalagens Plásticas Flexíveis**: Contribuição da Identificação Correta. CETEA, 2012.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. 2020. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/fundacao-ellen-macarthur/a-fundacao>>. Acesso em: 07 de junho de 2021.

Goddard R., Twede D. **Materiais para embalagens** – São Paulo, Editora Blucher, 2009.

Instituto de Embalagens. **Embalagens Flexíveis: Embalagem melhor. Mundo melhor.** 1. ed. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2016.

Instituto de Embalagens; Marcondes C.. **Embalagens Flexíveis: Embalagem melhor. Mundo melhor** 1. ed. Barueri – São Paulo, 2016.

JR. WAGNER; R.J. **Multilayer Flexible Packaging – technology and applications for the food, personal care and over the counter pharmaceutical industries** – Oxford, UK – Elsevier, 2010.

Karian H. G. **Handbook of polypropylene and polypropylene composites** - New York, NY - Marcel Dekker, 2003.

MANO, B. E., **Polímeros como matérias de engenharia** – São Paulo, Editora Blucher, 1991.

Mano, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia** – São Paulo - Editora Edgar Blucher, 1991.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. V.. **Metodologia científica.** São Paulo: Editora Atlas, 2004.

MORRIS , Barry A. **The Science and Technology of Flexible Packaging: Multilayer Films from Resin and Process to End Use.** 1. ed. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2016. P. 101 – 103.

RIBEIRO JUNIOR. Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowitz. **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR.** Ponta Grossa, 2011. (Apostila).

Sperling, L. H. **Intodruction to physical polymer science** – Hoboken, New Jersey, 2006.

STAHEL, Walter R. **The Circular Economy: A user's guide** – New York, NY, 2019.

USP **Generalidades e estrutura de polímeros.** Disponível em <http://www.pmt.usp.br/pmt5783/Aula%20de%20pol%C3%ADmeros%20-%20generalidade%20e%20estrutura.pdf>. Acesso em 17 de junho de 2021.