

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FILMES DE POLIETILENO COM DIFERENTES RESINAS PEBDL

Keyt Goulart¹

Morgana Nuernberg Sartor Faraco²

Resumo: As embalagens flexíveis de polietileno são muito utilizadas na indústria devido aos seus benefícios nos processos ao qual é submetido, sua versatilidade, baixo custo e bom desempenho em diversos processos de transformação que ampliam as oportunidades de aplicação no mercado. Após a produção é de extrema importância que se conheça as propriedades mecânicas deste filme, pois o mercado consumidor está cada vez mais exigente e a tecnologia cresce dia após dia. Neste trabalho buscou-se identificar quais propriedades mecânicas do filme de polietileno (PE) serão influenciadas pela alteração da formulação padrão com um percentual fixo de diferentes resinas de PEBDL nas camadas “A” e “E” na extrusora balão. As propriedades mecânicas analisadas neste trabalho em quatro testes de diferentes resinas PEBDL, são: módulo de elasticidade, resistência à perfuração, resistência da termossoldagem à tração – selagem a frio e *Hot Tack*. Obteve-se nos testes grande semelhanças das propriedades mecânicas entre as formulações. Podemos destacar que formulações dos Teste 2 – Octeno Metaloceno e Teste 3 – Hexeno Metaloceno, apresentaram temperatura mais baixa e melhor força de selagem, com isso um range maior de temperatura. O teste 4 – Hexeno Metaloceno (Contratipo) apresentou melhor rentabilidade econômica comparado a formulação padrão (teste 1 - Octeno). Com os resultados adquiridos nos ensaios mecânicos das formulações desenvolvidas, conseguimos um produto produzido com menor custo, porém, com qualidade semelhante a formulação padrão. Os testes foram aprovados e assim temos um número maior de matérias-primas (resinas PEBDL) disponíveis para utilização na produção das embalagens flexíveis.

Palavras-Chave: Polímeros. Polietileno. Embalagens. Propriedades Mecânicas.

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população, sua concentração em grandes centros urbanos, o aumento do consumo, as melhorias do padrão de vida, entre tantos outros fatores, contribuem para o constante crescimento da demanda por produtos industrializados. Contudo, esses produtos precisam do desenvolvimento de embalagens que buscam a otimização do ciclo de vida, diminuindo o impacto

¹ Graduando em Engenharia Química. E-mail: keyt_goulart@hotmail.com

² Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: morgana.sartor@satc.edu.br

ambiental, reduzindo o custo de produção e sempre melhorando a qualidade do produto.

Os polímeros têm uma larga utilização na fabricação de embalagens em função do baixo custo e propriedades mecânicas adequadas. Para obter-se melhores propriedades versus menor custo de produção, destacam-se as possibilidades de alterações na formulação de filmes flexíveis que, contribuem para um melhor desempenho no processo e maior rentabilidade para a indústria, originando um produto que se adeque as exigências do mercado consumidor (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

Portanto, torna-se essencial o conhecimento das propriedades de cada polímero utilizado no desenvolvimento de filmes flexíveis, para a definição do melhor tipo de matéria-prima na geração de um determinado produto (embalagem) e essas informações são cruciais para melhor aplicação dos materiais poliméricos na crescente demanda das embalagens plásticas flexíveis.

As indústrias de embalagens flexíveis estão em constante busca de produtos que atendam o mercado consumidor com melhores propriedades, menor custo, menor impacto ambiental e que possam se destacar da concorrência. Com esse objetivo, este trabalho estuda quais propriedades mecânicas do filme de polietileno (PE) serão influenciadas pela alteração da formulação padrão com um percentual fixo de diferentes resinas de PEBDL nas camadas “A” e “E” na extrusora balão, em uma empresa de plástico localizada no Sul de Santa Catarina.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POLÍMEROS - UM BREVE CONCEITO

Polímero pode ser um material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha variedades estruturais repetitivas e um alto peso molecular, sendo que normalmente esta unidade que se repete é de baixo peso molecular. A palavra polímero vem do grego poli, cujo significado é “muito”, e de mero, que quer dizer “parte” ou “unidade” (que se repete). Para formarem um polímero, os meros são ligados entre si através de ligações primárias estáveis (MANRICH, 2005).

Plásticos são polímeros orgânicos de grande massa molecular, são sintetizados a partir do gás natural ou petróleo e até mesmo de derivados de compostos naturais que são obtidos de fontes renováveis. Os polímeros podem ser moldados de várias formas com auxílio de calor e pressão, onde são denominados como termoplásticos. São macromoléculas com estrutura formada pela repetição de unidades básicas, chamadas de monômeros, que são ligadas entre si (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

As aplicações e propriedades de um polímero dependem da sua natureza física e química, a qual é determinada pela estrutura química dos monômeros, pelo arranjo e massa molecular de cadeias poliméricas e pelo nível e formas de interação entre as macromoléculas. Esses fatores determinam a temperatura de transição física do polímero, a densidade e também o seu grau de cristalinidade (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

Um polímero pode ter cadeias com diferentes tamanhos ou pesos moleculares, podendo, algumas delas, serem muito pequenas e outras médias ou grandes, por isso é prática comum à caracterização do peso molecular médio de um polímero (MANRICH, 2005).

A estrutura química e molecular dos polímeros pode apresentar macromoléculas lineares ou ramificadas. Nas lineares, a cadeia é formada por uma sequência de ligações covalentes entre os monômeros e sem desvios na cadeia principal. Nas estruturas ramificadas, há derivações laterais da cadeia principal que podem variar quanto ao comprimento e à ocorrência ou não de derivações secundárias, bem como diferir ou não a cadeia principal em relação às características constitucionais (natureza química do (s) monômero (s)) ou configuracionais (arranjo molecular). Nestes dois casos, ocorre à interação entre as macromoléculas por meio de forças físico-químicas fracas, denominadas forças de Van der Waals. Em alguns casos ocorre também atração iônica, o que permite o processamento e a moldagem sucessiva por aplicação de calor, característica de polímeros termoplásticos (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

Neste trabalho os polímeros estudados serão os polietilenos (PE) e polietilenos de baixa densidade linear (PEBDL), onde são utilizados na extrusão de embalagens flexíveis para setor alimentício na linha de cereais, café, refrescos, ração animal, fraldas descartáveis e absorventes, artigos farmacêuticos e hospitalares e embalagens agrícolas.

2.1.1 Polietilenos - PE

Os polímeros de etileno, conhecido como polietilenos apresentam estrutura básica $(-\text{CH}_2-)_n$ e podem ser lineares ou ramificados, homopolímeros ou copolímeros. Para os copolímeros, os seguintes comonômero podem ser um alceno (propeno, buteno, hexeno ou octeno) ou um composto com um grupo funcional polar. Os PE apresentam cadeias laterais em maiores ou menor quantidade. Quando menor o grau de ramificações das cadeias poliméricas, maior a cristalinidade, assim, maior a densidade. O grau, o comprimento e quantidade de ramificação são influenciados pelo processo de polimerização e do comonômero utilizado (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

No resfriamento da resina, o polietileno tende a formar regiões cristalinas, porém essa cristalização não é completa, ocorrendo a formação de cristais imperfeitos, contornado pelo restante de material que se solidifica no estado amorfo. Essa fase cristalina apresenta maior densidade e caracteriza a resistência mecânica do material, já a região amorfa contribui para a flexibilidade, elasticidade e maciez do material. A propriedades ideais do *grade* de PE para cada aplicação específica dependem do balanço adequado dessas características (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

2.1.2 Polietileno linear de baixa densidade (PEBDL)

O polietileno linear de baixa densidade (PEBDL) possuem densidade entre 0,916 a 0,940 g/cm³, são copolímeros lineares formados por etileno e uma α -olefina (1-buteno (C4), 1-hexano (C6) ou 1-octeno (C8)). Essa resina tem melhor resistência ao fissuramento sob tensão e maior resistência ao impacto. O comonômero determina o comprimento da ramificação lateral, portanto os PEBDLs de octeno e hexeno superam os copolímeros de buteno em resistência à perfuração e ao rasgo, pois possui ramificações mais longas permitem um maior entrelaçamento entre as cadeias (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

2.2 EXTRUSORA BALÃO

No processo de extrusora balão (tubular) o material é extrudado verticalmente por meio de uma matriz com a forma de um anel, onde um jato de ar soprado constantemente expande o material formando um balão. Roletes localizados acima da matriz achatam o filme, que posteriormente é bobinado. A largura e a espessura do filme dependem da regulagem da velocidade da extrusora e do tamanho do balão, que são controlados na matriz (MANRICH, 2005).

Para os polietilenos, utiliza-se o processo de extrusão ascendente: o filme saí da extrusora que está embaixo, é resfriado com ar e segue para os roletes que estão em cima. Os roletes tracionam, achatam e eliminam as bolhas de ar do filme, sendo que o rolete fixo é produzido em aço, enquanto o móvel é emborrachado com o propósito de diminuir o atrito (HARPER; PETRIE, 2003).

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS POLÍMEROS

Podemos dizer que o material tem uma propriedade mecânica quando ele é submetido a esforços desta natureza. Essas propriedades determinam a maior ou menor capacidade que o material tem para transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados. Essa capacidade é necessária não só durante o processo de fabricação, mas também durante sua utilização. A resistência mecânica permite que o material seja capaz de resistir à ação de determinados tipos de esforços, como a resistência à tração, por exemplo (SOUZA, 2014).

Segundo Manrich, (2005, p. 53).

O comportamento de deformação mecânica dos polímeros está fundamentado na viscoelasticidade desses materiais. O termo viscoelasticidade está associado à resposta elástica e viscosa, simultânea ou não, apresentada pelos polímeros.

Podemos dizer que a deformação de um polímero também está associada ao seu mecanismo de fratura, que além de estar apoiado na teoria da viscoelasticidade, depende da propagação de trincas, bem como está associado ao poder de absorver ou não a energia fornecida ao sistema (SOUZA, 2014).

2.3.1 Módulo de elasticidade ou módulo de Young

O módulo de elasticidade (E) consiste no afastamento dos átomos de suas posições de equilíbrio, com intensidade proporcional à força aplicada. A aplicação de uma força resulta no aparecimento de uma deformação no material, a qual pode ser elástica, plástica ou uma combinação de ambas. O módulo de elasticidade assume ser uma propriedade física intrínseca a cada material em si. Entretanto, para a classe dos polímeros não se pode afirmar o mesmo. Variações no processamento, na temperatura, nos esforços aplicados, no tempo de aplicação e na umidade do ar podem afetar muito o resultado dessa classe (SOUZA; ALMEIDA, 2015).

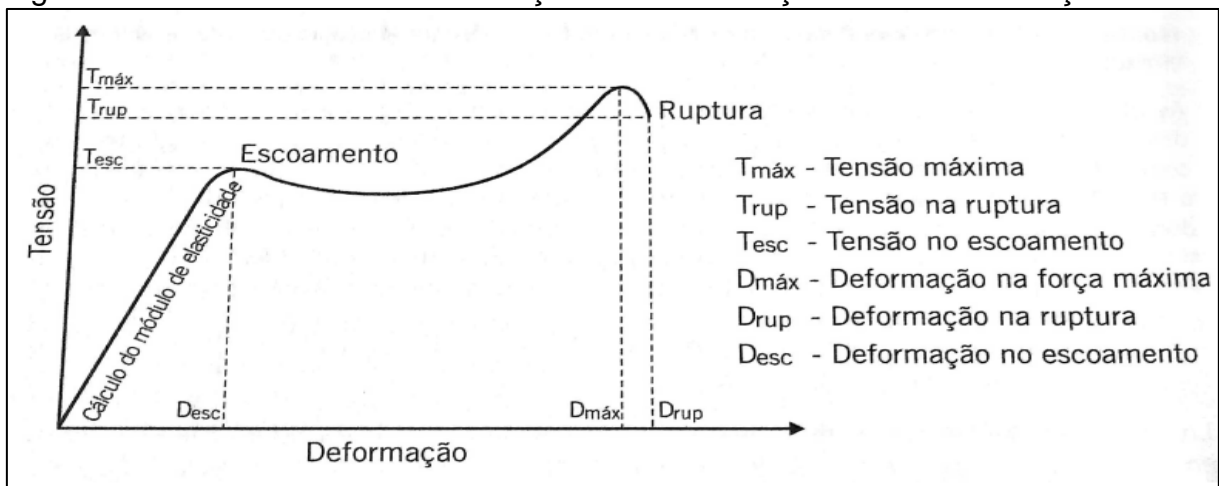
As propriedades de tração são úteis para a identificação e caracterização de filmes flexíveis, com aplicação no desenvolvimento, na especificação e na avaliação de qualidade destes materiais. As propriedades de tração expressam a resistência do material à deformação por alongamento ou quando submetido à tração (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

Segundo Sarantopoulos; Teixeira, (2017. p. 249).

A medição das propriedades de tração envolve a separação, a uma velocidade constante, de duas garras que prendem as extremidades de um corpo de prova, registrando-se ao longo do ensaio a força ou a resistência (tensão) que o material oferece à deformação ou alongamento.

Na Fig.1 apresentamos uma curva característica da relação tensão de tração versus deformação de filmes.

Figura 1: Curva característica da relação tensão de tração *versus* deformação.



Fonte: Sarantopoulos; Teixeira (2017)

A deformação é o alongamento relativo do corpo de prova em relação ao seu comprimento inicial. Inicialmente um material polimérico oferece resistência crescente e constante à solicitação de tração, a qual provoca o seu comportamento elástico (alongamento). Próximo ao ponto de escoamento o aumento de resistência passa a ser menor para um mesmo aumento de deformação, assim é possível alongar o filme sem que este necessariamente responda com um aumento de resistência. Continuando o alongamento, o material resiste até que ocorre a sua ruptura (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

O comportamento em tração para os polímeros é praticamente influenciado por seis fatores:

1. Estrutura do monômero e conseqüente ligação secundária;
2. Flexibilidade das moléculas;
3. Massa molar;
4. Ligações cruzadas;
5. Cristalinidade e orientação;
6. Temperatura.

Para realizar a determinação do módulo de elasticidade, deve-se traçar uma tangente à curva tensão de tração versus deformação na região linear inicial e escolher qualquer ponto dessa tangente para calcular a razão entre a tensão e a deformação. O módulo de elasticidade é um indicador de rigidez do filme sendo que, quanto maior o módulo, mais rígido é o material. O ensaio do módulo de elasticidade deve ser realizado em corpos de prova com mesmas dimensões e espessura iguais, o resultado é expresso em MPa ou N/m^2 ou também em Kgf/mm^2 (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

Quando é impossível determinar exatamente a região elástica da curva tensão de tração versus deformação, é utilizado um ponto específico de alongamento, desde que localizado bem antes do ponto de escoamento, para qual é determinada a relação entre a tensão de tração e a deformação, conhecida como módulo secante. O módulo secante é expresso também em MPa ou N/m^2 ou em Kgf/mm^2 , sempre fazendo referência ao ponto de alongamento considerado, ele também é um indicador da rigidez do filme analisado (*id ibid.*).

2.3.2 Resistência à Perfuração

A resistência à perfuração é um padrão de qualidade para materiais que possuem alguma saliência que possam danificar a embalagem durante a distribuição e o acondicionamento, como exemplo produtos com osso, ração animal e alimentos congelados. A resistência a perfuração é determinada pelos materiais presentes na estrutura, da espessura de cada um deles, do módulo de elasticidade, do grau e da presença de orientação, da taxa de penetração (velocidade do ensaio) e do formato da ponteira (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017)

2.3.3. Resistência da Termossoldagem à Tração – Selagem a Frio

Para Sarantopoulos; Teixeira (2017), uma das mais importantes propriedades dos materiais utilizados em embalagens flexíveis é a capacidade de termossoldar, que é fundamental para a integridade da embalagem e preservação da qualidade do produto. A termossoldagem é o processo pelo qual dois materiais, com pelo menos uma camada de termoplástico na interface, são unidos pela ação combinada de calor e pressão durante um determinado tempo. À medida que as camadas selantes se fundem, aumenta o contato entre elas. Dado tempo suficiente, as moléculas se difundem através da interface, se entrelaçam e a resistência da termossoldagem aumenta.

Figura 2: Termosseladora de laboratório



Fonte: do autor (2020)

Portanto, a seleção do método de termossoldagem vai depender fundamentalmente do tipo de embalagem, da estrutura do material e do produto acondicionado. Este ensaio de selagem dinâmico é quantitativo e mede a força necessária para separar as duas camadas termossoldadas.

O ensaio de Selagem a frio é realizado em uma termosseladora de laboratório (Fig. 2), e para obtermos uma melhor definição das condições de selagem, devemos considerar: tempo de selagem, pressão de selagem e faixa de temperatura. Na termossoldagem por barra aquecida são utilizados uma barra aquecida, a qual é mantida a uma temperatura constante durante todo o ciclo de termossoldagem e barra com uma borracha embutida, resistente à temperatura, o que permite maior homogeneidade de pressão no decorrer da superfície termossoldada. Quando as barras são pressionadas sobre o material, o calor é transferido por condução através do filme até a camada termosselante, promovendo a fusão. As superfícies a serem termossoldadas devem ser posicionadas uma com a outra, na mesma direção e, por fim, posicionadas na termosseladora (*id ibid.*).

2.3.4 Curva de Selagem

As curvas de selagem de filmes flexíveis são geradas a partir da determinação da resistência da termossoldagem à tração de corpos de prova termossoldados em diferentes temperaturas, com pressão e tempo constantes. As curvas de selagem, permitem a comparação de diferentes materiais quanto às características de termosselabilidade ou otimização dos parâmetros de selagem de um material, a fim de se obter o melhor desempenho. O intervalo definido de temperatura para o levantamento da curva de selagem compreende uma faixa de temperatura aplicável a um determinado material e processo. É importante conhecer as possíveis variações de temperatura da termosseladora e características de fusão do material a ser termossoldado (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

2.3.5 Hot Tack – Resistência da Termossoldagem à Tração

A resistência da termossoldagem ainda quente após a operação de soldagem e antes que a mesma atinja a temperatura ambiente, é chamada de *Hot Tack* e é avaliada por meio de uma curva gerada a partir da resistência da

termossoldagem a quente de corpos de provas termosselados em diferentes condições de temperatura. A avaliação da resistência da termossoldagem a quente permite a seleção de materiais que proporcione maior resistência à embalagem e aumentem a eficácia do processo. O *hot tack* é inferior à resistência da termossoldagem a tração (após o resfriamento), uma vez que a máxima resistência é obtida após a total solidificação do material, o que ocorre somente quando o mesmo atinge a temperatura ambiente (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

Para determinação do ensaio de *hot tack* necessita-se de um equipamento específico que promova a termossoldagem do filme flexível e, imediatamente, determine sua resistência, quando ainda quente, em um tempo preciso após a conclusão de um ciclo de selagem.

O equipamento utilizado para a determinação do *hot tack* é similar a uma termosseladora de laboratório, somente apresenta um acessório para determinação da resistência da termossoldagem logo após a sua formação. Esse equipamento contém dois mordentes de selagem, controle preciso da temperatura, tempo e pressão da solda, controle de velocidade de separação das garras de fixação dos corpos de prova, ativação automática da liberação do corpo de prova e tração do mesmo quando o mordente se abre, sistema de medida de força necessária para a abertura da termossoldagem e display que indique os resultados. No decorrer deste trabalho serão descritas as condições de teste e preparação dos corpos de prova, faixa de temperatura, tempo e pressão de selagem do ensaio realizado. A Fig. 3 apresentamos a ilustração do equipamento utilizado para realização do ensaio.

Figura 3: Equipamento de ensaio *Hot Tack*.



Fonte: do autor (2020)

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste item são apresentados os materiais e métodos utilizados para a execução do procedimento experimental deste trabalho.

Realizou-se testes industriais nos materiais estudados, onde extrusou os filmes de polietileno (PE) a partir da alteração da formulação padrão com a adição de diferentes resinas de PEBDL. Essas alterações consistem em um percentual fixo de resina de PEBDL nas camadas “A” e “E”, em filmes de mesma espessura conforme descritos a seguir:

Teste 1 - Filme com resina PEBDL de copolímero de octeno (formulação padrão);

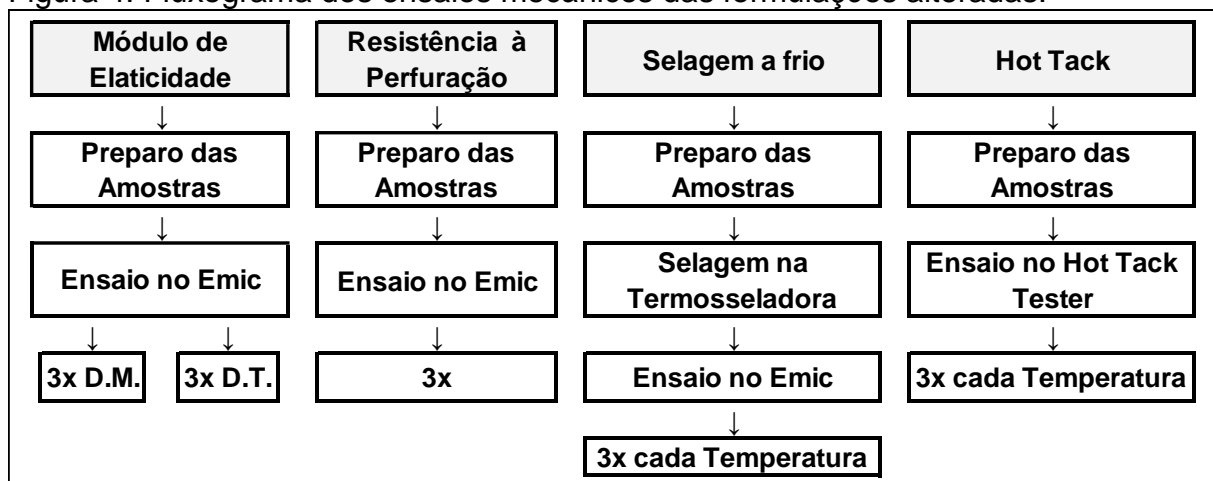
Teste 2 - Filme com resina PEBDL de copolímero de octeno metaloceno;

Teste 3 - Filme com resina PEBDL de copolímero de hexeno metaloceno;

Teste 4 - Filme com resina PEBDL de copolímero de hexeno metaloceno (contratipo).

Na Fig.4 o fluxograma descreve os ensaios mecânicos que foram realizados para cada formulação alterada:

Figura 4: Fluxograma dos ensaios mecânicos das formulações alteradas.



Fonte: do autor (2020)

Como apresentado no fluxograma, foi realizado os ensaios (3x) três vezes para cada amostra e para o módulo de elasticidade foi realizado três vezes na direção da máquina (D.M.) e três vezes na direção transversal (D.T.).

3.1 ENSAIOS MECÂNICOS E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a produção dos filmes, as amostras foram coletadas e encaminhadas para o laboratório do controle de qualidade, onde foi realizado os testes mecânicos. Dentre estes ensaios mecânicos encontram-se: resistência a perfuração, módulo de elasticidade, resistência da termossoldagem à tração (selagem a frio) e *hot tack* (selagem a quente). Esses testes seguem as instruções de trabalho da empresa que foram escritas e elaboradas a partir de normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*). As amostras foram acondicionadas em temperatura ambiente controlada a 23 °C +/- 2 °C e umidade relativa de 50 +/- 5%. Após o término dos ensaios, os resultados obtidos serão analisados.

3.2 EQUIPAMENTO UNIVERSAL DE ENSAIOS MECÂNICOS – EMIC

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios nos filmes foi o EMIC, modelo DL 200 MF conforme Fig. 5, que se destina a realização de ensaios mecânicos envolvendo força de até 2000 N (200 kgf) em ambos os sentidos (D.M. e D.T.) e sua faixa de velocidade é entre 0,02 a 1000 mm/min (EMIC,2014).

Figura 5: EMIC



Fonte: do autor (2020)

3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE OU MÓDULO DE YOUNG

O ensaio de módulo de elasticidade ou módulo de Young é baseado na norma ASTM D 882-12 (2012 apud SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017). A fixação

do corpo de prova no equipamento foi realizada por meio de garras apropriadas, distanciadas de 250 mm. O módulo de elasticidade é identificado com velocidade constante de 25 mm/min.

Os corpos de prova são retangulares, com largura de 25,4 mm e comprimento de 300 mm. O ensaio foi realizado em 3 corpos de prova na direção de máquina (D.M.) e direção transversal (D.T.) e os mesmos foram posicionados no equipamento universal de ensaios mecânicos EMIC conforme mostra a Fig.6.

Figura 6: Corpo de prova posicionado para análise de módulo de elasticidade.

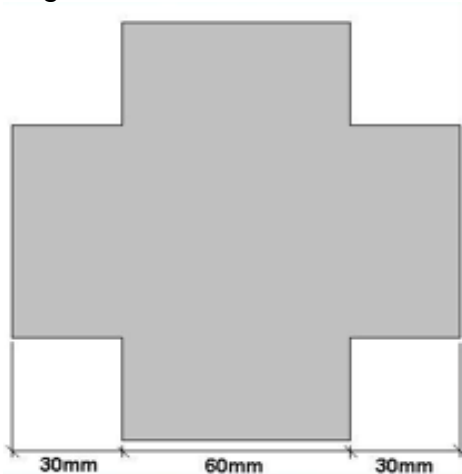


Fonte: do autor (2020)

3.4 RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO

Este ensaio foi baseado na norma ASTM F1306 (2016, apud SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017), a resistência à perfuração foi determinada no EMIC, com célula de carga operando a compressão. Os corpos de prova são cortados conforme Fig. 7 e são fixados na estrutura conforme Fig. 8, na qual permite a exposição de amostra de 35mm e livre deslocamento da ponteira. A perfuração foi realizada com uma ponteira metálica de ponta esférica, a velocidade 25mm/min. A ponteira foi posicionada sobre o centro do corpo de prova, o mais próximo quanto possível. O ensaio se encerrou na primeira evidência de perfuração.

Figura 7: Modelo de corte.



Fonte: do autor (2020)

Figura 8: Estrutura de fixação da amostra.



Fonte: Sarantopoulos; Teixeira (2017)

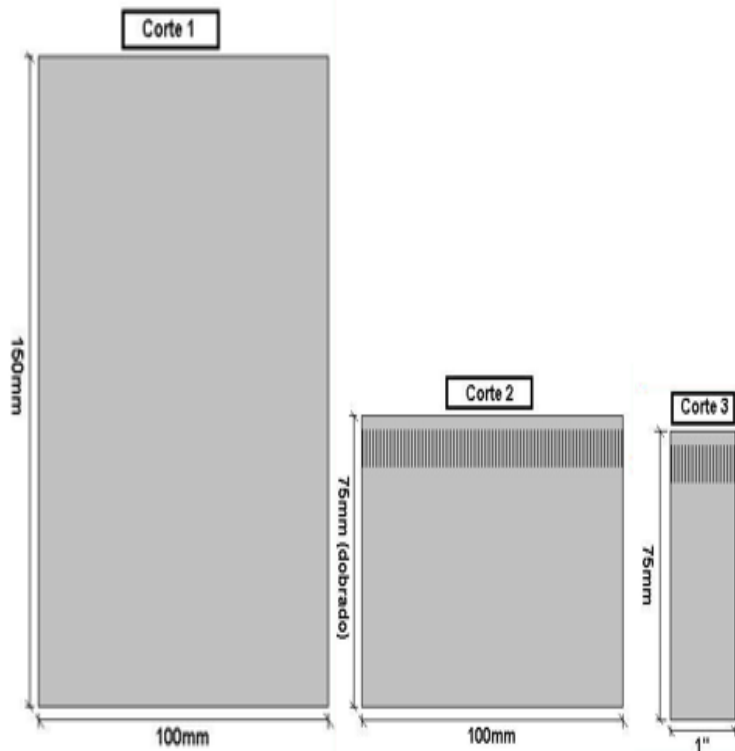
3.5 RESISTÊNCIA DA TERMOSSOLDAGEM À TRAÇÃO – SELAGEM A FRIO

O ensaio de resistência da termossoldagem à tração é baseado na norma ASTM F88/F88M, (2015 apud SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017). Antes de realizar a selagem do material na termosseladora, foi verificado o tratamento corona do material, pois a selagem foi feita do lado não tratado do filme, para auxiliar na medição foi utilizada a caneta de medição de tratamento corona. Após identificação do lado não tratado, dobrou-se a amostra no meio certificando-se que no interior ficará com lado não tratado e posteriormente realizou-se a selagem, seguindo sempre o sentido (D.M.) do material. O material foi selado em faixa de temperatura de 6 em 6°C, até o filme queimar.

Após termossoldado o material descansou por 24 horas. Em seguida cortou-se a amostra em 3 corpos de provas com dimensões de 25 mm (1") de largura e 75 mm de comprimento, as garras do equipamento universal de ensaios foram ajustadas com distância de 50 mm. A velocidade constante de ensaio ocorre a 200 mm/min e 300 mm/min até o total rompimento da termossoldagem.

Na Fig. 9 apresenta as etapas de preparo/corte das amostras. O corte 1 (150mmx 100mm), corte 2 onde aparece dobrado ao meio e por último corte 3, o corpo de prova para ensaio no EMIC da resistência da termossoldagem à tração. E na Fig. 10 o corpo de prova posicionado na máquina universal de ensaios para análise.

Figura 9: Etapas de preparo/corte das amostras



Fonte: do autor (2020)

Figura 10: Corpo de prova posicionado no EMIC.



Fonte: do autor (2020)

3.6 HOT TACK – RESISTÊNCIA DA TERMOSSOLDAGEM À TRAÇÃO

Este ensaio foi realizado na máquina *HT-1SX Hot Tack Tester* (Fig. 3), baseado na norma ASTM F1921/F1921M (2012, apud SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017), foram utilizados 3 corpos de prova com linha de solda paralela à direção de fabricação do filme (D.M.) para cada temperatura de selagem.

Os corpos de prova são retangulares, com largura de 25,4 mm e comprimento de 320 mm. Segundo a norma os intervalos de temperatura podem ser de 5 ou 10°C, tempo de selagem de 1,0 s para mordentes de selagem não recobertos com material antiaderente e a pressão 44 psi.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

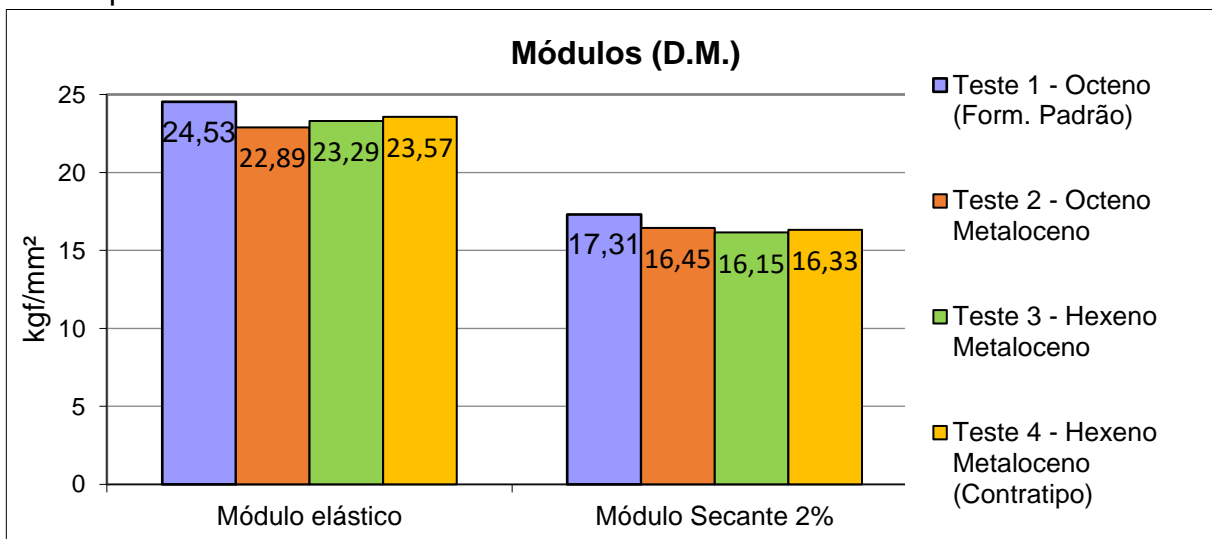
Os resultados dos ensaios realizados neste trabalho são apresentados nesta seção onde, estão organizados em gráficos quantitativos.

4.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Fig. 11, está apresentado o gráfico referente ao comparativo do módulo de elasticidade e módulo secante 2% na direção de máquina dos testes 1, 2, 3 e 4. Conforme a literatura o módulo de elasticidade é um indicador da rigidez do material, portanto, quanto maior o módulo de elasticidade mais rígido será o material.

Podemos observar uma pequena variação de valores entre as formulações. Para o módulo de elasticidade, podemos observar uma maior variação entre os testes 1 de 24,53 Kgf/mm², e o teste 2 de 22,89 Kgf/mm². Os valores obtidos para o módulo secante 2% resultaram em uma variação de 17,31 Kgf/mm² para teste 1 e 16,15 Kgf/mm² para o teste 3. Como podemos perceber, os filmes apresentaram resultados semelhantes, portanto, podemos concluir que para estes ensaios, com as alterações nas formulações não obtivemos influência significativa quanto a rigidez dos filmes estudados.

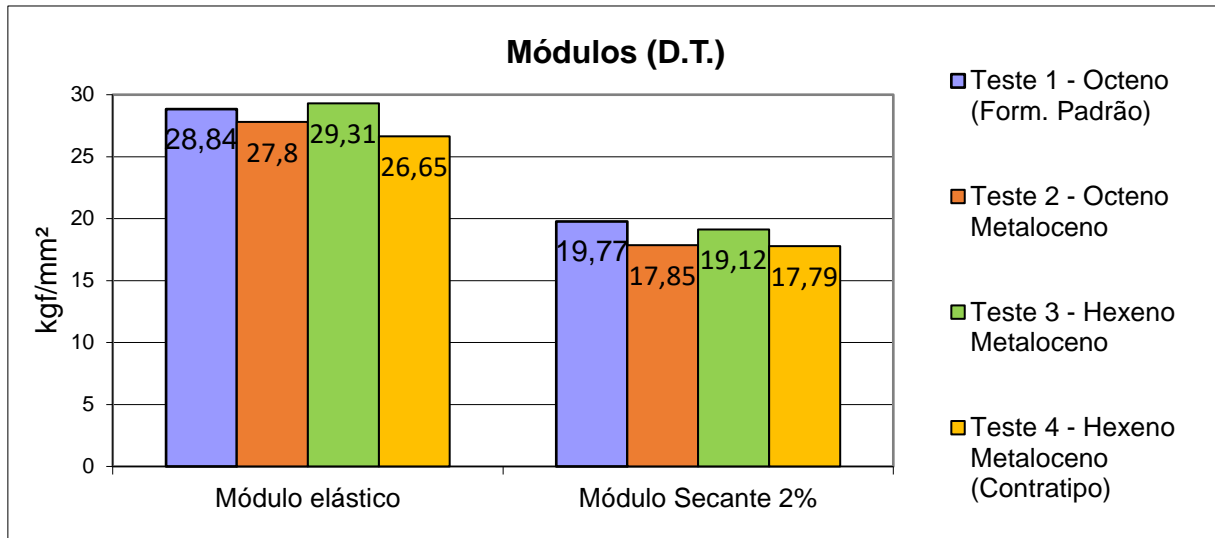
Figura 11: Resultado dos ensaios de módulo elástico e módulo secante 2% na Direção de Máquina.



Fonte: do autor (2020)

Na figura 12, está apresentado o comparativo do módulo elástico e módulo secante 2% agora na direção transversal dos filmes produzidos. Com a análise dos resultados, podemos perceber que a variação do módulo da direção transversal da máquina também apresentou pequena variação entre os testes o que comprova a pequena diferença de rigidez entre os testes.

Figura 12: Resultado dos ensaios de módulo elástico e módulo secante 2% na Direção Transversal.

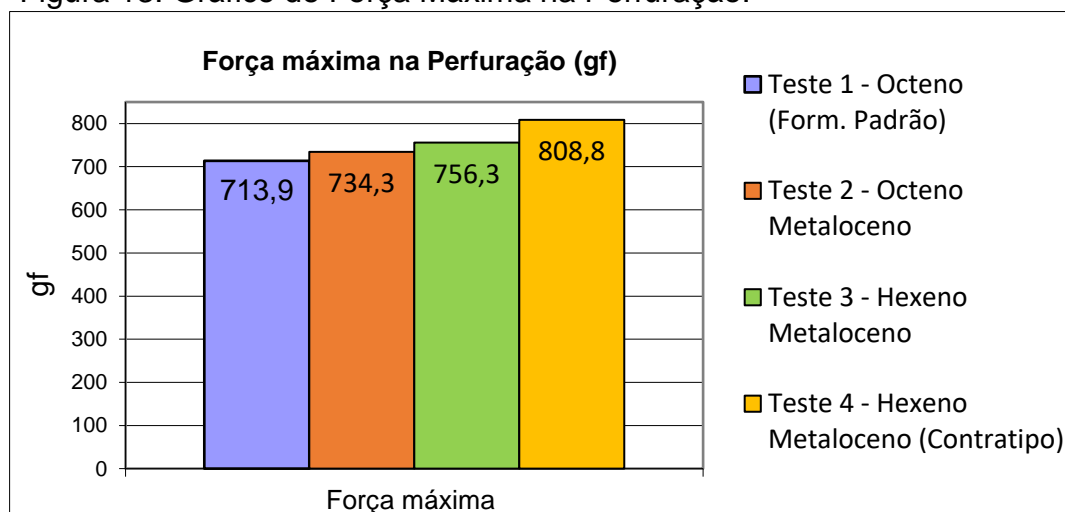


Fonte: do autor (2020)

4.2 RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO

Na Fig.13, temos o comparativo da força máxima na perfuração entre os testes. Segundo a literatura a força máxima na perfuração indica o quanto de força em gf, pode danificar/perfurar a embalagem durante a distribuição e o acondicionamento.

Figura 13: Gráfico de Força Máxima na Perfuração.



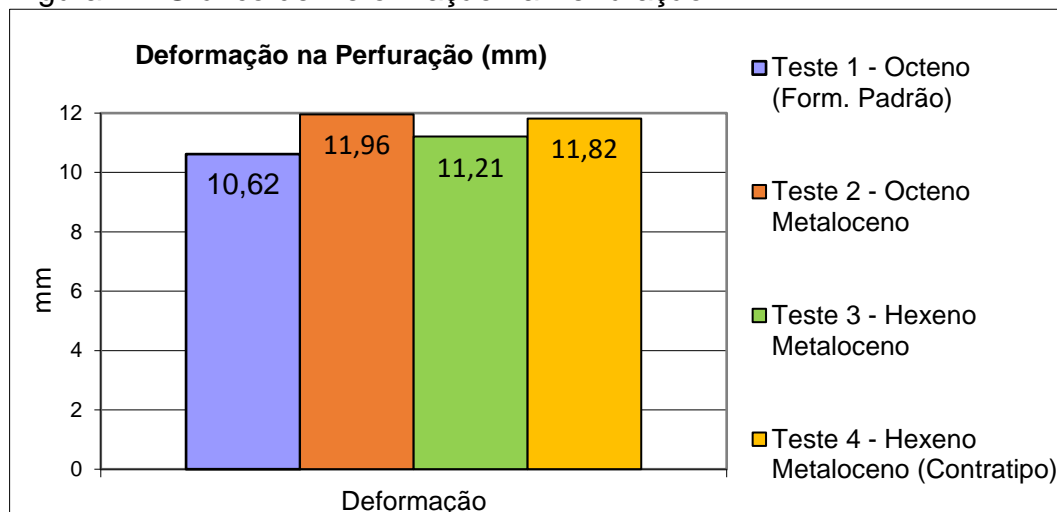
Fonte: do autor (2020)

Observamos que no teste 4, o filme com Copolímero de Hexeno Metaloceno (Contratipo) apresentou um resultado maior para força máxima na

perfuração (808,9 gf), identificando ser o teste mais resistente a perfuração durante as etapas de distribuição e armazenamento destas embalagens. Já o teste 1, identificado neste estudo como padrão, obteve o menor resultado (713,9 gf) para este ensaio, sendo o menos resistente a perfuração.

A Fig.14, apresenta o comparativo entre os testes no ensaio de deformação na perfuração.

Figura 14: Gráfico de Deformação na Perfuração.



Fonte: do autor (2020)

Pode-se observar que os resultados entre todos os testes foram similares, apresentando uma maior deformação da perfuração no teste 2 (11,96 mm) e uma menor deformação na perfuração no teste 1 (10,62 mm). Para os ensaios de resistência a perfuração devemos observar tanto a força máxima de perfuração (já analisada anteriormente) quanto a deformação. Portanto, relacionando a força de perfuração dos testes (Fig 13.) com a deformação na perfuração, podemos concluir que “teste 4” apresentou uma pequena superioridade, com 808,8 gf de força máxima na perfuração e 11,82 mm de deformação na perfuração.

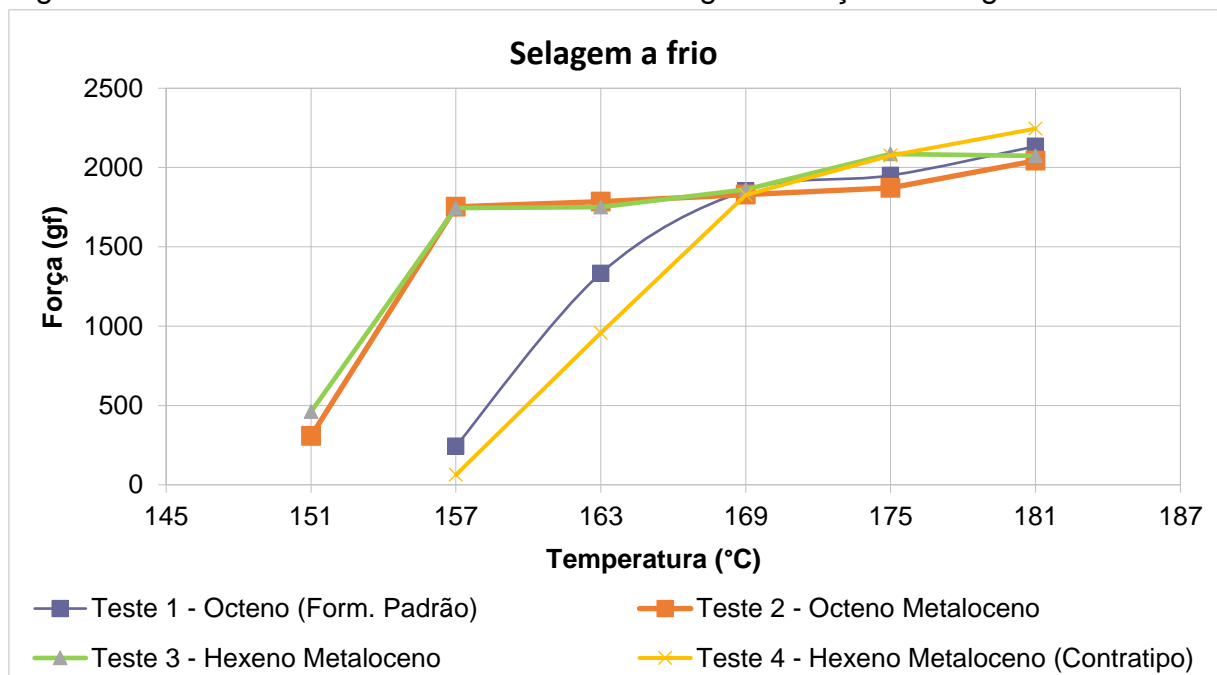
4.3 RESISTÊNCIA DA TERMOSSOLDAGEM À TRAÇÃO – SELAGEM A FRIO

A figura 15, apresenta os resultados comparativo entre os testes 1, 2, 3 e 4 quanto a resistência da termossoldagem à tração – selagem a frio. As curvas de selagem, permitem a comparação de diferentes materiais quanto às características

de termosselabilidade ou otimização dos parâmetros de selagem de um material, a fim de se obter o melhor desempenho.

Nota-se que no início das curvas de selagem na temperatura de 157°C dos testes 2 e 3, o filme com copolímero de Octeno Metaloceno e Hexeno Metaloceno respectivamente, apresentaram menor temperatura inicial com força melhor de selagem de aproximadamente 1750gf, assim tendo um range de temperatura maior, com diferença de 12°C comparado com teste 1 e 4, na qual ganha em velocidade no processo de empacotamento, melhorando a produtividade. Analisando a temperatura de 163°C, teste 4 - filme com copolímero de Hexeno Metaloceno (Contratipo), tem uma força de selagem inferior aos demais, porém a partir da temperatura de 169°C, todos os testes apresentam uma faixa de força de selagem semelhantes, na qual é fundamental para a integridade da embalagem e preservação da qualidade do produto

Figura 15: Gráfico de resistência da termossoldagem à tração – selagem a frio.



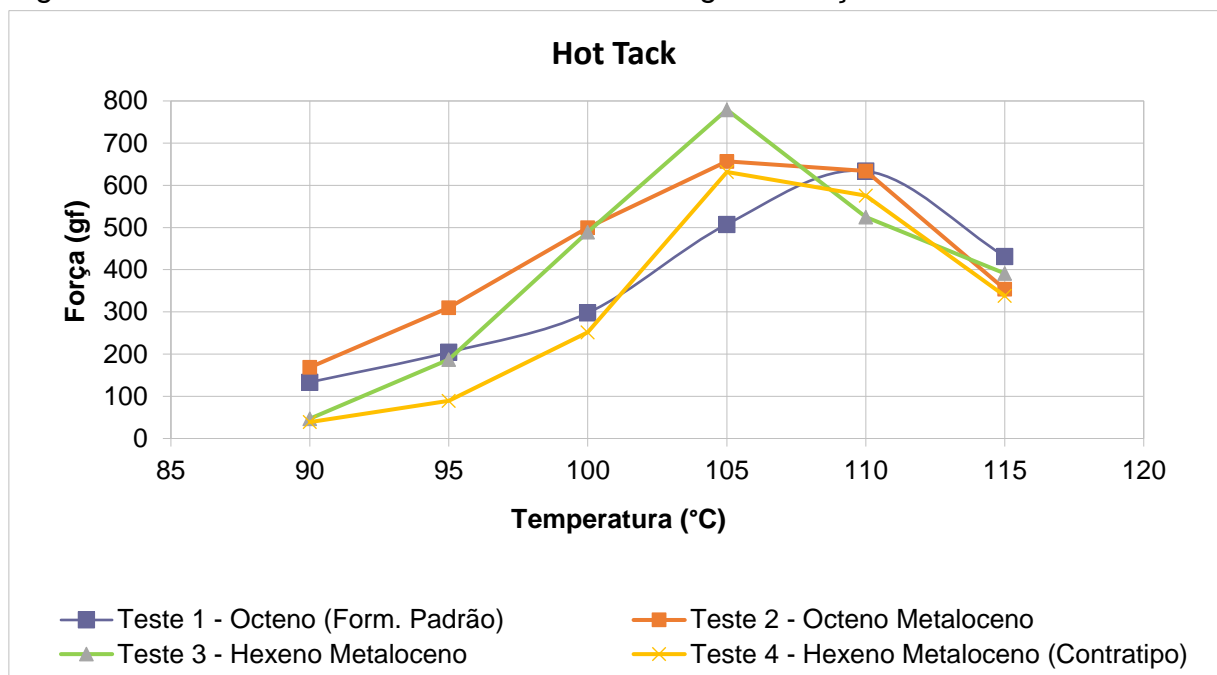
Fonte: do autor (2020)

4.4 RESISTÊNCIA DA TERMOSSOLDAGEM À TRAÇÃO - *HOT TACK*

Na Fig.16, podemos perceber o comparativo da resistência da termossoldagem à tração – *Hot Tack*, entre os testes estudados. A avaliação da resistência da termossoldagem a quente permite a seleção de materiais que proporcione maior resistência à embalagem e aumentem a eficácia do processo.

Analisando as curvas dos testes para este ensaio, pode-se perceber que o teste 3 com Hexeno Metaloceno apresentou uma maior força de selagem (780gf) a 105°C, comparado aos demais. Na temperatura de 110°C as forças de selagem são próximas e as curvas de selagem são similares, o que é considerada normal para ensaios de *Hot Tack*, portanto não houve diferença expressiva nas forças medidas nesta temperatura, que possa interferir na resistência à embalagem e a eficácia do processo.

Figura 16: Gráfico de resistência da termossoldagem à tração – *hot tack*



Fonte: do autor (2020)

4.5 ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA

Para analisar a viabilidade financeira entre os testes 1, 2, 3, e 4, fator esse de extrema importância para definição do melhor custo benefício, pois, as industriais precisam ser competitivas dentro do mercado de embalagens flexíveis buscando sempre produtos de qualidade com o menor custo.

Realizou-se o levantamento de custo por meio do percentual de variação de valor em reais de cada formulação, tendo como ponto de referência teste1-formulação padrão, conforme Tab.1.

Tabela 1: Percentual de variação das formulações:

| Formulação | % de Variação (R\$) |
|------------------------------------------|----------------------------|
| Teste 1 - Octeno (Formulação Padrão) | 0 |
| Teste 2 - Octeno Metaloceno | 1,40% |
| Teste 3 - Hexeno Metaloceno | 0,20% |
| Teste 4 - Hexeno Metaloceno (Contratipo) | -0,80% |

Fonte: do autor (2020)

Em relação a viabilidade econômica o teste 4 tem uma diferença de -0,80% comparado ao teste 1, tornando uma formulação mais viável, ou seja, diminuiu o seu valor em relação ao padrão em 0,8%. E o teste 2 obteve uma variação do seu valor em 1,40%, portanto, resultando em um filme mais caro que o padrão.

5 CONCLUSÃO

Por meio desse trabalho de conclusão de curso foi possível realizar um estudo comparativo das principais propriedades mecânicas para filmes flexíveis em quatro diferentes resinas de PEBDL, a qual notou-se grande semelhanças das propriedades mecânicas entre elas.

Podemos destacar neste estudo, uma característica importante observada para as formulações dos Teste 2 - Octeno Metaloceno e Teste 3 - Hexeno Metaloceno, na qual apresentaram uma temperatura mais baixa com melhor força de selagem e range maior de temperatura, comparando com os testes 1 e 4, característica essa que pode ser apresentada a clientes que necessitem em seu processo de uma velocidade de empacotamento otimizada, com ganho de velocidade. Vale ressaltar comparando viabilidade econômica dos testes 2 e 3, que o teste 3 tem um custo mais acessível, que equivale 1,20% menor em valor em relação ao teste 2.

O teste 4 – Hexeno Metaloceno (Contratipo) apresentou melhor rentabilidade econômica comparado a formulação padrão (teste 1 - Octeno), nota-se uma diferença de 0,8% de valor. Com isso abre-se um leque para negociação no disputado mercado das embalagens flexíveis, com um produto com menor custo, mas em contrapartida com qualidade semelhante as outras formulações.

Como os testes 2,3 e 4 apresentaram resultados semelhantes ao teste 1 – formulação padrão, foram aprovados e assim temos um número maior de matérias-primas (resinas PEBDL) disponíveis para utilização na produção das embalagens flexíveis, sem comprometer de forma negativa as propriedades mecânicas dos filmes.

REFERÊNCIAS

Embalagens: design, materiais, processos, máquinas e sustentabilidade (coordenação geral Assunta Napolitano Camilo). – Barueri, SP: Instituto de Embalagens, 2011.

EMIC – Máquinas de apresentação da linha DL, informações preliminares. – São José dos Pinhais-PR: 1ª Ed. – fevereiro, 2014.

HARPER, Charles A.; PETRIE, Edward M. **Plastics Materials and Process: A Concise Encyclopedia**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

SARANTOPOULOS, Claire I. G. L.; TEIXEIRA, Fábio Gomes. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades**. 2.ed. – Campinas: ITAL/CETEA, 2017.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Fundamentos de ensaios mecânicos de materiais metálicos**. 5. Ed. – Bauru –SP: Editora Edgard Blücher, 2014.

SOUZA, Wander Burielo de.; ALMEIDA, Gustavo Spina Gaudencio de. **Engenharia dos polímeros: tipos de aditivos, propriedades e aplicações**. 1. ed. – São Paulo: Editora Érica, 2015.

SOUZA, Wander Burielo de.; ALMEIDA, Gustavo Spina Gaudencio de. **Processamento de polímeros por extrusão e injeção: conceitos, equipamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Érica, 2015.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar perseverança durante toda a minha vida. Meus Pais Paulo e Rosane e minha irmã Ketlem pelo incentivo. Meu namorado William por todo amor, compreensão e paciência. A Empresa GDM Plásticos, pela oportunidade de estar realizando esse estudo, meus colegas Fernanda, Andreza, Marília, Valmir,

Reinaldo e Patrícia. Minha professora orientadora Morgana e a UniSATC por todos conhecimentos.