



ENGENHARIA MECÂNICA

LAIS SANTANA MONTEIRO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS POLÍMEROS HDPE E
PVDF**

Itaperuna

2022

LAIS SANTANA MONTEIRO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS POLÍMEROS HDPE E
PVDF**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado como
requisito parcial para a
obtenção do título de
Bacharel em Engenharia
Mecânica ao Centro
Universitário Redentor.

Orientador: M.Sc. Daniel Passos Gallo
Coorientadora: Dr^a. Jéssica Guimaraes Hiller Ferreira

Itaperuna
2022

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: LAIS SANTANA MONTEIRO

Título: Estudo da resistência à tração dos polímeros HDPE e PVDF

Natureza: Trabalho de Conclusão de Curso

Objetivo: Título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Instituição: Centro Universitário Redentor

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Aprovada em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Dedicatória

*Dedico este trabalho a memória do
meu amado pai, Zedilson da Silva Monteiro.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo seu amor, por sua presença real em minha vida, por renovar minhas esperanças a cada novo dia e por me permitir realizar meus sonhos.

Agradeço ao meu pai, Zedilson (*in memorian*) e a minha mãe Maria José por terem me incentivado a estudar, por terem se privado de muitas coisas ao longo da vida para prover todos os recursos necessários à minha formação.

Agradeço ao meu irmão Adolfo e ao meu sobrinho Ícaro pelo amor incondicional e por trazerem leveza e alegria a minha caminhada.

A meu amado esposo Fernando, todo meu amor e gratidão, pelo suporte, pelas palavras de incentivo, pela paciência e resiliência para suportar as minhas ausências. Sobretudo por me encorajar a seguir adiante nos momentos mais difíceis da vida.

Agradeço as minhas tias e primos por me apoiarem e me ajudarem.

Agradeço a Cícero Rocha e a Moacir Rodrigues, por terem acreditado no meu potencial e por terem me dado a oportunidade de iniciar minha jornada profissional. Agradeço ainda, pelos os valiosos conselhos, que direcionaram de maneira decisiva a minha carreira.

Agradeço aos meus amigos Álison Silva e Victor Mello por toda ajuda na elaboração deste trabalho, por toda a parceria em minha caminhada profissional e por todo conhecimento compartilhado.

Por fim, toda minha gratidão aos meus orientadores Daniel Gallo e Jéssica Hiller, por sua contribuição e dedicação constante durante a elaboração deste trabalho.

EPÍGRAFE

*“Aqueles que semeiam entre lágrimas,
com cantos de alegria colherão.”*

(Salmo 126:5)

RESUMO

Os materiais poliméricos são vastamente utilizados na indústria, tanto para objetos e equipamentos do uso cotidiano quanto para fabricações complexas. Os polímeros são classificados em três grupos, são eles termorrígidos, termoplásticos e elastômeros. Cada um deles possui, características distintas no que tangem suas composições químicas e ligações moleculares. O HDPE (Polietileno de Alta Densidade) e o PVDF (Fluoreto de Polivinilideno), materiais estudados neste trabalho são termoplásticos bastante utilizado na manufatura de diversos produtos. Deste modo, conhecer seus respectivos comportamentos quando expostos a esforços mecânicos nos possibilita fazer a seleção correta do material para cada aplicação. Para este estudo foi feito uma revisão de literatura sobre os grupos de polímeros e das propriedades mecânicas comumente encontradas nestes materiais. A caracterização das propriedades mecânicas do material foi feita através de ensaios de tração realizados em laboratório e seus resultados foram evidenciados através de curva tensão-deformação. A partir das análises finais, foi possível concluir que os polímeros tiveram comportamentos mecânicos similares aos indicados nas literaturas de referência.

Palavras-chave: HDPE, PVDF, tensão-deformação.

ABSTRACT

Polymeric materials are widely used in industry, both for everyday objects and equipment and for complex fabrications. Polymers are classified into three groups, they are thermosets, thermoplastics and elastomers. Each of them has distinct characteristics regarding their chemical compositions and molecular bonds. HDPE (High Density Polyethylene) and PVDF (Polyvinylidene Fluoride), materials studied in this work, are thermoplastics widely used in the manufacture of several products. In this way, knowing their respective behavior when exposed to mechanical stress, allow us to make the correct selection of the material for each application. For this study, a literature review was carried out on the group of polymers, and the mechanical properties commonly found in theses materials. The characterization of mechanical properties of the material was carried out through tensile tests carried out in the laboratory and their results were evidenced through a stress-strain curve. From the final analyses, it was possible to conclude that polymers had similar mechanical behavior to those indicated in the reference literature.

Keywords: HDPE, PVDF, stress-strain

LISTA DE FIGURAS

Figura - 1 Estrutura das moléculas dos termoplásticos: (a) Linear; (b) Ramificadas. Fonte: GROOVER (2014).....	7
Figura 2 - Fenômeno da estricção. Fonte: PINHEIRO 2016	10
Figura 3 - Geometria de corpo de prova conforme norma ASTM D638. Fonte: ASTM (2014).....	13
Figura 4 - Esquema de corte plaina MPE120. Fonte: SETIC Gauder Group ...	14
Figura 5 – Aplainamento de amostra de HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	14
Figura 6 - Amostra aplainada de HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	14
Figura 7 - Amostra aplainada de PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)	15
Figura 8 - Prensa manual modelo: PAM3. Fonte: MM Indústria Mecânica Ltda.	15
Figura 9 - Dispositivo de corte conforme norma ASTM D638 tipo IV. Fonte: MM Indústria Mecânica Ltda.	16
Figura 10 - Geometria do dispositivo de corte conforme norma ASTM D638 tipo IV. Fonte: MM Indústria Mecânica Ltda.....	16
Figura 11 - Corpos de prova de HDPE estampados. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	16
Figura 12 - Corpos de prova de PVDF estampados. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	17
Figura 13 - Régua graduada de 300mm. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2021)....	17
Figura 14 - Micrômetro digital. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2021).	17
Figura 15 – Medição de espessura do HDPE. Fonte: Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	18
Figura 16 — Medição de espessura do PVDF. Fonte PRÓPRIO AUTOR (2022).	18
Figura 17 - Máquina Universal de tração. Fonte: Instron (2021).	19
Figura 18 - Ponte fixa e móvel da Máquina Universal de Tração. Fonte: Instron (2021).....	20
Figura 19 - Corpo de prova de HDPE fixado entre as garras da máquina de tração. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	20

Figura 20 - Propriedades mecânicas da curva tensão-deformação do HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	24
Figura 21 - Gráfico tensão-deformação HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	25
Figura 22 - Empescoçamento corpo de prova de HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)	25
Figura 23 - Variação de tensão na curva tensão-deformação do HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	26
Figura 24 - Região subsequente da área útil de teste. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	26
Figura 25 - Corpo de prova de HDPE após o rompimento. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).	27
Figura 26 - Propriedades mecânicas da curva tensão – deformação do PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	29
Figura 27 -Gráfico tensão - deformação PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	30
Figura 28 - Deformação plástica do corpo de prova de PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).	30
Figura 29 - Variação de tensão na curva tensão-deformação do PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões de corpo de prova conforme ASTM D638	13
Tabela 2 - Velocidade de teste	19
Tabela 3 - Resultados no ensaio de tração no HDPE	22
Tabela 4 - Valores médios e desvio padrão de tensão e alongamento do HDPE	27
Tabela 5 - Resultados no ensaio de tração no PVDF	28
Tabela 6 - Valores médios e desvio padrão de tensão e alongamento do PVDF	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
1.1 OBJETIVOS	6
1.1.1 OBJETIVO GERAL	6
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	6
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 Polímeros.....	6
2.1.1 Termoplásticos	7
2.1.2 Termorrígidos.....	8
2.1.3 Elastômeros.....	8
2.2 Propriedades mecânicas.....	9
2.2.1 Resistência à tração	10
2.2.2 Deformação	10
2.2.3 Escoamento.....	10
2.2.4 Alongamento	11
2.2.5 Limite de resistência à tração	11
2.3 Ensaio	11
2.3.1 Ensaio de tração	11
3. METODOLOGIA	12
3.1 Ensaio de tração	12
3.1.1 Preparação das amostras	12
3.1.2 Ensaio de tração nas amostras	18
3.2 Cálculos do gráfico tensão - deformação	19
4. RESULTADOS.....	22
4.1 Resultados das amostras de HDPE.....	22
4.2 Resultados das amostras de PVDF	28

5. CONCLUSÃO	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

1. INTRODUÇÃO

O uso de materiais poliméricos está inserido na rotina das pessoas em aplicações rotineiras, tais quais: sacolas de supermercados, embalagem de alimentos, brinquedos infantis, carcaças de equipamentos eletrônicos, entre outras. Além disso, este material também é utilizado em produções industriais complexas, sendo elemento fundamental de fabricação.

Os polímeros podem ser encontrados na natureza ou sintetizados industrialmente, o que permite uma variabilidade muito grande de uso, uma vez que em sua produção podem ser aplicadas técnicas que propiciam adaptações nas propriedades mecânicas que se adequam as mais diferentes especificações (TOLENTINO, 2015).

Os materiais poliméricos possuem características diferentes, que são definidas pela estrutura de suas cadeias moleculares e são classificados em termoplásticos, termorrígidos e elastômeros. Os termoplásticos são os mais produzidos em escala industrial somando 70% do que é produzido, enquanto os termorrígidos e elastômeros dividem 30% do mercado (GROOVER, 2017).

Entre os termoplásticos, o polietileno de alta densidade (HDPE), é um material rígido, com boa resistência à tração, baixo custo e alto consumo (NUNES e SANTOS, 2015). O Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) possui larga aplicação, dada sua alta capacidade de resistência térmica e resistência à abrasão (LOKENS GARD, 2013).

Em face do exposto, considera-se que os polímeros são matérias-primas de suma importância por sua aplicabilidade em diversos setores da produção industrial. Sendo assim, conhecer as propriedades mecânicas dos materiais viabiliza uma análise sobre as possibilidades de uso dos mesmos. Este estudo fará uma análise da resistência à tração dos termoplásticos Polietileno de alta densidade (HDPE) e Fluoreto de Polivinilideno (PVDF).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo da resistência a tração dos polímeros Polietileno de alta densidade (HDPE) e Fluoreto de Polivinilideno (PVDF).

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar estudo bibliográfico sobre a definição dos polímeros termoplásticos, termorrígidos e elastômeros
- Realizar ensaio de tração em amostras de HDPE
- Realizar ensaio de tração em amostras de PVDF

1.2 JUSTIFICATIVAS

Conhecer as propriedades mecânicas do material permite que projetos de engenharia sejam corretamente dimensionados. Deste modo, este trabalho utiliza as normas técnicas aplicáveis para realizar ensaios de tração em HDPE e PVDF.

Os resultados das análises poderão ser utilizados como ferramentas de previsibilidade do comportamento dos materiais em aplicações reais.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Polímeros

A palavra polímero tem origem do grego “poli” (muitos) e “mero” (unidade de repetição). Desta forma, um polímero é uma macromolécula composta por milhares partes unitárias de repetição chamadas “meros”, ligadas por ligação covalente (CANEVAROLO, 2002).

Antes de sua formação, os polímeros são constituídos por uma molécula denominada monômero, que após ser submetida a uma reação química torna-se instável e sob condições determinadas de temperatura e pressão reagem entre si formando cadeias, em que estas moléculas químicas instáveis (meros) se repetem continuamente (SANTOS, 2015).

De acordo com o tipo de monômero, do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, os polímeros são divididos em três classes: Termoplásticos, Termorrígidos e Elastômeros.

2.1.1 Termoplásticos

Os polímeros termoplásticos são os mais frequentemente utilizados. Em sua temperatura de transição vítrea (T_g), os polímeros termoplásticos mudam de um estado vítreo para um estado flexível como borracha. Depois desse ponto, os polímeros amorfos são transformados gradualmente em líquido à medida que a temperatura se eleva (CAREY, 2011).

O ciclo de aquecimento e resfriamento pode ser repetido diversas vezes sem degradar o polímero. O motivo para essa reação se deve ao fato de os termoplásticos terem estruturas moleculares lineares e/ou ramificadas que não formam ligações cruzadas quando aquecidas, conforme Figura 1 (GROOVER, 2014).

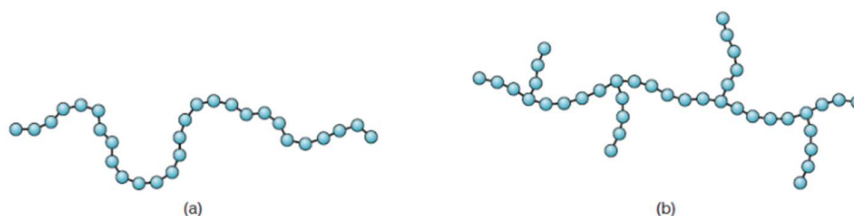


Figura - 1 Estrutura das moléculas dos termoplásticos: (a) Linear; (b) Ramificadas.
Fonte: GROOVER (2014)

Os polímeros nesta classe são muito úteis, porque eles podem ser facilmente moldados e são amplamente utilizados para fazer brinquedos e recipientes de armazenamento. O PET, por exemplo, é um termoplástico utilizado na fabricação de garrafas de sucos e refrigerantes. Outros exemplos de termoplásticos incluem o poliestireno (isopor), o cloreto de polivinila (PVC) e polietilenos de alta e baixa densidade (KLEIN, 2016).

O polietileno de alta densidade (HDPE), material avaliado neste trabalho, é utilizado na indústria na fabricação de revestimento de tubulações, redes de distribuição de gás, dutos para mineração e drenagem (NUNES, 2015). Neste tipo de polímero, as cadeias se alinham uma ao lado da outra e, deste modo, as moléculas formam fibras resistentes e duráveis, torando o material leve, com superfície resistente contra rasgos, perfurações e possíveis danos causados pelo contato com água (JESPERSEN e AISON, 2017).

O fluoreto de polivinilideno (PVDF), material testado neste trabalho, é primordialmente utilizado como camada de revestimento em virtude de sua dureza e resistência à abrasão. Além disso, é resistente quando exposto a altas e baixas temperaturas, seu range de trabalho varia de -62 °C a +150 °C (LOKENS GARD, 2014)

2.1.2 Termorrígidos

Os polímeros termorrígidos são polímeros formados por estruturas moleculares em rede e possuem ligações cruzadas covalentes. Eles tornam-se definitivamente enrijecidos durante a formação da rede e não amolecem quando aquecidos. (CALLISTER, 2016).

As vantagens dos plásticos termorrígidos para projetos de engenharia são: alta estabilidade térmica, alta rigidez, alta estabilidade dimensional, resistência a fluência e deformação quando submetidos a cargas, baixo peso, alta propriedade de isolamento elétrico e térmico (SMITH e HASHEMI, 2012).

Contudo, os termorrígidos também têm baixa ductibilidade e resistência ao impacto. Em um ensaio de tração, os termofixos apresentam comportamento semelhante ao das cerâmicas ou dos materiais frágeis (ASKELAND e BHATTACHARA, 2014).

2.1.3 Elastômeros

Os elastômeros são polímeros que, quando tensionados, alcançam grande deformação elástica. Este material é popularmente conhecido como

borracha, cuja origem pode ser natural extraída do látex de plantas; ou sintética, tendo o petróleo como matéria-prima principal de fabricação.

Da borracha natural são fabricadas solas de sapato, amortecedores, selos em juntas, entre outros (GROVE, 2014). Dentre os sintéticos, os mais utilizados estão o SBR, que é utilizado na fabricação de pneus automotivos, e os elastômeros de silicone que são frequentemente utilizados em seções de motores de automóveis e tubos de sangue empregados em práticas hospitalares (CALLISTER, 2016).

2.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas evidenciam o comportamento do material quando submetido a condições variadas de cargas e ambientes. Essas características são padronizadas pela norma internacional ASTM (American Society for Testing of Materials) (UGURAL, 2009).

Entre as principais propriedades mecânicas dos materiais, destacam-se o módulo de elasticidade, resistência a deformação e a tração, dureza, tenacidade à fratura, limite de fadiga, ductilidade e resiliência (STEIN, 2018).

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais é fundamental para o dimensionamento estrutural e verificações de estados limites. Essa determinação é feita por meio de ensaios laboratoriais. Os ensaios mais simples consistem na aplicação de forças em pequenos corpos de prova normatizados, nos quais são medidas as deformações e/ou forças de ruptura (GRECO, 2016).

Os resultados dos testes dependem das dimensões da amostra testada, uma vez que é improvável que projetemos estruturas com partes do mesmo tamanho que os corpos de prova, é preciso expressar os resultados dos testes de forma que possam ser aplicados a membros de qualquer tamanho. Um modo simples de atingir esse objetivo é converter os resultados dos testes em tensões e deformações (GERE *et al*, 2018).

2.2.1 Resistência à tração

O limite de resistência à tração é a tensão na qual a estrição tem início em materiais dúcteis. Esse fenômeno é visto apenas em ensaios de tração, já que nos testes de compressão os materiais expandem-se na direção transversal do eixo de compressão (ASKELAND,2019).

Em alguns materiais dúcteis, incluindo alguns polímeros e metais de baixa dureza como o chumbo, a redução de área ocorre em uma área altamente localizada denominada estrição, como visto a Figura 2. Nesse ponto, a área da seção transversal diminui muito mais rapidamente do que no resto da amostra (NEWELL,2010).

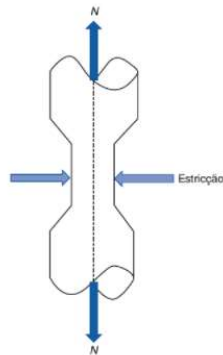


Figura 2 - Fenômeno da estrição. Fonte: PINHEIRO 2016

2.2.2 Deformação

Deformação pode ser definida como o alongamento ou a alteração da dimensão original do material.

A deformação pode ser caracterizada por dois momentos distintos. Na deformação elástica, o material recupera sua forma original após a retirada das tensões aplicadas. Na deformação plástica, a tensão aplicada causa deformação permanente ou residual no material (MENDES e SILVEIRA, 2018).

2.2.3 Escoamento

Escoamento é o nível de tensão onde se inicia a deformação plástica. Segundo CALLISTER (2019), em alguns materiais a transição da fase elástica

para a fase plástica ocorre de forma repentina, dando origem ao limite de escoamento.

2.2.4 Alongamento

Alongamento é a variação do comprimento inicial do material em função da carga de tração aplicada.

2.2.5 Limite de resistência à tração

O limite de resistência à tração corresponde ao ponto máximo de tensão da curva tensão-deformação. É a tensão máxima que o material resiste quando submetido à uma força axial de tração. Depois de alcançada a deformação elástica, é gerado um pescoço em algum ponto do corpo de prova ou, tecnicamente chamado de estrição, onde ocorrerá a fratura do material (CALLISTER,2016).

2.3 Ensaaios

Os ensaios mecânicos possibilitam conhecer o comportamento do material quando submetido a esforços. Estas análises têm a finalidade de definir as condições de uso em aplicações reais.

Os ensaios mecânicos podem ser destrutivos ou não-destrutivos. Nos destrutivos, os corpos de prova são permanentemente danificados, dentre eles podemos citar: tração, compressão e dureza. E, nos ensaios não destrutivos não ocorrem danos na integridade física do material, a exemplo temos: partículas magnéticas, líquido penetrante, ultrassom, entre outros (GARCIA *et. al*, 2012).

2.3.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um ensaio destrutivo, realizado para avaliar as propriedades mecânicas do material. Neste ensaio o corpo de prova é submetido

a força axial a uma velocidade constante, até seu rompimento (SMITH e HASHEMI,2012).

Algumas das propriedades mecânicas avaliadas obtidas através do ensaio de tração são: módulo de elasticidade, escoamento, limite de resistência à tração e alongamento (STEIN e GHLEN, 2019).

3. METODOLOGIA

Este trabalho tem como fundamentação ensaios práticos feitos em laboratório. Neste capítulo são apresentados os procedimentos, normas de referências e equipamentos utilizados.

3.1 Ensaio de tração

Neste subitem é explicado o procedimento para a preparação dos corpos de prova e do ensaio de tração das amostras.

Todos os corpos de prova foram retirados de polímero extrudado no processo de manufatura de tubos flexíveis.

3.1.1 Preparação das amostras

Para experimento foram cortados 10 corpos de prova de HDPE de um único lote e 10 corpos de prova de PVDF de um único lote.

A geometria dos corpos de prova, Figura 3, foi definida conforme especificação de teste da norma ASTM 638 (Método de teste padrão para propriedades de tração dos plásticos), peça de teste tipo 1, cuja dimensões encontram-se na Tabela 1.

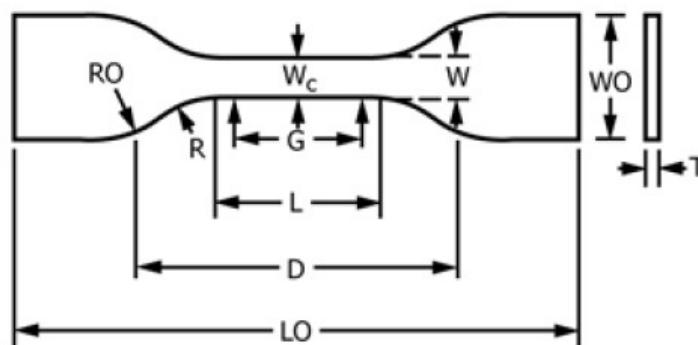


Figura 3 - Geometria de corpo de prova conforme norma ASTM D638. Fonte: ASTM (2014)

Tabela 1 - Dimensões de corpo de prova conforme ASTM D638

Dimensões	Tipo IV (mm)
W—Largura da seção estreita	6 (0.25)
L—Comprimento da seção estreita	33 (1.30)
WO—Largura total,	19 (0.75)
LO—Comprimento total	115 (4.5)
G—Comprimento padrão	25 (1.00)
D—Distância entre as garras	65 (2.5)
R—Raio do filete	14 (0.56)
RO—Raio externo (Tipo IV)	25 (1.00)

Fonte: ASTM D638 (2014)

3.1.1.1 Aplainar as amostras

As amostras de HDPE e PVDF foram aplainadas, conforme indicado na norma ASTM D638, corpo de prova tipo IV. Para isto, foi utilizada uma plaina manual de polímero.

O funcionamento da máquina consiste em passar o polímero entre dois rolos, que movimentam o material até que ele entre em contato com uma faca de corte, conforme Figuras 4 e 5.

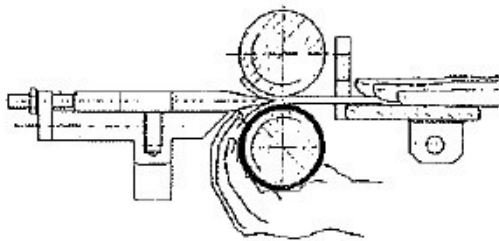


Figura 4 - Esquema de corte plaina MPE120. Fonte: SETIC Gauder Group



Figura 5 – Aplainamento de amostra de HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

Após cada corte efetuado, a espessura do material foi medida utilizando paquímetro digital. Este movimento foi repetido até que as amostras de HDPE, Figura 6, e amostras de PVDF, Figura 7, alcançassem a espessura desejada.



Figura 6 - Amostra aplainada de HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)

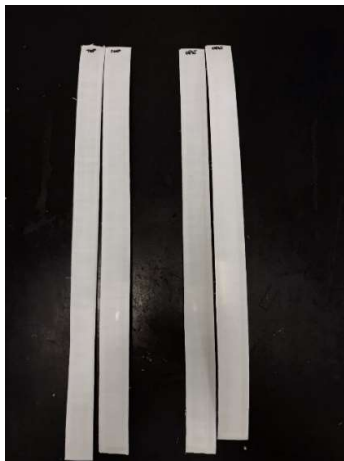


Figura 7 - Amostra aplainada de PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)

3.1.1.2 Estampa dos corpos de prova

Após aplainados, os corpos de prova foram estampados em uma prensa manual, conforme Figura 8. Esta máquina possui dispositivo padrão para corte de corpos de prova especificado pela norma ASTM D638, corpo de prova tipo IV, ilustrado na Figura 9. Na Figura 10, então demonstradas as dimensões do dispositivo de corte. Os corpos de prova de HDPE e PVDF, após a estampa, podem ser vistos nas Figuras 11 e 12 respectivamente.



Figura 8 - Prensa manual modelo: PAM3. Fonte: MM Indústria Mecânica Ltda.



Figura 9 - Dispositivo de corte conforme norma ASTM D638 tipo IV. Fonte: MM Indústria Mecânica Ltda.

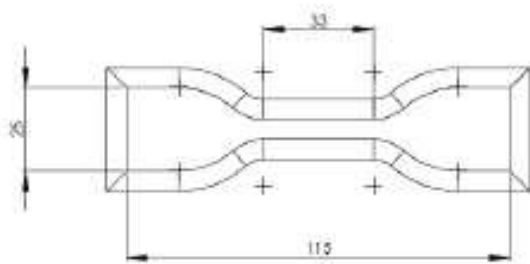


Figura 10 - Geometria do dispositivo de corte conforme norma ASTM D638 tipo IV. Fonte: MM Indústria Mecânica Ltda.

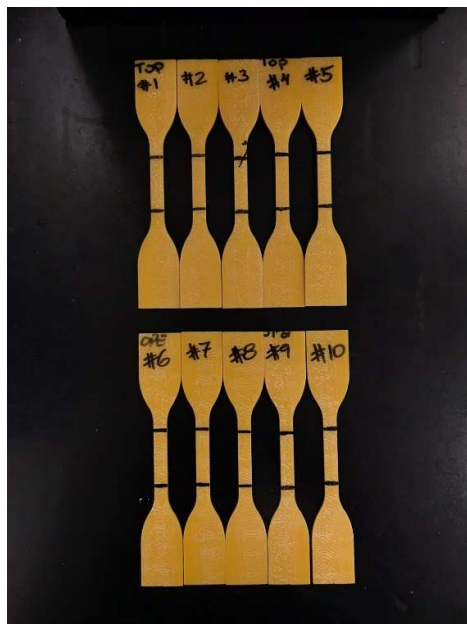


Figura 11 - Corpos de prova de HDPE estampados. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)

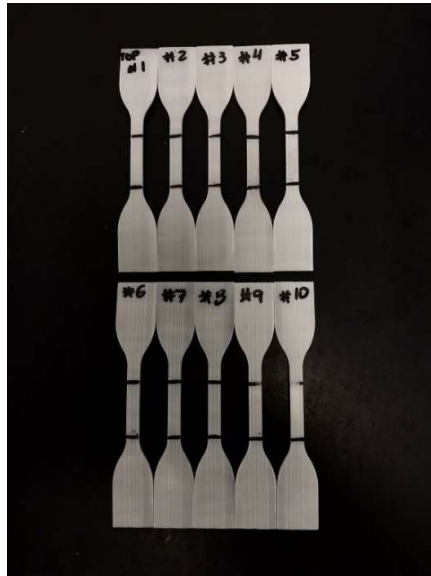


Figura 12 - Corpos de prova de PVDF estampados. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)

3.1.1.3 Preparação para ensaio de tração

Utilizando uma régua graduada, Figura 13, foram marcados dois pontos na área útil do corpo de prova. Em seguida, utilizando um micrômetro digital, Figura 14, foram medidos três pontos no comprimento de teste do HDPE, Figura 15 e do PVDF, Figura 16. A média dos resultados foi considerada o valor da espessura do corpo de prova. Para medição da largura, o mesmo processo foi realizado.



Figura 13 - Régua graduada de 300mm. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2021).



Figura 14 - Micrômetro digital. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2021).



Figura 15 – Medição de espessura do HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).



Figura 16 — Medição de espessura do PVDF. Fonte PRÓPRIO AUTOR (2022).

3.1.2 Ensaio de tração nas amostras

O ensaio de tração foi realizado com base na norma ASTM D638 – Método de teste padrão para propriedades de tração de polímeros.

A temperatura do laboratório estava controlada em 22.3 C° e humidade 53.5%. Tendo em vista que variações bruscas de temperatura afeta a cristalinidade do material, alterando significativamente no módulo e na rigidez do polímero.

A definição da velocidade de teste seguiu a orientação da ASTM D638, que especifica que a ruptura do corpo de prova ocorra entre 0,5 e 5 minutos. Deste modo, a velocidade definida a Tabela 2 é praticada no laboratório utilizado para execução dos ensaios e atende aos requisitos da norma.

Tabela 2 - Velocidade de teste

Material	Velocidade	Taxa de deformação
	(mm/min)	(s ⁻¹)
PVDF	35mm/min	8,97x10 ⁻³
HDPE	110mm/min	2,82x10 ⁻²

Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2021).

O ensaio foi executado em uma máquina universal de ensaios, Figura 17. Os corpos de provas foram submetidos a uma força axial de tração e sua deformação foi medida através de um vídeo extensômetro digital.



Figura 17 - Máquina Universal de tração. Fonte: Instron (2021).

Após a realização dos ensaios, os resultados foram demonstrados através de gráficos de curva tensão-deformação.

3.2 Cálculos do gráfico tensão – deformação

O princípio de funcionamento do equipamento utilizado no ensaio, consiste em uma travessa fixa (inferior) e uma travessa móvel (superior), Figura 18. O corpo de prova foi fixado entre duas garras, Figura 19.

O deslocamento da travessa móvel aplicou uma força axial de tração no corpo de prova e, esta força provocou sua deformação, aumentando o comprimento e diminuindo a área da seção transversal, até sua ruptura.

O alongamento da amostra foi medido por um extensômetro mecânico e a tensão por uma célula de carga acoplada na travessa fixa.



Figura 18 - Ponte fixa e móvel da Máquina Universal de Tração. Fonte: Instron (2021).



Figura 19 - Corpo de prova de HDPE fixado entre as garras da máquina de tração.
Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)

Os resultados foram calculados automaticamente pelo software do equipamento, tendo sido aplicadas as equações de engenharia para conhecimento dos valores de tensão, Equação 1, alongamento percentual, Equação 2, e deformação de tração, Equação 3, módulo de elasticidade, Equação 4.

- Tensão

$$\tau = \frac{F}{A}$$

(1)

Onde:

τ : tensão

F: força

A: Área

- Alongamento percentual

$$\Delta L = \frac{L}{L_0}$$

(2)

Onde:

ΔL : alongamento percentual

L_0 : Comprimento inicial

- Deformação de tração

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

(3)

Onde:

ε : deformação

L_f : comprimento final

L_0 : comprimento inicial

- Módulo de elasticidade

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Onde:

E: módulo de Young

σ : tensão de Tração

ε : deformação

4. RESULTADOS

As propriedades de tração do HDPE e do PVDF são baseadas em 10 medições feitas respectivamente em cada material.

4.1 Resultados das amostras de HDPE

Após a realização do ensaio de tração, foram sintetizados na Tabela 3 os dados de entrada dos valores de espessura e largura, resultados de tensão e deformação lidos pela máquina universal de tração.

A partir da análise da Tabela 3 é possível observar fatores que influenciaram no resultado das amostras. O primeiro deles é a largura do corpo de prova, cujo valor é 6mm e, tendo em vista que o dispositivo de corte utilizado está em concordância com a norma ASTM D638, não houve variação. As medições de espessura apresentaram pequenas discrepâncias em virtude das etapas do processo de preparação das amostras, tais quais: ajuste de velocidade da plaina, ajuste manual de espessura da plaina e afiação da faca de corte.

Tabela 3 - Resultados no ensaio de tração no HDPE

Amostra	Largura (6.0-6.2)	Espessura (1.50- 2.50)	Tensão de ruptura	Alongamento total
	(mm)	(mm)	(MPa)	(%)
# 1	6.00	1.79	39.2	707
# 2	6.00	1.76	37.6	686
# 3	6.00	1.80	37.4	680
# 4	6.00	1.76	35.5	678
# 5	6.00	1.76	31.2	618

# 6	6.00	1.78	37.0	664
# 7	6.00	1.73	35.3	663
# 8	6.00	1.72	35.5	657
# 9	6.00	1.76	36.1	663
# 10	6.00	1.74	38.6	702

Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

Visando melhor entendimento da curva tensão-deformação, foi selecionado o resultado da Amostra 1, demonstrado na Figura 20, para detalhamento das propriedades mecânicas medidas no ensaio. Limite de escoamento (LE), limite de resistência no escoamento (LRE), tensão de ruptura (TR), deformação elástica (DE) e deformação plástica (DP).

Todas as amostras apresentaram inicialmente uma deformação elástica, na sequência o processo de escoamento, seguida por uma deformação plástica. O ponto mais alto do gráfico corresponde a tensão de ruptura. Quanto ao módulo de elasticidade, Canevarolo Jr (2017), cita que:

“Desde que a existência de um limite elástico em plásticos seja discutida, a aplicabilidade do termo Módulo de Elasticidade para descrever a rigidez de um plástico tem sido questionada. Na verdade, as características de tensão versus deformação de materiais plásticos são dependentes de fatores como taxas de carregamento, temperatura, história térmica, etc. Entretanto, este valor será útil se sua natureza arbitrária e dependência com o tempo, temperatura e outros fatores são computados.” (CANEVAROLO, 2017, p. 349)

Tendo em vista as considerações feitas pelo autor acima citado, para análise dos resultados apresentados neste trabalho, não foram avaliados os dados de módulo de elasticidade.

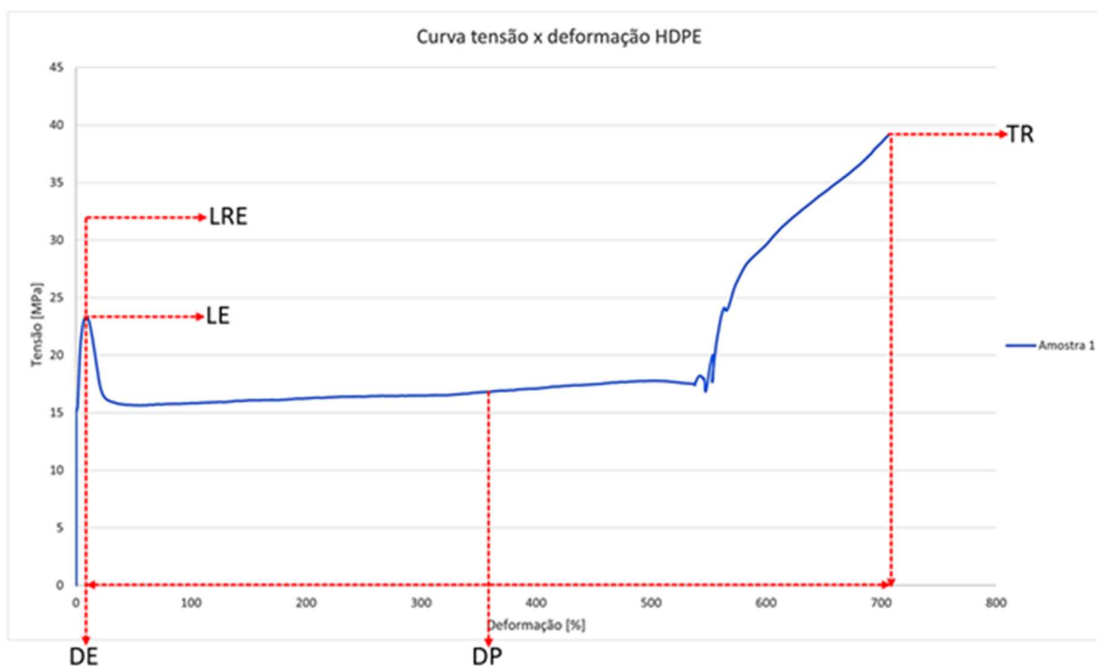


Figura 20 - Propriedades mecânicas da curva tensão-deformação do HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)

Através da análise do gráfico da Figura 21, é possível observar que todas as amostras tiveram um pico de resistência logo após a deformação elástica, atingindo seu limite de resistência no escoamento. Esse fenômeno ocorre porque quanto maior for a cristalinidade de um polímero maior será seu módulo elástico e sua resistência ao escoamento (CANEVAROLO, 2017).

O HDPE possui cadeias majoritariamente lineares, desta forma estas cadeias se agrupam com as cadeias mais próximas aumentando sua cristalinidade e sua resistência (SMITH e HASHEMI, 2012).

Ainda a partir da análise da Figura 21, podemos intuir que o HDPE possui comportamento dúctil, que é caracterizado por extensa deformação plástica, antes do rompimento (CALISTER, 2019). Após o escoamento, o material atingiu nível de deformação permanente e, à medida em que o corpo de prova foi sendo submetido a força axial de tração, ocorreu o empescoamento na área útil de teste, Figura 22.

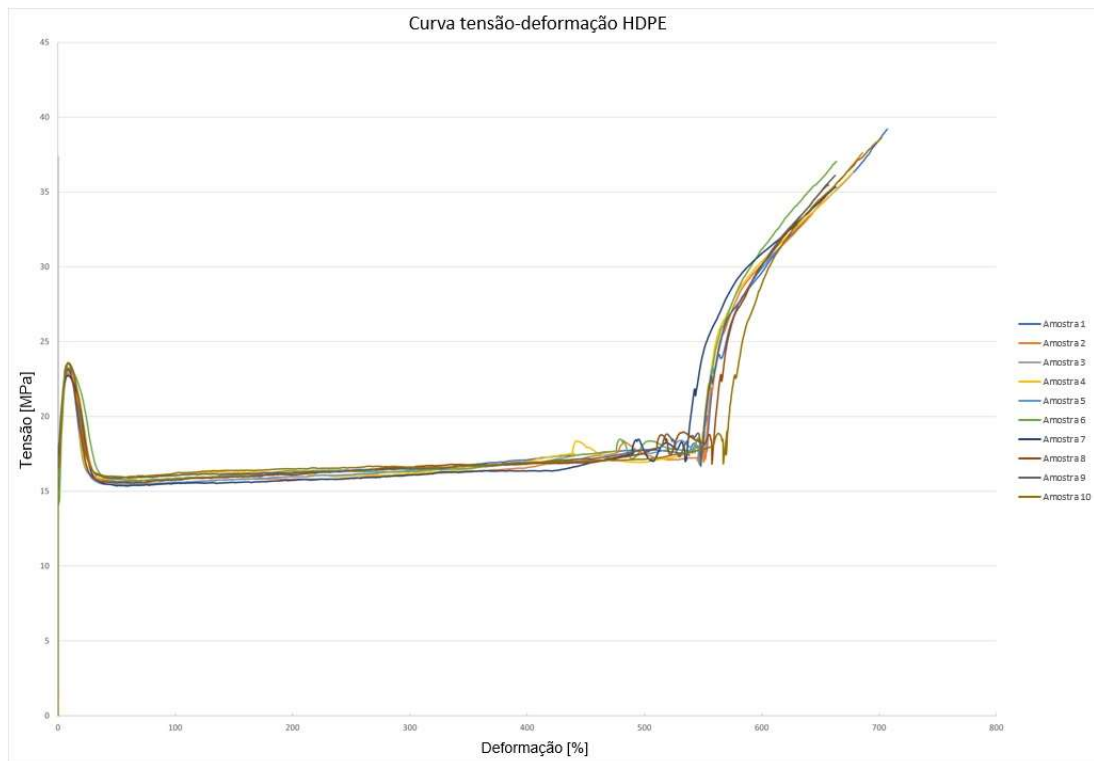


Figura 21 - Gráfico tensão-deformação HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).



Figura 22 - Empescoçamento corpo de prova de HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)

Durante a execução do ensaio observou-se que antes do início da fase do pico máximo de tensão, os corpos de prova apresentaram uma variação de tensão, Figura 23. Este fenômeno ocorreu no instante em que o alongamento

atingiu a região subsequente a área útil de teste, Figura 24, visto que nestes pontos ocorreu um aumento da área da seção transversal.

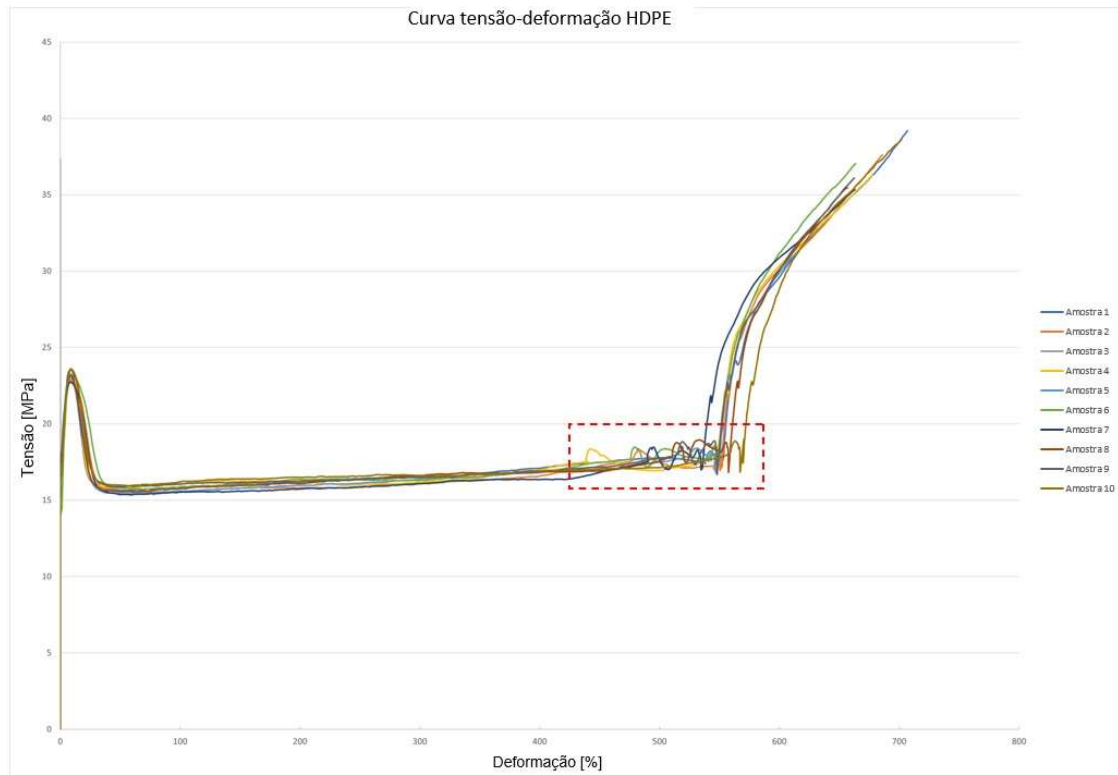


Figura 23 - Variação de tensão na curva tensão-deformação do HDPE. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

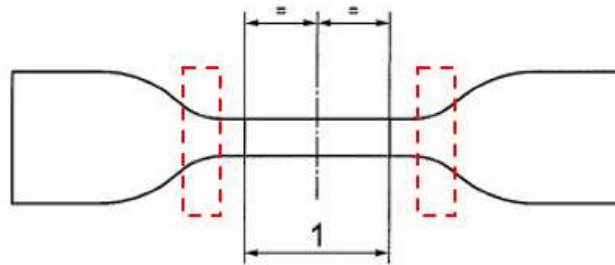


Figura 24 - Região subsequente da área útil de teste. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

Após a fase de variação de tensão, os corpos de prova seguiram para o pico máximo tensão, até alcançarem a tensão de ruptura, onde ocorreu a fratura, Figura 25, e encerramento do teste.

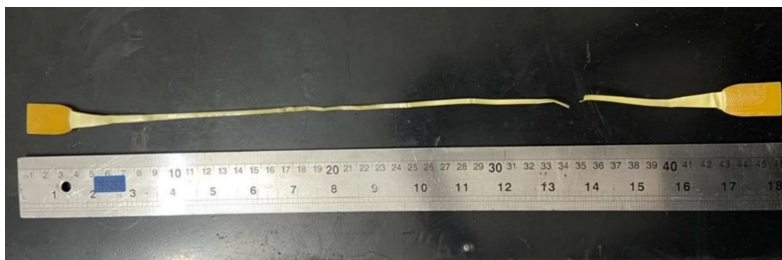


Figura 25 - Corpo de prova de HDPE após o rompimento. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

Com os ensaios dos 10 corpos finalizados, obteve-se através das leituras feitas pelo equipamento universal de tração os resultados médios de tensão de ruptura, alongamento total e desvio padrão de ambos demonstrados na Tabela 4. O desvio padrão de 2.250 MPa para a tensão de ruptura e 25.375% para o alongamento total, se justificam pela variação no processo de preparação das amostras. Fatores como variação da espessura, velocidade de corte na plaina e afiação da faca de corte, impactam diretamente homogeneidade da amostragem e interferiram no resultado.

Tabela 4 - Valores médios e desvio padrão de tensão e alongamento do HDPE

	Tensão de ruptura	Alongamento total
	(MPa)	(%)
Média	36,3	672
Desvio padrão	2,250	25,375

Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

Os resultados encontrados nos testes enquadram-se nos valores típicos para resistência a tração, que varia entre 31.0 e 41.4 Mpa e alongamento percentual variando entre 100 e 600% (CALLISTER, 2007).

4.2 Resultados das amostras de PVDF

Na Tabela 5 estão descritos os valores das medições de largura, que assim como nas amostras de HDPE não apresentaram variações em virtude da estampa de corte, padronizada conforme a ASTM D638. Para as medições de espessura, as variações também são decorrentes do processo de preparação das amostras

Tabela 5 -Resultados no ensaio de tração no PVDF

Amostra	Largura (6.0-6.2) (mm)	Espessura (1.50-2.50) (mm)	Tensão de ruptura (MPa)	Alongamento total (%)
# 1	6,00	1,55	45,8	390,4
# 2	6,00	1,52	39,5	379,4
# 3	6,00	1,51	29,6	365,5
# 4	6,00	1,91	31,3	363,7
# 5	6,00	1,94	30,8	359,6
# 6	6,00	1,92	40,8	368,8
# 7	6,00	1,76	29,8	372,6
# 8	6,00	1,78	38,4	381,8
# 9	6,00	1,72	35,9	379,9
# 10	6,00	1,74	25,9	366,8

Na figura 26, foi isolada a curva tensão-deformação da amostra 1 para detalhamento das propriedades mecânicas: Limite de escoamento (LE), limite de resistência no escoamento (LRE), tensão de ruptura (TR), deformação elástica (DE) e deformação plástica (DP).

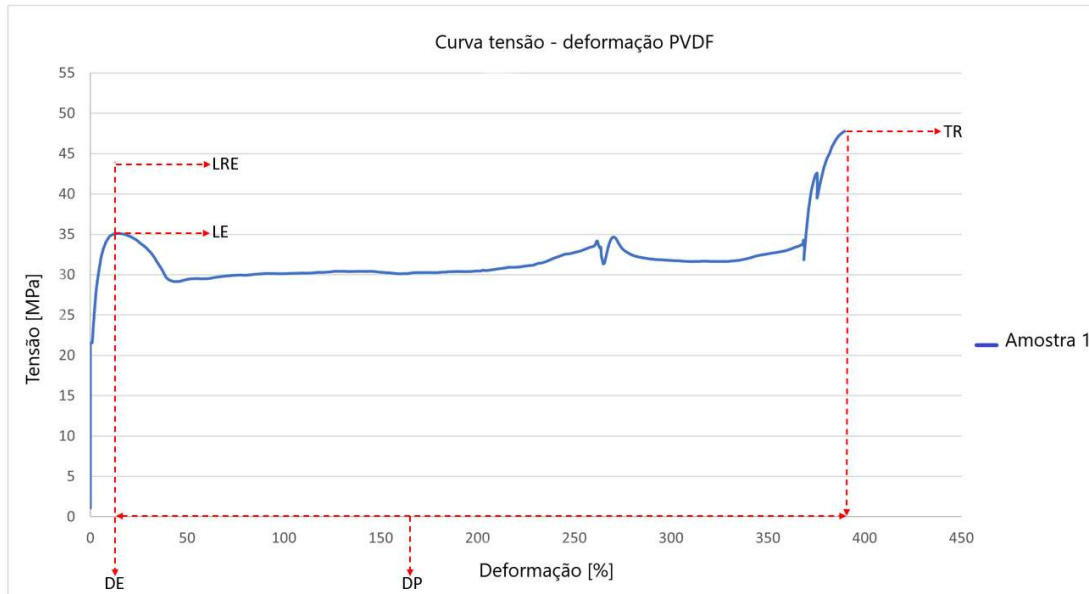


Figura 26 - Propriedades mecânicas da curva tensão – deformação do PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022)

A análise do gráfico da Figura 27, é possível observar que todas as amostras tiveram comportamento semelhante ao do HDPE, com um pico de resistência seguido de deformação elástica, atingindo seu limite de resistência no escoamento, na sequência o material se deformou plasticamente, Figura 28, seguido por um pico de tensão que ocasionou sua ruptura.

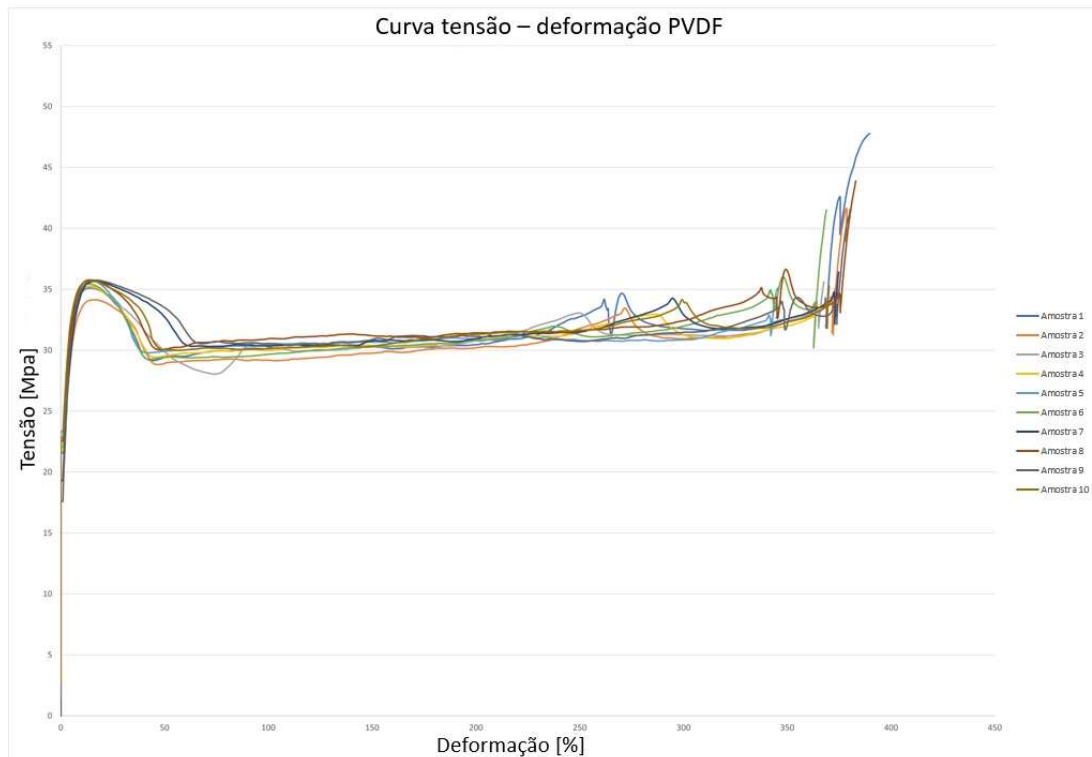


Figura 27 -Gráfico tensão - deformação PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).



Figura 28 - Deformação plástica do corpo de prova de PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

Na Figura 29, logo após o limite de escoamento é possível ver uma diminuição de tensão na amostra 3, este fenômeno está ligado descontinuidades, rebarbas e concentradores de tensão na área útil do corpo de prova, que por sua vez, são causadas por intercorrências no processo de preparação dos corpos de prova. Um exemplo disso, podem ser problemas na

afiação da faca de corte. Ainda na Figura 30, é possível observar uma variação de tensão causada pela deformação ocorrida fora da área útil de teste.

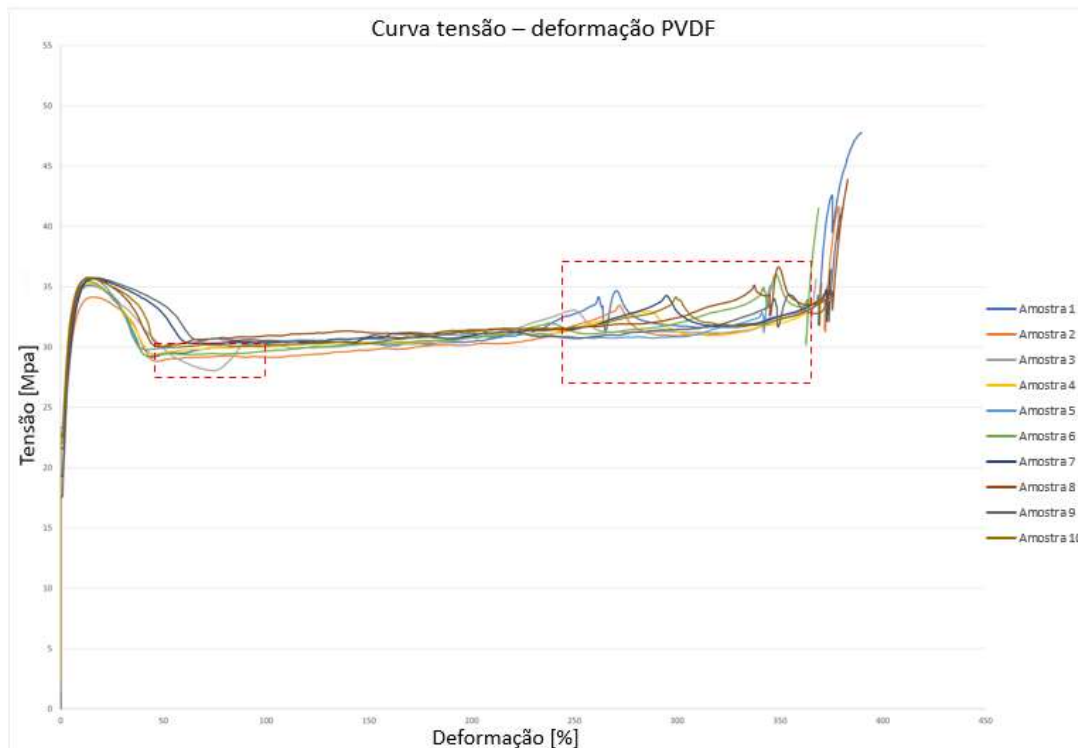


Figura 29 - Variação de tensão na curva tensão-deformação do PVDF. Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

Após a conclusão dos testes nos 10 corpos de provas, obteve-se através das leituras feitas pelo equipamento universal de tração os resultados médios de tensão de ruptura, alongamento total e desvio padrão de ambos demonstrados na Tabela 6. O desvio padrão de 6,247 MPa para a tensão de ruptura e 9,714% para o alongamento total, se justificam pela variação no processo de preparação das amostras. Fatores como variação da espessura, velocidade de corte na plaina e afiação da faca de corte, impactam diretamente homogeneidade da amostragem e interferiram no resultado.

Tabela 6 - Valores médios e desvio padrão de tensão e alongamento do PVDF

	Tensão de ruptura	Alongamento total
	(Mpa)	(%)
Média	34,8	372,9
Desvio padrão	6,247	9,714

Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2022).

Os resultados encontrados nos testes estão em consonância com o especificado pelo fabricante Solvey, que delimita a faixa de resistência a tração entre 34,0 e 40,0 Mpa e alongamento entre 100 e 300%.

5. CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho, pôde-se explorar as características mecânicas do HDPE e do PVDF através do detalhamento das propriedades lidas na curva tensão-deformação: Limite de escoamento (LE), limite de resistência no escoamento (LRE), tensão de ruptura (TR), deformação elástica (DE) e deformação plástica (DP).

A partir das análises dos resultados é possível ressaltar a importância de um processo homogêneo e cauteloso da preparação das amostras. Tendo em vista que as possíveis variações neste processo provocaram oscilações nas linhas do gráfico. Cabe salientar, que tais variações não impactaram no desempenho dos materiais, visto que ambos atingiram os resultados previstos nas literaturas de referência. Entretanto, ficou evidente que para processos com níveis de controles mais elevados, problemas na fase de preparação das amostras poderá interferir desempenho dos resultados.

Diante dos resultados, acredita-se que este trabalho poderá ser utilizado como base para novos estudos sobre os polímeros aqui avaliados, tais quais a o impacto da variação de velocidade do teste e variação de temperatura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMAURI, GARCIA,.; ALVARES, SPIM,. J.; DOS, SANTOS,.Carlos. A. **Ensaio dos Materiais**, 2ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2012.
- [2] ASKELAND, Donald. R.; FULAY, Pradeep. P.; BHATTACHARYA, D. K. **Ciência e Engenharia dos materiais. Tradução da 3ª edição norte-americana**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2014.
- [3] ASKELAND, Donald. R.; WRIGHT, Wendelin. J. **Ciência e engenharia dos materiais – Tradução da 4ª edição norte-americana**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2019.
- [4] ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS). **ASTM D638 Standard test method for tensile properties of plastics**. United States, 2014.
- [5] CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber, 2002.
- [6] D., CALLISTER.Jr. W.; G., RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. 9ª edição**. São Paulo: Editora LTC, 2016.
- [7] CALLISTER Jr, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [8] D., JESPERSEN,. N.; ALISON, HYSLOP, **Química - A Natureza Molecular da Matéria**. São Paulo: Editora LTC, 2017.
- [9] DAVID, KLEIN, **Química Orgânica - Vol. 2, 2ª edição**. São Paulo: Editora LTC, 2016.

- [10] GERE, James. M.; GOODNO, Barry. J. **Mecânica dos materiais – Tradução da 8ª edição norte-americana**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2018.
- [11] GRECO, Marcelo. **Resistência dos Materiais - Uma Abordagem Sintética**. São Paulo: Grupo GEN, 2016.
- [12] GROOVER, MIKELL P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2014.
- [13] International Standard. **ISO 37 Rubber, vulcanize for thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties**. United States, 2011.
- [14] International Standard. **ISO 1133 Plastics – Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics – Part 1: Standard method (ISO 1133-1:2011)**. United States, 2011.
- [15] LOKENSGARD, Erik. **Plásticos Industriais, teoria e aplicações**. São Paulo: Cengage Learning, 2013.
- [16] MENDES, Cláudia. L.; SILVEIRA, Aline.Morais. D. **Ensaio mecânicos**. 1ª edição. Porto Alegre: Grupo A, 2018.
- [17] NEWELL, J. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. São Paulo: LTC, 2010.
- [18] NUNES, Edilene.de.Cássia. D.; SANTOS, Leandro.José. D. **Termoplásticos - Estruturas, Propriedades e Aplicações**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015.
- [19] Pinheiro, A. C.; Crivelaro. **Fundamentos de Resistência dos Materiais**. 1ª edição. São Paulo: Editora LTC, 2016.

- [20] SANTOS, Zora.Ionara.Gama. D. **Tecnologia dos materiais não metálicos, classificação, estrutura, propriedades, processos de fabricação e aplicações**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015.
- [21] SMITH, William. F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5ª edição. São Paulo: McGraw-Hill, Bookman, 2012.
- [22] SOLVAY. **Solef 60512 Polyvinylidene Fluoride. Technical Data Sheet**.
- [23] STEIN, Ronei. T. **Materiais de construção mecânica**. Porto Alegre: Grupo A, 2018.
- [24] STEIN, Ronei. T.; GEHLEN, Rubens.Zolar.da. C.; ROJAS, Fernando. C. **Tecnologia dos materiais**. Porto Alegre: Grupo A, 2019.
- [25] TOLENTINO, Nathalia.Motta.de. C. **Processos Químicos Industriais** - Matérias-Primas, Técnicas de Produção e Métodos de Controle de Corrosão. São Paulo: Editora Saraiva, 2015.
- [26] Urugal, Ansel **C. Mecânica dos Materiais**. São Paulo: Grupo GEN, 2009.