

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**RENE FRASSATO BRAGA**

**CONTROLE DE QUALIDADE DE POLÍMEROS**

**SÃO CARLOS, SP  
2023**

RENE FRASSATO BRAGA

**CONTROLE DE QUALIDADE DE POLÍMEROS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em química.

Orientador: Ivo Freitas Teixeira

**São Carlos – SP**

**2023**

*Para o meu pai*

## RESUMO

O controle de qualidade de polímeros é uma área importante na indústria de materiais que busca garantir a qualidade dos materiais poliméricos utilizados em diversas aplicações. Os polímeros são materiais macromoleculares amplamente utilizados em diferentes setores, incluindo a indústria automotiva, aeroespacial, de embalagens, entre outros. O controle de qualidade é realizado por meio de diversos métodos, como análises químicas, análises térmicas, análises mecânicas, espectroscopia, entre outros. Esses métodos permitem fazer uma caracterização de um determinado material, detecção de impurezas, determinação de propriedades físicas e químicas, avaliação de estabilidade, entre outros parâmetros que afetam a qualidade dos polímeros. Através de um controle de qualidade adequado, é possível garantir a conformidade dos polímeros com as especificações necessárias para cada aplicação, garantindo assim a segurança e a eficácia dos produtos finais. O presente trabalho tem como objetivo mostrar como o controle de qualidade de polímeros é feito, evidenciando os métodos utilizados para tal e a importância desse processo nos dias de hoje.

**Palavras-chave:** Controle de qualidade; Polímeros; Análise de materiais; Caracterização de materiais;

## **ABSTRACT**

Polymer quality control is an important area in the materials industry that seeks to ensure the quality of polymeric materials used in a range of applications. Polymers are macromolecular materials widely used in different sectors, including the automotive industry, aerospace, packaging, among others. Quality control is carried out by several methods, such as chemical analysis, thermal analysis, mechanical analysis, spectroscopy, among others. These methods allow the characterization of a given material, impurity detection, determination of physical and chemical properties, stability evaluation, among other parameters, which affect the quality of polymers. Through proper quality control, it is possible to ensure the compliance of polymers with the specifications required for each application, thus ensuring the safety and efficacy of the final products. This work aims to show how quality control of polymers is done, highlighting the methods used to reach this mission and the importance of this process today.

**Keywords:** Quality control; Polymers; Material analysis; Material characterization;

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Representação de um monômero e um mero de um polímero, no caso, um exemplo da reação de polimerização de um polietileno a partir do etileno. ....	1
Figura 2- Norma ASTM D1238, versão 2023, para ensaio de MFI. ....	3
Figura 3- Corpo de prova de Tração. ....	6
Figura 4- Matéria-prima polimérica.....	7
Figura 5- Equipamento de DSC. ....	8
Figura 6- Curva de DSC – 1º Aquecimento.....	10
Figura 7- Curva de DSC – 2º Aquecimento.....	10
Figura 8- Equipamento de TGA em operação.....	11
Figura 9- Curva de TG em função da temperatura.....	13
Figura 10- Análise visual dos corpos de prova (a) antes e (b) após a realização do Envelhecimento Térmico.....	14
Figura 11- Espectrofotômetro Bruker, modelo Alpha II. ....	15
Figura 12- Estrutura química do Polietileno.....	16
Figura 13- Espectro no infravermelho característico de Polietileno.....	17
Figura 14- Estrutura química do Polipropileno. ....	17
Figura 15- Espectro no infravermelho característico de Polipropileno. ....	18
Figura 16- Estrutura química do Polietileno Tereftalato. ....	19
Figura 17- Espectro no infravermelho característico de Polietileno Tereftalato.....	19
Figura 18- Espectro no infravermelho da amostra analisada. ....	21
Figura 19- Estrutura química da Poliamida (PA). ....	22
Figura 20- Balança analítica SHIMADZU com mecanismo automático de cálculo de densidade.....	23
Figura 21- Mufla UP Brasil. ....	25
Figura 22- Durômetro Shore A. ....	27
Figura 23- Durômetro Shore D.....	27
Figura 24- Equipamento de MFI NZ Philpolymer, modelo XRL-400.....	29
Figura 25- Máquina Universal de Ensaio Instron EMIC, realizando um ensaio de Tração.....	31
Figura 26- Curvas de Tensão vs. Deformação da amostra.....	32
Figura 27- Máquina Universal de Ensaio Instron EMIC, realizando um ensaio de Flexão. ....	34

Figura 28- Curvas de Tensão vs. Deformação à flexão. ....	35
---	----

## LISTA DE TABELAS

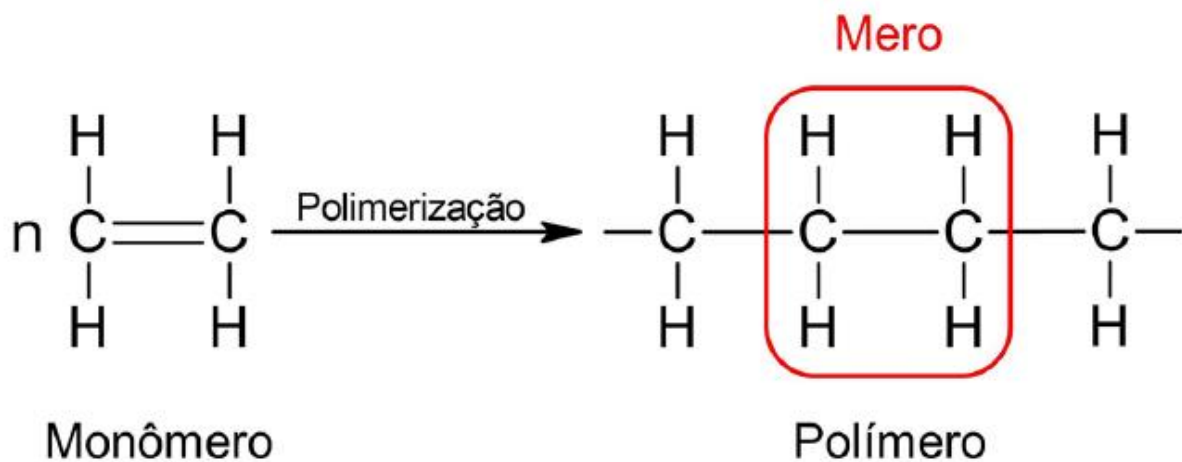
Tabela 1- Condições de ensaio de DSC. ....	9
Tabela 2- Condições de ensaio de TG.....	12
Tabela 3- Resumo dos resultados de TG.....	13
Tabela 4- Condições de Envelhecimento Térmico. ....	14
Tabela 5- Grupamentos químicos característicos do Polietileno.....	17
Tabela 6- Grupamentos químicos característicos do Polipropileno.....	18
Tabela 7- Grupamentos químicos característicos do Polietileno Tereftalato.....	20
Tabela 8- Condições de ensaio de FTIR.....	20
Tabela 9- Grupamentos químicos presentes na amostra analisada. ....	21
Tabela 10- Condições de ensaio de Densidade.....	23
Tabela 11- Resultados de ensaio de Densidade.....	24
Tabela 12- Condições de ensaio de Teor de Cinzas.....	26
Tabela 13- Resultados de ensaio de Teor de Cinzas.....	26
Tabela 14- Condições de ensaio de Dureza Shore.....	28
Tabela 15- Resultados de ensaio de Dureza. ....	28
Tabela 16- Condições de ensaio de MFI.....	30
Tabela 17- Resultados de ensaio de MFI.....	30
Tabela 18- Condições de ensaio de Tração.....	32
Tabela 19- Resultados do ensaio de Tração.....	33
Tabela 20- Condições de ensaio de Flexão. ....	35
Tabela 21- Propriedades mecânicas em Flexão. ....	36

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO AOS POLÍMEROS</b> .....	1
<b>2 IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE QUALIDADE DE POLÍMEROS</b> .....	2
2.1 NORMAS .....	3
2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE E ENSAIOS .....	5
2.2.1 Calorimetria Exploratória Diferencial .....	7
2.2.2 Termogravimetria .....	11
2.2.3 Envelhecimento Térmico .....	13
2.2.4 FTIR .....	15
2.2.5 Densidade por Imersão .....	22
2.2.6 Teor de Cinzas .....	24
2.2.7 Dureza .....	26
2.2.8 Índice de Fluidez .....	29
2.2.9 Tração .....	30
2.2.10 Flexão .....	33
<b>3 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	36
<b>4 REFERÊNCIAS</b> .....	37

## 1 INTRODUÇÃO AOS POLÍMEROS

Os polímeros são moléculas grandes e complexas formadas pela repetição de unidades estruturais menores, chamadas monômeros. Os monômeros são compostos capazes de se unir em uma reação química, chamada de reação de polimerização, para formar uma cadeia polimérica. A maior unidade constitucional contribuída por uma única molécula de monômero para a estrutura de uma macromolécula é chamada de Mero. Toda essa definição pode ser vista na Figura 1.



**Figura 1:** Representação de um monômero e um mero de um polímero, no caso, um exemplo da reação de polimerização de um polietileno a partir do etileno.

(Fonte: Referência [1])

Existem vários tipos de polímeros, os principais são os Termoplásticos, Termofixos (ou Termorrígidos) e Elastômeros. Os Termoplásticos são materiais que podem ser moldados por meio de aquecimento e resfriamento repetidos e são geralmente resistentes e duráveis, como o polietileno e o PVC (Policloreto de vinila). Os Termofixos são materiais que são moldados apenas uma vez, após o qual endurecem permanentemente e são resistentes a altas temperaturas, como é o caso das resinas epóxi. Os Elastômeros são materiais que apresentam alta elasticidade e são frequentemente utilizados em aplicações que exigem boa flexibilidade e durabilidade, que é o caso da borracha natural e da sintética.

As propriedades físico-químicas dos materiais poliméricos incluem densidade, ponto de fusão, ponto de ebulição, resistência mecânica, resistência química, condutividade elétrica, resistência térmica e coeficiente de dilatação térmica. A

densidade é geralmente baixa em comparação com os metais e os materiais cerâmicos, o que significa que os polímeros são frequentemente utilizados para reduzir o peso de produtos sem sacrificar a resistência. O ponto de fusão e o ponto de ebulição são geralmente baixos em comparação a outros materiais, o que pode ser muito útil dependendo da aplicação. A resistência mecânica varia dependendo da natureza dos monômeros utilizados, das ligações químicas e da estrutura molecular. A resistência química depende da natureza do solvente, da temperatura e da duração da exposição. A condutividade elétrica e a resistência térmica podem ser altas ou baixas, dependendo também da natureza dos monômeros utilizados e da organização da estrutura molecular. O coeficiente de dilatação térmica é geralmente maior do que o de outros materiais, o que significa que os polímeros são mais suscetíveis a deformação sob temperaturas elevadas. [2]

## **2 IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE QUALIDADE DE POLÍMEROS**

O controle de qualidade de polímeros é essencial para garantir que os materiais produzidos atendam às especificações necessárias para sua aplicação final. Os polímeros são usados em uma ampla variedade de produtos, incluindo embalagens, componentes automotivos, dispositivos médicos, produtos eletrônicos, materiais de construção e muito mais.

O controle de qualidade ajuda a garantir que esses materiais poliméricos tenham as propriedades físicas, químicas e mecânicas necessárias para desempenhar seu papel de forma eficaz e segura. Alguns exemplos de propriedades que podem ser controladas incluem: densidade, resistência à tração, dureza, flexibilidade, estabilidade térmica e resistência química.

Além disso, caracterizar um material polimérico é de suma importância para conhecer mais a fundo sua estrutura e características. Análises termoquímicas como por exemplo Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimetria, são utilizadas para entender o comportamento de um determinado material em função da temperatura, por exemplo.

Ao realizar um controle de qualidade rigoroso, as empresas podem minimizar os riscos de falhas de produção e garantir que seus produtos atendam às expectativas dos clientes. Além disso, um controle de qualidade eficaz pode ajudar a reduzir custos, pois problemas de qualidade podem levar a retrabalhos e atrasos na produção.

## 2.1 NORMAS

As normas e regulamentações para o controle de qualidade de polímeros são importantes para garantir que esses materiais sejam produzidos de acordo com padrões específicos e que atendam aos requisitos de qualidade estabelecidos pela indústria e pelos órgãos regulatórios.

Essas normas são estabelecidas por organizações como a ISO (Organização Internacional de Normalização), ASTM (Sociedade Americana de Testes e Materiais) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), e são aplicáveis a diversos tipos de polímeros, incluindo plásticos, borrachas e resinas.

As normas para materiais poliméricos estabelecem padrões de desempenho, testes e métodos de ensaio para avaliar propriedades físicas, químicas e mecânicas. A Figura 2, por exemplo, nos mostra a norma ASTM D1238:2023 [3] do ensaio de Índice de Fluidez, mostrando os componentes do equipamento (com suas respectivas dimensões), os métodos de ensaio (caso tenha mais de um), como reportar os resultados obtidos, entre outros. Tudo isso para o ensaio em questão estar dentro dos padrões daquela norma em específico.

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: D1238 – 23

### Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D1238; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

**Figura 2:** Norma ASTM D1238, versão 2023, para ensaio de MFI.

(Fonte: Referência [3])

Cada ensaio realizado possui sua respectiva norma, dependendo do que se está trabalhando, alguns exemplos incluem:

- Calorimetria Exploratória Diferencial: ISO 11357-1, ISO 11357-2, ISO 11357-3, ASTM D3418; [4,5,6,7]
- Termogravimetria: ISO 11358, ASTM D6370, ASTM E1131; [8,9,10]

- Envelhecimento Térmico: ASTM D3045, ASTM D573; [11,12]
- Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier: ASTM E1252; [13]
- Densidade por Imersão: ISO 1183, ASTM D792; [14,15]
- Teor de Cinzas: ISO 3451-1, ASTM D5630; [16,17]
- Dureza: ISO 868, ASTM D2240; [18,19]
- Índice de Fluidez: ISO 1133-1, ASTM D1238; [20,3]
- Tração: ISO 527-1, ISO 527-2, ISO 527-3, ASTM D638, ASTM D412, ASTM D624, ASTM D882; [21,22,23,24,25,26,27]
- Flexão: ISO 178, ASTM D790; [28,29]

É de importância saber que o mesmo ensaio pode ter mais de uma norma na qual todas tratam do mesmo assunto, a diferença está na variação da técnica utilizada. Se pegarmos novamente como exemplo o ensaio de Índice de Fluidez, na qual temos duas principais normas que regem ISO 1133 e ASTM D1238. Ambas tratam do mesmo assunto, porém, há algumas diferenças como, por exemplo, o tempo de pré-aquecimento do ensaio (que é o tempo que a amostra deve ficar dentro do equipamento antes do início do ensaio) na qual para a ISO 1133 esse tempo é de 5 minutos e para a ASTM D1238 esse tempo é de 7 minutos. Essa diferença nos dá resultados diferentes se comparadas, porém, ambas estão corretas pois seguem sua respectiva norma. O importante nesse caso é o analista, ou a empresa envolvida nesse ensaio, ter conhecimento de qual norma será utilizada.

Além disso, algumas normas requerem um condicionamento das amostras que serão utilizadas no ensaio. Ou seja, antes do ensaio a amostra deverá ser condicionada, em uma determinada faixa de temperatura e umidade, a fim de não alterar propriedades físicas e químicas da mesma. Além desse condicionamento pré-ensaio, algumas normas também têm a necessidade de o ensaio ser realizado em uma faixa de temperatura e umidade pré-determinada, como é o exemplo da norma ASTM D792 (que rege o ensaio de Densidade), que exige a realização do ensaio dentro de uma faixa de temperatura que varia de 21 °C a 25 °C e uma umidade que varia de 40% a 60% (normalmente isso é tratado como uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C e umidade de  $50 \pm 10\%$ ).

Dessa forma, a importância dessas normas está relacionada à necessidade de garantir a segurança e a confiabilidade dos produtos fabricados, bem como a sua eficácia em aplicações específicas. A falta de controle de qualidade pode levar a produtos defeituosos ou inadequados, o que pode resultar em prejuízos financeiros e riscos à saúde e à segurança dos usuários.

## **2.2 MÉTODO DE ANÁLISE E ENSAIOS**

Existem diversas técnicas de caracterização para polímeros, sendo que as principais são as térmicas, químicas e mecânicas. As técnicas de caracterização térmicas incluem métodos como a Calorimetria Exploratória Diferencial, Termogravimetria e Envelhecimento Térmico. As técnicas de caracterização químicas incluem análises como a Espectroscopia no Infravermelho, Densidade por Imersão e Teor de Cinzas. Já as técnicas de caracterização mecânicas incluem análises como Dureza, Índice de Fluidez, Tração e Flexão.

Alguns ensaios como Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimetria, não necessitam de uma preparação da amostra antes do ensaio, podendo ser retirada uma fração para o ensaio diretamente do material polimérico em questão. Outros ensaios, como os ensaios mecânicos, principalmente Tração e Flexão, há a necessidade de se preparar corpos de prova para a análise. Essa preparação é fundamental nesse tipo de ensaio pois permite obter informações precisas e confiáveis sobre as propriedades mecânicas e físicas desse material. Os corpos de prova são amostras representativas do material que serão submetidas a ensaios padronizados, permitindo avaliar suas propriedades sob diferentes condições de carga, temperatura, umidade, entre outras variáveis.

Além disso, a preparação adequada dos corpos de prova é essencial para garantir a reprodutibilidade dos resultados obtidos nos ensaios. Isso significa que, se os corpos de prova não forem preparados corretamente, os resultados dos ensaios podem ser inconsistentes e não confiáveis, o que compromete a qualidade e a confiabilidade dos dados obtidos. Essa preparação é sempre descrita na norma utilizada, na qual especifica as dimensões que devem ser atendidas. Por exemplo, o corpo de prova que deve ser utilizado em um ensaio de tração deve ter uma espessura, comprimento e largura específicos. Isso faz com que, nesse exemplo, o corpo de prova tenha uma forma específica, como mostra a Figura 3. Importante

reforçar que, normalmente, o corpo de prova é produzido através de uma máquina injetora, que, através de altas temperatura e moldes com dimensões normativas, transforma a matéria-prima polimérica (Figura 4) em corpos de prova, como o do exemplo (Figura 3). Esse processo é chamado de Injeção e o corpo de prova resultante é comumente chamado de corpo de prova injetado.



**Figura 3:** Corpo de prova de Tração.



**Figura 4:** Matéria-prima polimérica.

Nos ensaios mostrados nesse presente trabalho foram utilizadas amostras que, por motivos de natureza confidencial, não podem ser identificadas. Essa dissertação irá mencionar as técnicas, os fundamentos e, no final de cada técnica, trará exemplos e resultados práticos, para um bom entendimento do tema. Nesse caso foram utilizadas quatro amostras diferentes, classificadas como amostras A, B, C e D. A amostra A foi utilizada no ensaio de Espectroscopia no Infravermelho; a amostra B foi utilizada nos ensaios de Envelhecimento Térmico, Densidade por Imersão, Índice de Fluidez, Tração, Flexão e Teor de Cinzas; a amostra C foi utilizada no ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial; e a amostra D foi utilizada nos ensaios de Termogravimetria e Dureza.

### **2.2.1 Calorimetria Exploratória Diferencial**

Calorimetria Exploratória Diferencial ou Calorimetria Diferencial de Varredura ou DSC (Differential Scanning Calorimetry) é uma técnica analítica que permite medir as mudanças de energia térmica que ocorrem em um determinado material em função da temperatura imposta, utilizando um equipamento apropriado (Figura 5). [30]



**Figura 5:** Equipamento de DSC.

Em um ensaio de DSC, o material é aquecido ou resfriado em uma taxa constante enquanto sua energia térmica é medida. A diferença entre a quantidade de energia absorvida ou liberada pelo material e a energia necessária para aquecer ou resfriar uma amostra de referência é plotada em uma curva de temperatura vs. fluxo de calor. Isso permite a identificação de mudanças de fase, transições térmicas, eventos de fusão, cristalização e outras alterações no material.

Nessa análise podem ser feitos dois aquecimentos na mesma amostra para se obter resultados mais confiáveis, uma vez que o primeiro aquecimento remove qualquer histórico térmico da amostra (até mesmo algum solvente ou resíduo contido nela) e o segundo aquecimento já nos dá uma curva mais fiel do material.

A DSC é amplamente utilizada para caracterizar polímeros, uma vez que as propriedades térmicas dos polímeros são altamente influenciadas pela estrutura e organização molecular. Abaixo estão alguns exemplos de como a DSC pode ser usada para analisar polímeros:

1. Determinação da Temperatura de Transição Vítreia ( $T_g$ ): A  $T_g$  é característica de materiais amorfos, e consiste da temperatura na qual ocorre a passagem do estado vítreo para um estado onde as cadeias poliméricas possuem uma mobilidade maior, ou seja, possibilidade de

mudança de conformação. Essa transição não ocorre de repente, ou seja, em uma única temperatura, mas sim ao longo de uma faixa. Porém, para cálculos, a  $T_g$  acaba sendo o valor médio dessa faixa de temperatura.

2. Determinação da Temperatura de Fusão ( $T_m$ ): É a temperatura na qual desaparece totalmente a cristalinidade, também chamada de ponto de fusão. Essa temperatura corresponde, aproximadamente, ao máximo do pico de fusão na curva de DSC.
3. Cristalização: Os polímeros semicristalinos podem cristalizar a partir do estado fundido ou do estado amorfo. A cristalização pode ser detectada pela DSC como um pico exotérmico. A taxa de resfriamento pode afetar a cristalização do polímero, com isso a DSC pode ser usada para estudar o efeito da taxa de resfriamento na cristalização. [31]

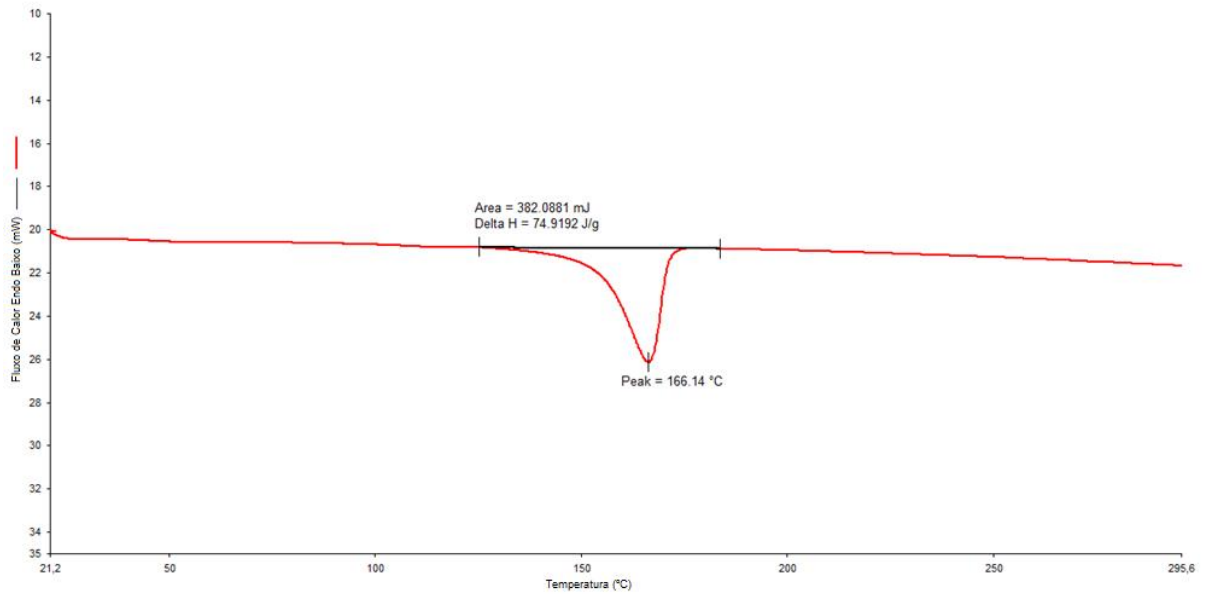
Em um ensaio de DSC realizado na amostra C, algumas condições são seguidas, como por exemplo a faixa de temperatura que se quer analisar, a taxa desse aquecimento, além do gás utilizado como atmosfera controlada. Na Tabela 1 é mostrada um exemplo dessas condições, além da norma utilizada para a realização desse ensaio.

**Tabela 1:** Condições de ensaio de DSC.

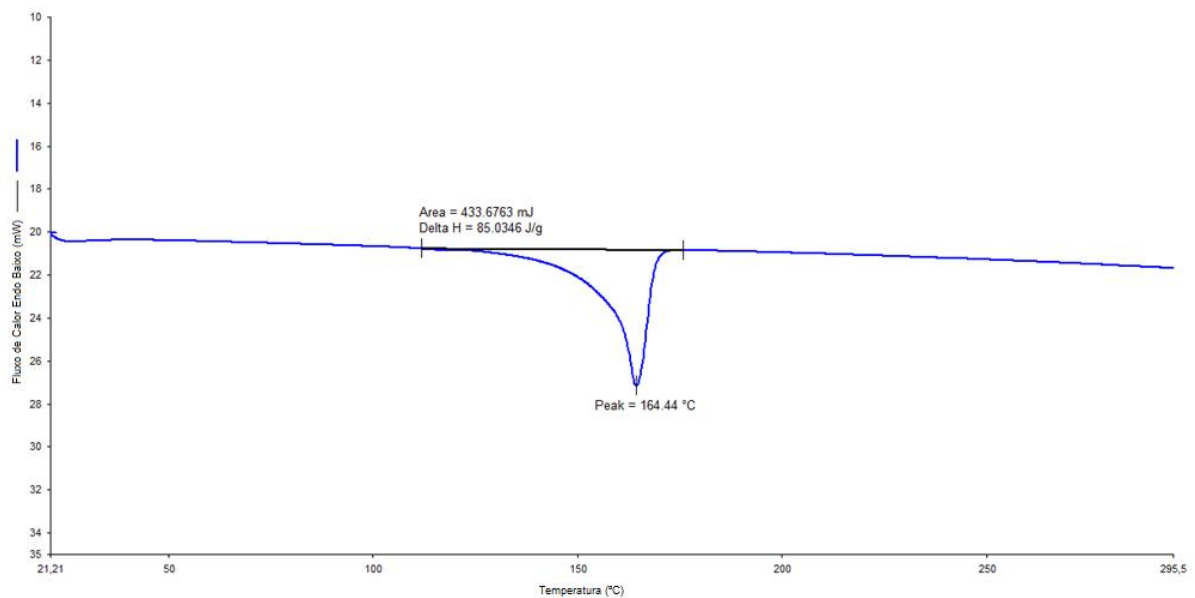
<b>Norma de referência:</b> ASTM D3418:2012				
<b>Equipamento:</b> PerkinElmer – DSC-6000				
<b>Massa da amostra (mg):</b> 5,100				
<b>Porta amostra:</b> Cadinho de Alumínio				
<b>Etapa</b>	<b>Faixa de Temperatura (°C)</b>	<b>Taxa de aquecimento (°C/min)</b>	<b>Gás utilizado</b>	<b>Vazão do Gás (mL/min)</b>
<b>1º Aquecimento</b>	23 a 300	10	N <sub>2</sub>	50
<b>2º Aquecimento</b>	23 a 300	10	N <sub>2</sub>	50

Utilizando as condições da Tabela 1, duas curvas de DSC podem ser obtidas. As Figuras 6 e 7 mostram as duas curvas, para o primeiro e segundo aquecimento,

respectivamente. Nas Figuras é possível extrair, por exemplo, a  $T_m$ , sendo que no primeiro aquecimento esse valor é igual a 166,14 °C e no segundo aquecimento é igual a 164,44 °C.



**Figura 6:** Curva de DSC – 1º Aquecimento.



**Figura 7:** Curva de DSC – 2º Aquecimento.

### 2.2.2 Termogravimetria

A Termogravimetria (TG) ou Análise Termogravimétrica (TGA) é uma técnica analítica que mede a variação da massa de uma determinada amostra em função da temperatura ou tempo, sob uma atmosfera controlada. A TGA é amplamente utilizada para a avaliação da estabilidade térmica de materiais poliméricos, que é uma importante propriedade desses materiais, uma vez que a decomposição térmica pode afetar a integridade estrutural e as propriedades mecânicas desses materiais. A TGA pode ser usada para determinar a temperatura de início de decomposição térmica, a temperatura máxima de decomposição e a quantidade de resíduos após a decomposição completa. A Figura 8 mostra um equipamento de TGA em operação. [32]



**Figura 8:** Equipamento de TGA em operação.

Essa análise geralmente é realizada em uma amostra de alguns miligramas, aquecida sob uma atmosfera controlada, como nitrogênio, oxigênio ou ar sintético, e sua massa é monitorada continuamente. A partir dos dados obtidos, é possível

determinar a variação de massa da amostra em relação à temperatura ou tempo, e analisar a cinética da decomposição térmica da amostra.

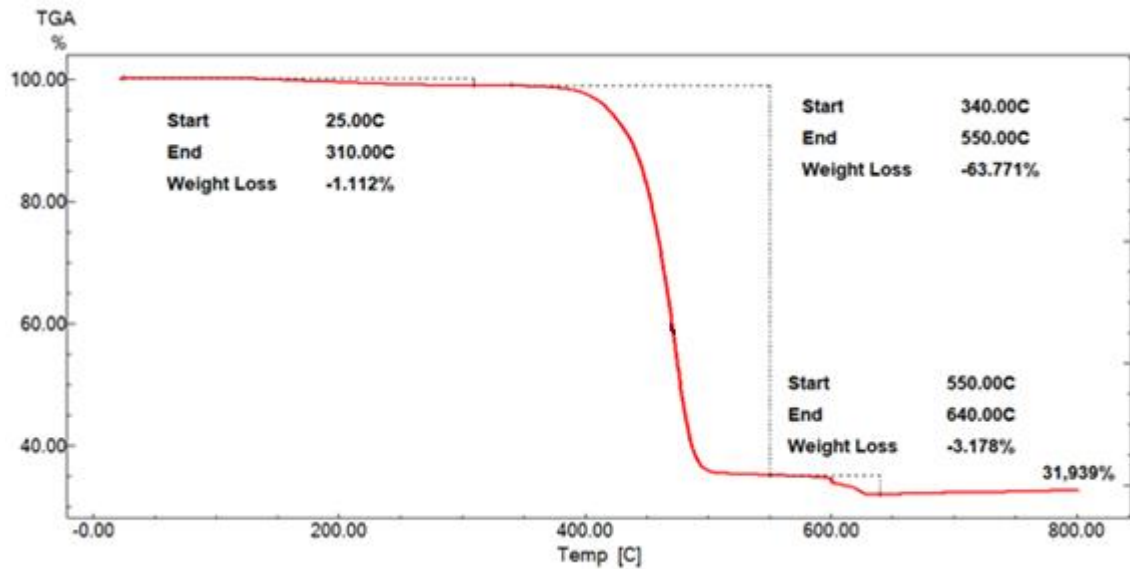
Essa técnica analítica é muito versátil, permitindo a determinação da estabilidade térmica de materiais em uma ampla faixa de temperatura e sob diferentes atmosferas, fornecendo informações importantes para o desenvolvimento de novos materiais e processos industriais.

As condições de um ensaio de TG são bem semelhantes à de um ensaio de DSC, como demonstrado na Tabela 2, porém, no caso da TG o principal objetivo é a perda de massa em função da temperatura.

**Tabela 2:** Condições de ensaio de TG.

<b>Norma de referência:</b> ASTM E1131:2014				
<b>Equipamento:</b> Shimadzu – TGA-50				
<b>Massa da amostra (mg):</b> 11,328				
<b>Suporte da amostra:</b> Platina				
<b>Etapa</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Taxa de aquecimento (°C/min)</b>	<b>Gás utilizado</b>	<b>Vazão do Gás (mL/min)</b>
<b>1</b>	25 a 600	10	N <sub>2</sub>	50
<b>2</b>	600	Isoterma de 5 minutos	N <sub>2</sub>	50
<b>3</b>	600 a 800	10	O <sub>2</sub>	50

Dessa forma, analisando a amostra D e utilizando as condições descritas na Tabela 2, obtemos uma curva de massa (%) vs. temperatura (°C), mostrada na Figura 9.



**Figura 9:** Curva de TG em função da temperatura.

A interpretação dessas perdas de massa é descrita na Tabela 3, na qual no final do ensaio, em 800 °C, obtemos 31,9% de resíduo estável. Dessa forma conseguimos analisar como essa amostra se comporta frente a um aumento de temperatura em uma atmosfera controlada de interesse.

**Tabela 3:** Resumo dos resultados de TG.

Faixa de Temperatura (°C)	Perda de massa (%)	Resíduo estável a 800°C (%)
25 a 310	1,11	31,9
340 a 550	63,77	
550 a 640	3,18	

### 2.2.3 Envelhecimento Térmico

O Envelhecimento Térmico é um processo em que um material é exposto a temperaturas elevadas durante um determinado período de tempo, resultando em mudanças nas suas propriedades físicas e químicas, que incluem mudanças na cor, no brilho, na dureza e na resistência mecânica do material. Esse processo ocorre devido às reações químicas que ocorrem dentro do material, que podem levar a mudanças na estrutura molecular e na microestrutura.

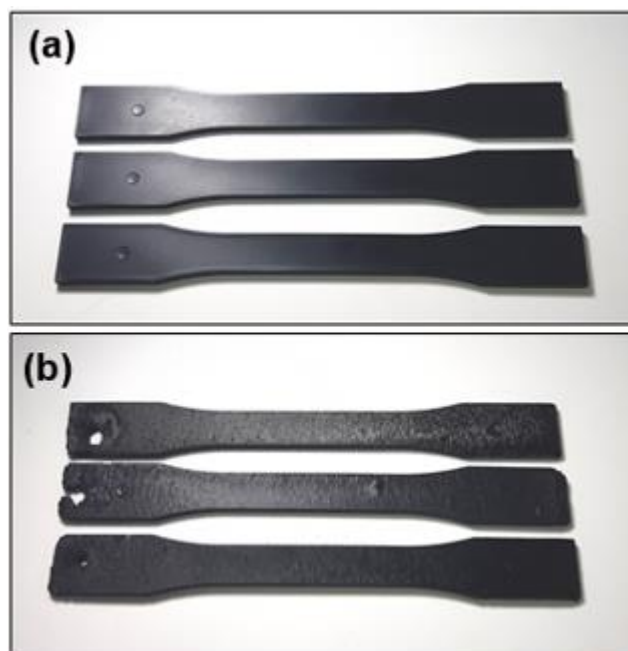
O Envelhecimento Térmico em materiais poliméricos pode ser feito utilizando uma estufa com controle de temperatura, onde essa temperatura pode variar dependendo do tipo de polímero, do tempo de exposição e das condições de exposição.

Quando uma amostra passa por um processo de envelhecimento térmico é importante que a amostra seja ensaiada em, no mínimo, triplicata. A Tabela 4 fornece condições de um ensaio de Envelhecimento Térmico realizado na amostra B.

**Tabela 4:** Condições de Envelhecimento Térmico.

<b>Norma de referência:</b> ASTM D573:2010
<b>Equipamento:</b> Estufa NewLab – NL82-64
<b>Temperatura do ensaio:</b> 150 °C
<b>Tempo de ensaio:</b> 235 horas
<b>Data de início do ensaio:</b> 17/07/2020 às 14:00 horas
<b>Data de término do ensaio:</b> 27/07/2020 às 09:00 horas

A Figura 10 mostra uma análise visual do material analisado, antes e após o envelhecimento.



**Figura 10:** Análise visual dos corpos de prova (a) antes e (b) após a realização do Envelhecimento Térmico.

Nesse caso o envelhecimento foi finalizado em 235 horas, devido a amostra apresentar indícios de degradação. Como esse ensaio é muito visual, para mostrar as mudanças nas propriedades do mesmo o parâmetro mais importante são as fotos antes do ensaio e ao final do ensaio para se analisar detalhadamente as mudanças ocorridas.

#### 2.2.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier ou FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) é uma técnica de análise espectroscópica que utiliza a radiação infravermelha para identificar as moléculas presentes em uma determinada amostra.

Na análise de FTIR, um espectrofotômetro (Figura 11) mede a absorção da radiação infravermelha pela amostra em diferentes comprimentos de onda. A amostra é irradiada com radiação infravermelha e a radiação absorvida é medida em função do comprimento de onda. O resultado é um espectro que representa a quantidade de radiação absorvida em cada comprimento de onda. [33]



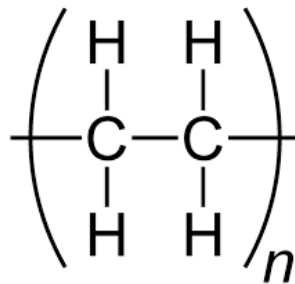
**Figura 11:** Espectrofotômetro Bruker, modelo Alpha II.

Os espectros de FTIR são úteis para identificar os grupos funcionais presentes em uma amostra. O espectro de uma determinada amostra pode mostrar bandas características de grupos funcionais como hidroxilas, aminas, amidas, ésteres, carbonilas, entre outros. [34]

Em polímeros, a técnica de FTIR é muito útil pois permite identificar os grupos funcionais presentes na molécula e, conseqüentemente, obter informações importantes sobre a estrutura química do material, isso devido ao fato de cada polímero possuir um espectro característico, no qual cada banda está relacionada a um grupamento funcional da estrutura do material. Nesse caso o procedimento padrão para identificação de um polímero através de um espectro de FTIR desconhecido é compará-lo a um espectro já conhecido e contido em bibliotecas de espectros de FTIR. Considera-se que, se dois espectros são similares, as moléculas de ambas as amostras serão semelhantes.

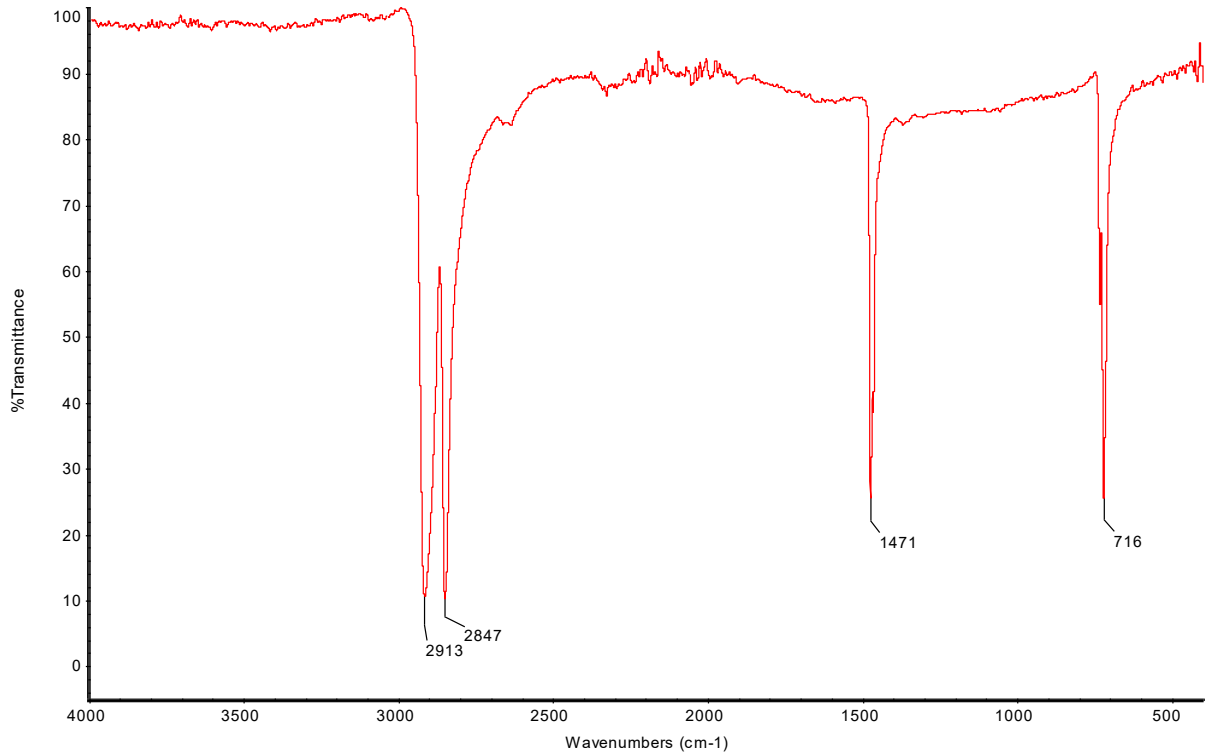
Nos tópicos a seguir são apresentados três exemplos de espectros de alguns dos polímeros mais utilizados industrialmente, assim como sua estrutura química e grupamentos químicos característicos.

#### 1. Polietileno (PE)



**Figura 12:** Estrutura química do Polietileno.

No caso do Polietileno (Figura 12), o espectro característico é mostrado na Figura 13, indicando na Tabela 5 os grupamentos característicos. Nesse caso é possível observar bandas de absorção referentes a hidrocarboneto alifático saturado metileno (CH<sub>2</sub>), característica dessa molécula.

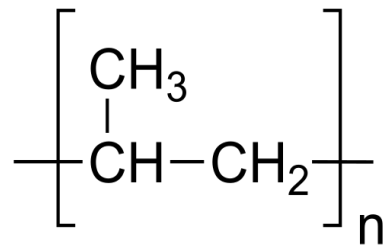


**Figura 13:** Espectro no infravermelho característico de Polietileno.

**Tabela 5:** Grupamentos químicos característicos do Polietileno.

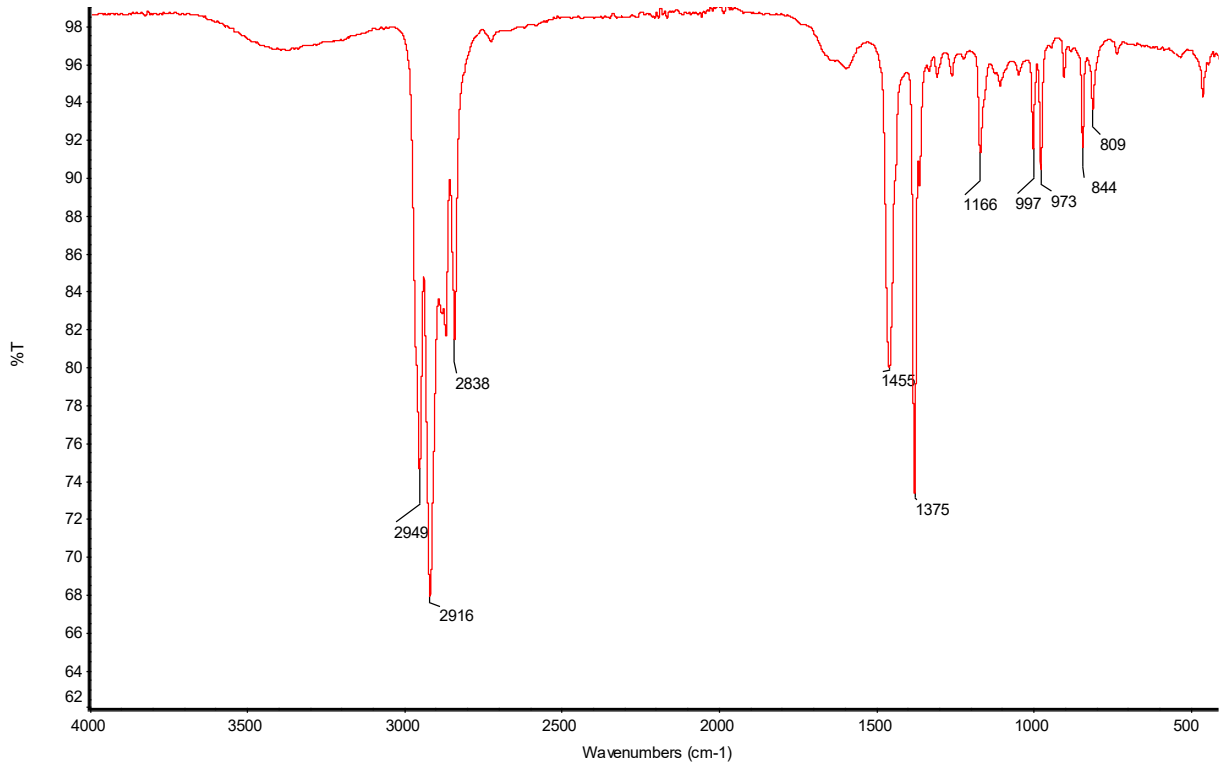
Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupamento característico
2913	Deformação axial assimétrica CH <sub>2</sub>
2847	Deformação axial simétrica CH <sub>2</sub>
1471	Deformação angular de CH <sub>2</sub>
716	Deformação angular de CH <sub>2</sub> em cadeia longa

## 2. Polipropileno (PP)



**Figura 14:** Estrutura química do Polipropileno.

No caso do Polipropileno (Figura 14), o espectro característico é mostrado na Figura 15, indicando na Tabela 6 os grupamentos característicos. Nesse caso é possível observar bandas de absorção referentes a hidrocarboneto alifático saturado de metila ( $\text{CH}_3$ ) e metileno ( $\text{CH}_2$ ), característica dessa molécula.

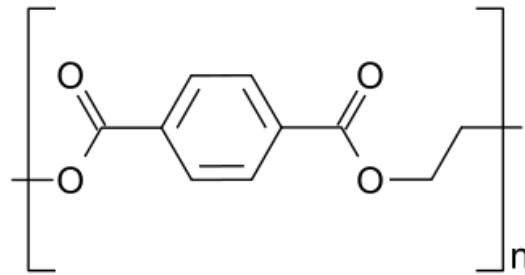


**Figura 15:** Espectro no infravermelho característico de Polipropileno.

**Tabela 6:** Grupamentos químicos característicos do Polipropileno.

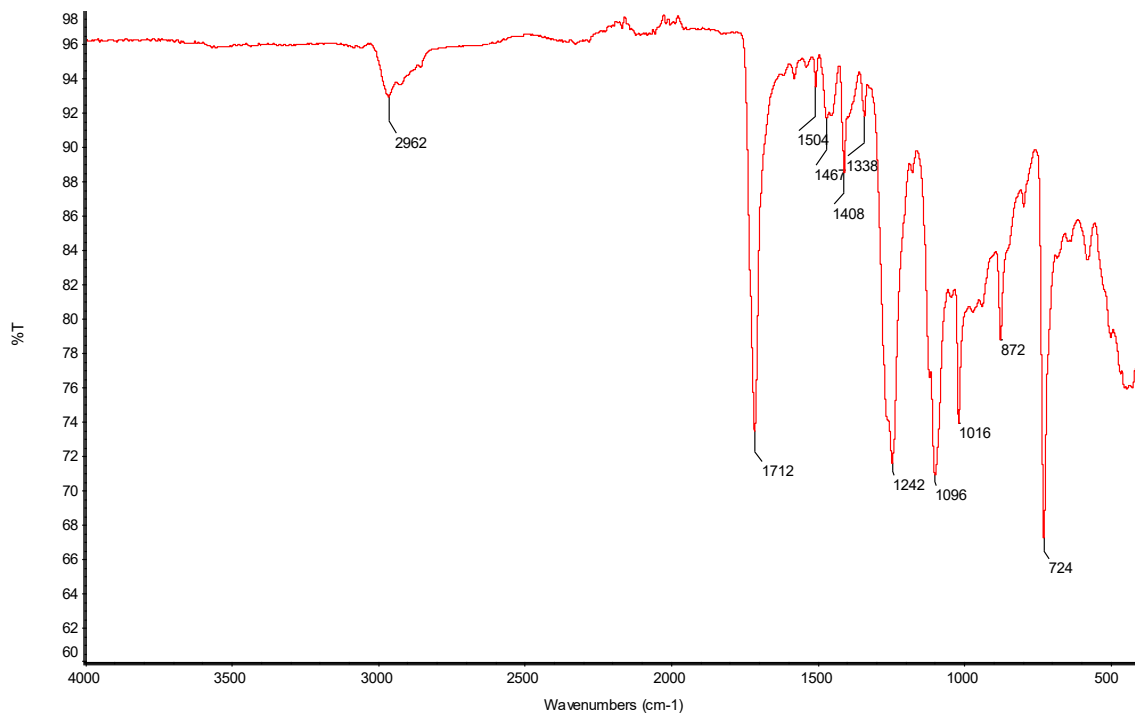
Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupamento característico
2949	Deformação axial assimétrica de $\text{CH}_3$
2916	Deformação axial assimétrica de $\text{CH}_2$
2838	Deformação axial simétrica de $\text{CH}_2$
1455	Deformação angular de $\text{CH}_2$
1375	Deformação angular de $\text{CH}_3$
1166	Deformação angular de $\text{CH}$ ; deformação axial de $\text{C-C}$
997	Deformação angular de $\text{CH}$ e $\text{CH}_3$
973	Deformação angular de $\text{CH}_3$ ; deformação axial de $\text{C-C}$
844	Deformação axial de $\text{C-CH}_3$ em cadeia longa
809	Deformação angular de $\text{CH}_2$ ; deformação axial de $\text{C-C}$

### 3. Polietileno Tereftalato (PET)



**Figura 16:** Estrutura química do Polietileno Tereftalato.

No caso do Polietileno Tereftalato (Figura 16), o espectro característico é mostrado na Figura 17, indicando na Tabela 7 os grupamentos característicos. Nesse caso é possível observar bandas de absorção referentes a grupamentos metileno ( $\text{CH}_2$ ), aromático p-substituído e carboxila de éster ( $(\text{C}=\text{O})\text{O}$ ), os quais são característicos de poliésteres aromáticos, como o Polietileno Tereftalato.



**Figura 17:** Espectro no infravermelho característico de Polietileno Tereftalato.

**Tabela 7:** Grupamentos químicos característicos do Polietileno Tereftalato.

Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupamento característico
2962	Deformação axial assimétrica de CH <sub>3</sub>
1712	Deformação axial de C=O
1504 – 1467	Deformação axial de C=C aromático
1408	Deformação angular de CH <sub>2</sub>
1338	Deformação angular de CH <sub>3</sub>
1242	Deformação axial de ((C=O)O)
1096 – 1016	Deformação axial de C-O
872	Deformação angular de C-H fora do plano em anel aromático <i>para</i> substituído
724	Deformação angular de CH <sub>2</sub>

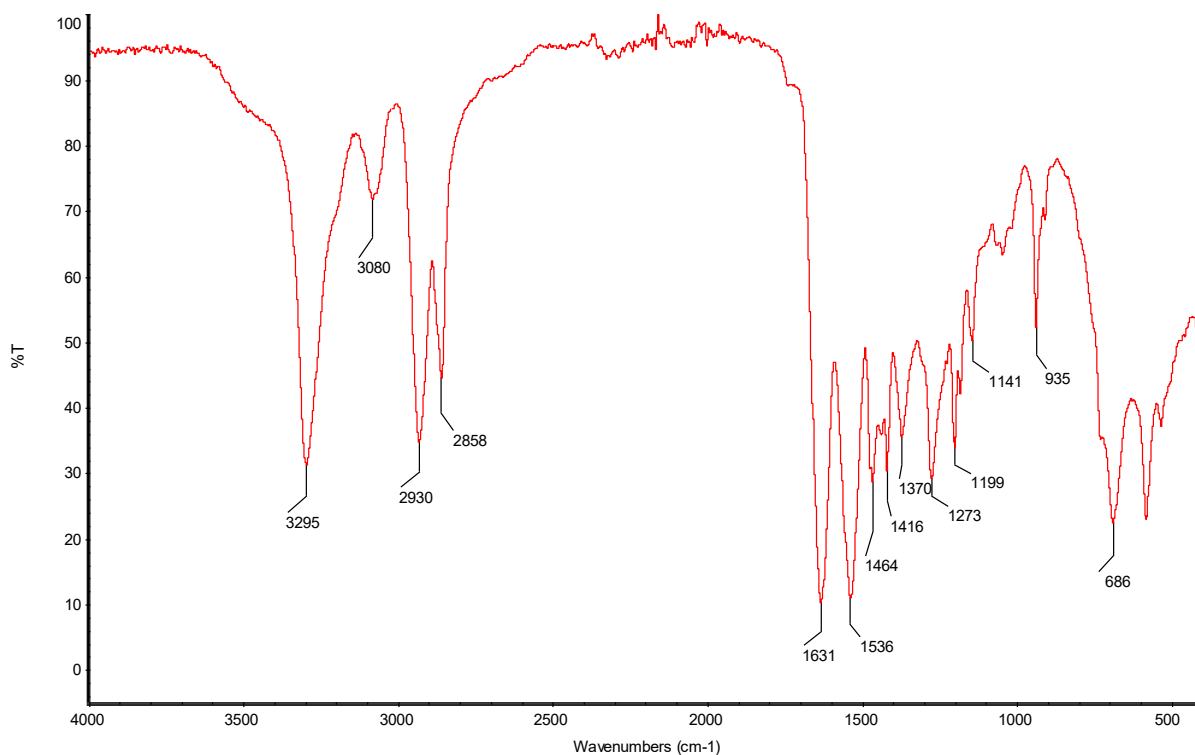
Por vezes, pode-se identificar bandas de absorção associadas a grupamentos oxigenados (C=O), nitrogenados (C-N ou N-H) ou insaturações (C=C), os quais não estão associados à estrutura química do polímero analisado, sendo possivelmente relacionados à aditivação da amostra ou ainda indícios de uma possível degradação do material.

Dessa forma, ao se realizar um ensaio de FTIR, algumas condições são seguidas. A Tabela 8 nos mostra condições de um ensaio de FTIR realizado em uma amostra polimérica (amostra A) para caracterizá-la.

**Tabela 8:** Condições de ensaio de FTIR.

<b>Norma de referência:</b> ASTM E1252:2013
<b>Equipamento:</b> Espectrofotômetro Bruker – Alpha II
<b>Modo de operação:</b> Refletância
<b>Preparação da Amostra:</b> ATR diretamente na amostra
<b>Condições:</b> 32 repetições, leitura de 4000 a 400 cm <sup>-1</sup>

Na Figura 18 é apresentado o espectro resultante da análise de FTIR da amostra, e as bandas de absorção dos grupamentos químicos característicos estão apresentados na Tabela 9.

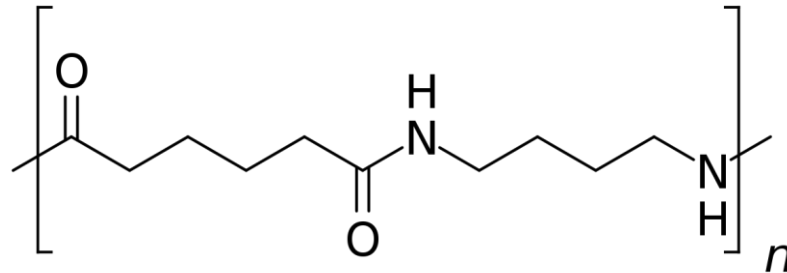


**Figura 18:** Espectro no infravermelho da amostra analisada.

**Tabela 9:** Grupamentos químicos presentes na amostra analisada.

Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupamento característico
3295	Deformação axial de NH
3080	Deformação axial assimétrica de CH
2930	Deformação axial assimétrica de CH <sub>2</sub>
2858	Deformação axial simétrica de CH <sub>2</sub>
1631	Deformação axial de C=O
1536	Deformação angular de NH; Deformação axial de C-N
1464	Deformação angular de CH <sub>2</sub>
1370	Deformação angular de CH <sub>3</sub>
1273	Deformação angular de NH; Deformação axial de C-N
1199	Deformação angular de CH <sub>2</sub>
1141	Deformação axial de C-O
935	Deformação axial de C-C
686	Deformação angular de NH; deformação angular de C=O

O espectro mostrado na Figura 18 evidencia, por exemplo, bandas de absorção referentes a grupamentos metileno (CH<sub>2</sub>), amino (NH) e carboxila de amida ((C=O)N), podendo caracterizá-la como Poliamida (PA), conforme estrutura apresentada na Figura 19.

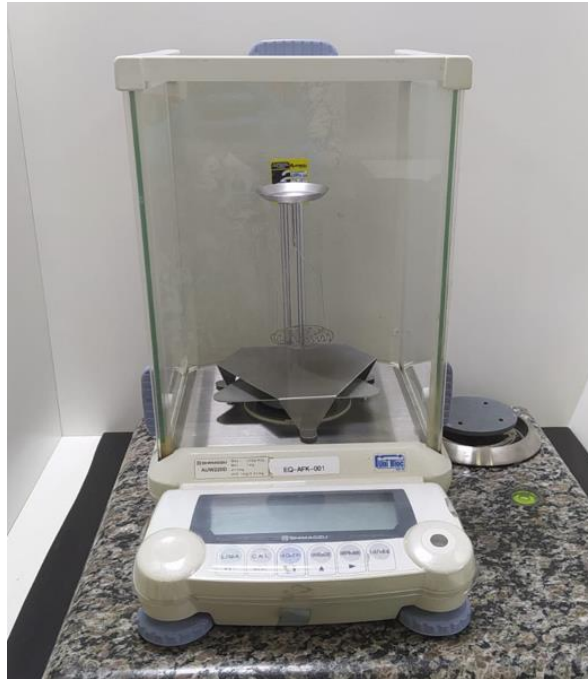


**Figura 19:** Estrutura química da Poliamida (PA).

### 2.2.5 Densidade por Imersão

A Densidade por Imersão é uma técnica utilizada para medir a densidade de objetos, baseada na diferença entre o peso do objeto no ar e o peso do objeto submerso em um líquido de densidade conhecida (na maioria das vezes água ou etanol). Essa técnica é bastante precisa e útil em diversas áreas, como na indústria de materiais, na química e na geologia. [15]

Algumas balanças analíticas já possuem um mecanismo automático para calcular a densidade de um objeto por imersão (Figura 20). Esse mecanismo relaciona o peso do objeto submerso e a densidade do líquido de imersão, para calcular a densidade do objeto. Essa funcionalidade é muito útil para agilizar a medição de densidade de materiais e minimizar erros humanos.



**Figura 20:** Balança analítica SHIMADZU com mecanismo automático de cálculo de densidade.

Ao se medir a densidade de um material polimérico, inicialmente podemos fazê-lo em água ou em etanol. Para escolher o líquido de imersão, basta submergir a amostra no mesmo. Caso o material boie em água, por exemplo, o mais indicado seria realizar o ensaio em etanol. No exemplo dado da Tabela 10, a análise da amostra B foi realizada em etanol, utilizando uma balança que possui um mecanismo automático de cálculo da densidade da amostra. Os resultados desse ensaio são encontrados na Tabela 11, onde foram ensaiados 5 corpos de prova para a mesma amostra B, a fim de obtermos um resultado mais preciso.

**Tabela 10:** Condições de ensaio de Densidade.

<b>Norma de referência:</b> ASTM D792:2013
<b>Método:</b> B (Álcool)
<b>Equipamento:</b> Balança Analítica Shimadzu – AUW220D
<b>Temperatura do ambiente (°C):</b> 22,9
<b>Umidade do ambiente (%):</b> 49
<b>Temperatura do fluido de imersão (°C):</b> 23,0
<b>Fluido de Imersão:</b> Etanol
<b>Densidade do fluido de Imersão (g/cm³):</b> 0,7902

**Tabela 11:** Resultados de ensaio de Densidade.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Média (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	0,9085	0,9087
<b>2</b>	0,9097	
<b>3</b>	0,9086	
<b>4</b>	0,9078	
<b>5</b>	0,9089	

### 2.2.6 Teor de Cinzas

O Teor de Cinzas é uma medida da quantidade de material inorgânico deixado após a queima completa de uma determinada amostra. É comumente usado para avaliar a pureza de substâncias orgânicas, como polímeros, alimentos e produtos farmacêuticos.

O processo de determinação do teor de cinzas envolve a queima completa de uma amostra em um forno de alta temperatura, normalmente uma mufla (Figura 21), geralmente a uma temperatura de 600 a 800 °C (Fonte: Referências [16] e [17]). Durante a queima, todo o material orgânico é oxidado e vaporizado, deixando apenas o material inorgânico como resíduo. Esse resíduo é então pesado e o teor de cinzas calculado.



**Figura 21:** Mufla UP Brasil.

Em polímeros, o Teor de Cinzas pode ser usado para avaliar a presença de cargas inorgânicas, como sílica ou talco, que são frequentemente adicionados para melhorar as propriedades mecânicas do material. Por exemplo, um polímero com teor de cinzas elevado pode indicar que foi adicionado uma grande quantidade de cargas inorgânicas, o que pode melhorar a resistência ao impacto e à abrasão do material. [17]

No entanto, o Teor de Cinzas também pode ser um indicador de contaminação ou impureza em polímeros. Por exemplo, a presença de impurezas (como restos de solventes ou catalisadores) pode aumentar o teor de cinzas de uma amostra, indicando que ela pode não ter sido completamente purificada.

As condições de uma análise de Teor de Cinzas estão mostradas na Tabela 12 e os resultados mostrados na Tabela 13, na qual obteve-se um teor de cinzas de 1,397% para a amostra B, indicando que, em média, a amostra analisada possuía 13965 mg de carga inorgânica para cada 1 kg de amostra.

**Tabela 12:** Condições de ensaio de Teor de Cinzas.

<b>Norma de referência:</b> ISO 3451-1:2008
<b>Equipamento:</b> Mufla; Balança Analítica Shimadzu – AUW220D
<b>Temperatura do ambiente (°C):</b> 23,8
<b>Umidade do ambiente (%):</b> 40
<b>Temperatura de calcinação (°C):</b> 600
<b>Tempo de calcinação:</b> 1 hora
<b>Taxa de aquecimento (°C/min):</b> 20

**Tabela 13:** Resultados de ensaio de Teor de Cinzas.

<b>Amostra</b>	<b>Medidas (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>Média (mg/kg)</b>
<b>1</b>	1,421	1,397	13965
<b>2</b>	1,372		

### 2.2.7 Dureza

A dureza é uma propriedade física dos materiais que mede a resistência à deformação plástica ou à penetração. Existem várias escalas de dureza, mas uma das mais comuns é a Dureza Shore, que subdivide em duas escalas: Shore A e Shore D, que são usadas para medir a dureza de elastômeros e plásticos rígidos, respectivamente.

A escala Shore A varia de 0 a 100 e é medida com um durômetro Shore A (Figura 22) que consiste em uma agulha penetrante com uma ponta arredondada e um indicador de leitura. A amostra é colocada sobre uma superfície (denominada Mesa), e, com o auxílio de uma alavanca na lateral do equipamento, a ponta do durômetro é pressionada no material, resultando em um valor de dureza, indicado no visor digital do aparelho. Nesse caso, resultando em um valor de dureza na escala Shore A. [18]



**Figura 22:** Durômetro Shore A.

Já a escala Shore D também varia de 0 a 100, mas é medida com um durômetro Shore D (Figura 23), que tem uma ponta mais fina e mais aguda do que o durômetro Shore A. Nesse caso, semelhante ao Shore A, a ponta do durômetro Shore D é pressionada na superfície do material e a leitura indicada pelo aparelho é o valor de dureza na escala Shore D. [18]



**Figura 23:** Durômetro Shore D.

A dureza é uma propriedade importante para a seleção de materiais em diversas aplicações. Por exemplo, em peças de engenharia, é importante selecionar materiais com dureza adequada para suportar as cargas e as condições de uso. Em calçados é comum especificar materiais com dureza Shore A adequada para oferecer o amortecimento e a resistência ao desgaste necessário. Em peças de acabamento de interiores de automóveis é comum utilizar materiais com dureza Shore D adequada para garantir a resistência a arranhões e impactos.

Em um ensaio de Dureza Shore realizado na amostra D algumas condições são seguidas como mostra a Tabela 14, na qual, no exemplo, foi realizado na escala Shore A.

**Tabela 14:** Condições de ensaio de Dureza Shore.

<b>Norma de referência:</b> ASTM D2240:2015
<b>Equipamento:</b> Metrotokyo MTK-1040
<b>Temperatura do ambiente (°C):</b> 24,6
<b>Umidade do ambiente (%):</b> 57
<b>Tipo:</b> A
<b>Tempo de aplicação da carga (s):</b> 1
<b>Carga (kg):</b> 1

Utilizando as condições da Tabela 14, encontramos resultados de dureza como mostra a Tabela 15, na qual é uma dureza relativamente alta, lembrando que a escala varia de 0 a 100.

**Tabela 15:** Resultados de ensaio de Dureza.

<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	71,0	70,8
<b>2</b>	71,5	
<b>3</b>	70,5	
<b>4</b>	70,0	
<b>5</b>	71,0	

### 2.2.8 Índice de Fluidez

Índice de Fluidez ou MFI (Melt Flow Index) é uma medida da capacidade de um polímero derretido fluir através de um orifício (comumente chamado de Matriz) sob uma determinada pressão e temperatura. É um importante parâmetro de processamento que afeta a qualidade do produto final e a eficiência do processo.

O teste de Índice de Fluidez é feito em um equipamento adequado (Figura 24) e envolve a medição da quantidade de material fundido que flui através de uma matriz em um determinado intervalo de tempo. A unidade de medida do MFI é gramas por 10 minutos (g/10 min). Quanto maior o MFI, mais fluido é o polímero.



**Figura 24:** Equipamento de MFI NZ Philpolymer, modelo XRL-400.

O MFI pode ser usado para monitorar a qualidade do polímero durante o processamento. Uma diminuição no MFI pode indicar uma mudança na viscosidade do polímero, que pode afetar a qualidade do produto final. No entanto, é importante observar que o MFI não é uma medida da qualidade geral do material polimérico, mas sim um indicador da sua fluidez em um determinado processo.

Em um ensaio de MFI realizado na amostra B, as condições para realização estão descritas na Tabela 16. Nesse ensaio, o cálculo do MFI é feito através da

equação:  $MFI = \frac{600 \times m}{t}$ , na qual a constante 600 é o fator usado para converter gramas por segundo em gramas por 10 minutos,  $m$  é a massa extraída da amostra, em gramas e  $t$  é o tempo de corte, em segundos. O resultado então é dado em g/10 min, como mostra a Tabela 17.

**Tabela 16:** Condições de ensaio de MFI.

<b>Norma de referência:</b> ASTM D1238:2023
<b>Equipamento:</b> NZ Philpolymer – XRL-400
<b>Temperatura do ambiente (°C):</b> 22,4
<b>Umidade do ambiente (%):</b> 50
<b>Temperatura do ensaio (°C):</b> 230
<b>Tempo de pré-Aquecimento:</b> 7 minutos
<b>Tempo de corte:</b> 5 segundos
<b>Carga aplicada (kg):</b> 2,16

**Tabela 17:** Resultados de ensaio de MFI.

<b>Amostra</b>	<b>MFI (g/10min)</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	14,11	14,28
<b>2</b>	14,11	
<b>3</b>	13,68	
<b>4</b>	14,83	
<b>5</b>	14,69	

### 2.2.9 Tração

A tração é uma propriedade mecânica que mede a capacidade de um material de resistir à aplicação de uma força externa, força essa que tende a esticá-lo ou deformá-lo em um sentido específico. Em outras palavras, é a resistência de um material à tração ou alongamento quando submetido a uma força de tração.

Em polímeros, a tração é uma propriedade muito importante, pois muitos polímeros são utilizados em aplicações onde a resistência à tração é fundamental, como em fibras têxteis, filmes plásticos, peças estruturais, entre outros.

Para avaliar a tração de um polímero, é comum utilizar um teste mecânico conhecido como Teste de Tração. Esse teste é realizado em uma Máquina Universal de Ensaio (Figura 25), na qual uma amostra do material é submetida a uma força de tração gradual e contínua, e as mudanças na sua extensão são medidas, geralmente, em função da deformação. A partir dos resultados obtidos, é possível determinar a resistência à tração do material, bem como outras propriedades mecânicas importantes, como a elasticidade, a rigidez e a tenacidade. Por exemplo, o polietileno de alta densidade (PEAD) é um polímero utilizado em diversas aplicações, como em tubos, tanques, recipientes, entre outros. A resistência à tração do PEAD é uma propriedade importante, pois determina a capacidade do material de suportar a carga em que é submetido. O PEAD tem uma alta resistência à tração, o que o torna adequado para aplicações que exigem força e resistência. [35]



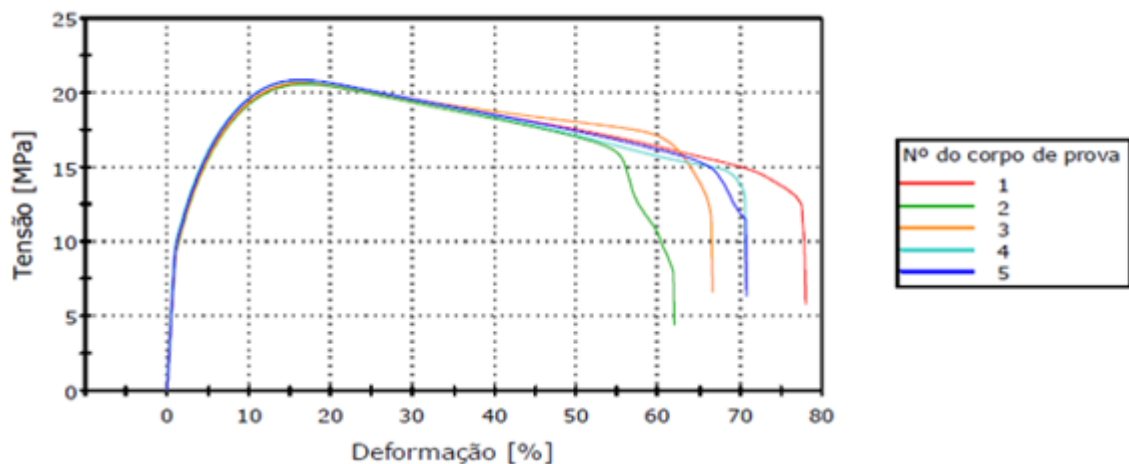
**Figura 25:** Máquina Universal de Ensaio Instron EMIC, realizando um ensaio de Tração.

A Tabela 18 mostra um exemplo de condições que são seguidas em um ensaio de Tração, na qual foi realizado em um corpo de prova ASTM D638 Tipo I da amostra B e, pelo tipo de corpo de prova, a distância entre as garras foi de 115 mm, uma vez que a distância entre garras depende diretamente do tipo de corpo de prova.

**Tabela 18:** Condições de ensaio de Tração.

<b>Norma de referência:</b> ASTM D638:2010
<b>Equipamento:</b> Instron EMIC – 23-30
<b>Temperatura do ambiente (°C):</b> 23,6
<b>Umidade do ambiente (%):</b> 49
<b>Número de corpos de prova:</b> 5
<b>Corpo de prova:</b> ASTM D638 Tipo I
<b>Largura do corpo de prova:</b> (12,81 ± 0,03) mm
<b>Espessura do corpo de prova:</b> (3,29 ± 0,01) mm
<b>Preparação do corpo de prova:</b> Injeção
<b>Célula de carga:</b> 5 kN
<b>Velocidade do ensaio:</b> 50 mm/min
<b>Distância entre garras:</b> 115 mm

A Figura 26 apresenta as curvas de tensão em função da deformação e a Tabela 19 apresenta os resultados das propriedades mecânicas desse material.



**Figura 26:** Curvas de Tensão vs. Deformação da amostra.

Percebe-se que quanto maior a deformação na ruptura, mais dúctil é o material. Nesse caso o corpo de prova 1 é o mais dúctil dentre os cinco (teve uma maior deformação sem que haja rompimento do mesmo). Além disso o módulo elástico em tração mostrado na Tabela 19 indica o quão rígido é um determinado material, mostrando que quanto maior o módulo mais rígido será esse material, como consequência disso o material deforma menos, quebrando mais facilmente.

**Tabela 19:** Resultados do ensaio de Tração.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Módulo elástico em Tração (GPa)</b>	<b>Deformação na ruptura (%)</b>
<b>1</b>	0,97	77,40
<b>2</b>	0,91	55,23
<b>3</b>	1,00	61,04
<b>4</b>	1,08	69,03
<b>5</b>	0,99	67,60
<b>Média</b>	0,99	66,06

### 2.2.10 Flexão

A flexão de um determinado material é a capacidade do mesmo de dobrar ou curvar sob tensão, sem quebrar ou romper. Essa propriedade é importante em muitas aplicações, como em peças de plástico, borracha e outros polímeros, onde a capacidade de resistir a flexão é crucial para o desempenho do produto.

A flexão é uma propriedade que está diretamente relacionada à estrutura molecular do material. Polímeros com cadeias longas tendem a ser mais flexíveis do que aqueles com cadeias curtas e rígidas. Além disso, a presença de ligações químicas entre as moléculas do polímero também pode afetar a flexibilidade do material. [35]

Assim como na Tração, a flexão de um material é avaliada por um teste mecânico conhecido como Teste de Flexão, realizado também em uma Máquina universal de ensaios (Figura 27), na qual aplica-se uma força sobre uma amostra do material que está apoiada em dois pontos de apoio, criando uma curvatura. A força é

aplicada gradualmente em uma taxa constante até que ocorra a ruptura ou até que uma deformação pré-determinada seja atingida.



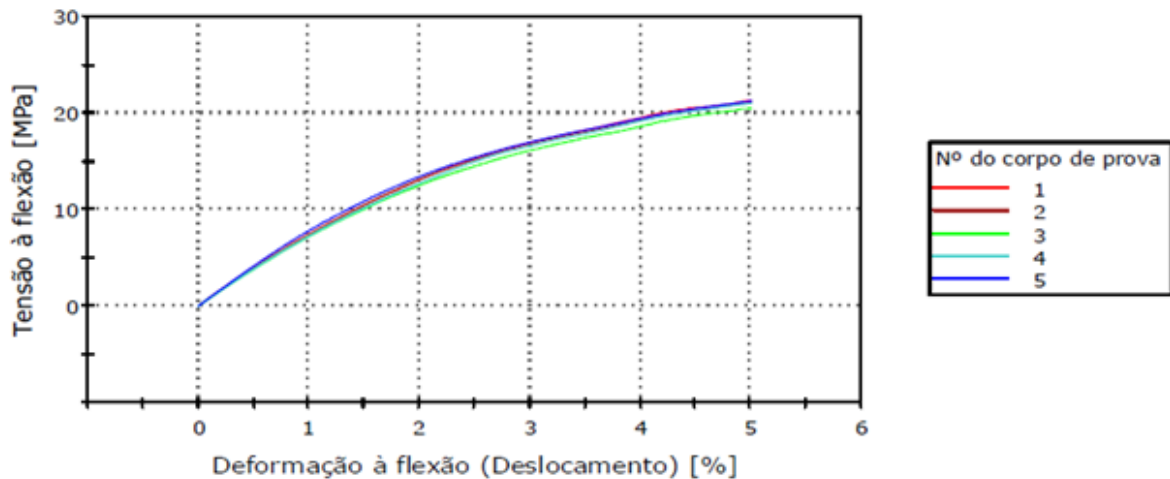
**Figura 27:** Máquina Universal de Ensaio Instron EMIC, realizando um ensaio de Flexão.

Em um ensaio de Flexão, realizado na amostra B, algumas condições são seguidas, conforme mostra a Tabela 20. Nesse ensaio, a distância entre os dois pontos de apoio (span) deve ser calculada conforme a norma de referência, a qual nesse caso é 16 vezes a espessura do corpo de prova.

**Tabela 20:** Condições de ensaio de Flexão.

<b>Norma de referência:</b> ASTM D790:2017
<b>Equipamento:</b> Instron EMIC – 23-30
<b>Temperatura do ambiente (°C):</b> 24,4
<b>Umidade do ambiente (%):</b> 49
<b>Número de corpos de prova:</b> 5
<b>Comprimento do corpo de prova:</b> (127 ± 2) mm
<b>Largura do corpo de prova:</b> (12,80 ± 0,03) mm
<b>Espessura do corpo de prova:</b> (3,34 ± 0,02) mm
<b>Célula de carga:</b> 5 kN
<b>Velocidade do ensaio:</b> 1,4 mm/min
<b>Span:</b> 52 mm

A Figura 28 apresenta as curvas de tensão em função da deformação à flexão e a Tabela 21 apresenta os resultados da análise desse material.

**Figura 28:** Curvas de Tensão vs. Deformação à flexão.

Nesse caso, assim como na tração, quanto maior o módulo elástico em flexão mais rígido é o material. Como indicado na Tabela 21, os valores dos módulos elásticos em flexão são bem próximos, indicando que os corpos de prova possuem praticamente a mesma rigidez.

**Tabela 21:** Propriedades mecânicas em Flexão.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Módulo elástico em Flexão (GPa)</b>
<b>1</b>	0,82
<b>2</b>	0,81
<b>3</b>	0,78
<b>4</b>	0,79
<b>5</b>	0,82
<b>Média</b>	0,80
<b>Desvio padrão</b>	0,02

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O controle de qualidade de polímeros é uma prática essencial na produção de materiais poliméricos de alta qualidade e confiabilidade. Ele é responsável por verificar se esses materiais estão em conformidade com as normas técnicas, especificações e requisitos dos clientes, garantindo que atendam aos critérios de desempenho e segurança estabelecidos.

Para isso, o controle de qualidade de polímeros utiliza uma variedade de testes, técnicas e equipamentos sofisticados que avaliam as características físicas, químicas e mecânicas dos materiais. Esses testes são conduzidos em diferentes etapas do processo produtivo, desde a seleção das matérias-primas até o produto final, e visam identificar possíveis problemas que possam afetar a qualidade dos polímeros.

Além de garantir a qualidade, o controle de qualidade também é importante para a otimização dos processos produtivos e a redução de custos. Ao identificar falhas e pontos de melhoria, é possível realizar ajustes e correções na produção, reduzindo o desperdício e aumentando a eficiência. Com isso, o controle de qualidade de polímeros desempenha um papel fundamental na garantia da qualidade dos materiais poliméricos e na satisfação dos clientes.

#### 4 REFERÊNCIAS

- [1] NATARELLI, Caio Vinicius Lima; OLIVEIRA, Juliano Elvis; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli; SANTOS, Mayara de Oliveira; "Introdução aos Materiais Poliméricos", p. 49 -90. In: Nanotecnologia Aplicada a Polímeros. São Paulo: Blucher, 2022. Doi: 10.5151/9786555502527-02.
- [2] CANEVAROLO JR, S. V. Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª edição. P. 17 - 60, São Paulo: Artliber, 2002.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1238:2023: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2023.
- [4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11357-1:1997: Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC) – Part 1: General. Switzerland, 1997.
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11357-2:1999: Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC) – Part 2: Determination of glass transition temperature. Switzerland, 1999.
- [6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11357-3:2011: Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC) – Part 3: Determination of temperature and enthalpy of melting and crystallization. Switzerland, 2011.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3418:2012: Standard Test Methods for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2012.
- [8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11358:1997: Plastics – Thermogravimetry (TG) of polymers – General principles. Switzerland, 1997.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6370:2019: Standard Test Method for Rubber – Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA). Switzerland, West Conshohocken, PA, 2019.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1131:2014: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2014.

- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3045:2010: Standard Practice for Heat Aging of Plastics Without Load. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2010.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D573:2010: Standard Test Methods for Rubber – Deterioration in an Air Oven. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2010.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1252:2013: Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2013.
- [14] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1183-1:2012: Plastics - Methods for determining the density of non-cellular plastics – Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method. Switzerland, 2012.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D792:2013: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2013.
- [16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3451-1:2008: Plastics - Determination of ash - Part 1: Standard method. Switzerland, 2008.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5630:2022: Standard Test Method for Ash Content in Plastics. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2022.
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 868:2003: Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness). Switzerland, 2003.
- [19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2240:2015: Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2015.
- [20] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1133-1:2011: Plastics - Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics – Part 1: Standard method. Switzerland, 2011.
- [21] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-1:2012: Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles. Switzerland, 2012.

- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-2:2012: Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. Switzerland, 2012.
- [23] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-3:2012: Plastics – Determination of tensile properties – Part 3: Test conditions for films and sheets. Switzerland, 2012.
- [24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D638:2010: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2010.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D412:2021: Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2021.
- [26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D624:2012: Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2012.
- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D882:2018: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2018.
- [28] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 178:2010: Plastics - Determination of flexural properties. Switzerland, 2010.
- [29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D790:2017: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Switzerland, West Conshohocken, PA, 2017.
- [30] CANEVAROLO, S. J. Técnicas de Caracterização de Polímeros. p. 229-250. São Paulo: Artliber, 2003.
- [31] CANEVAROLO JR, S. V. Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª edição. P. 149 - 152, São Paulo: Artliber, 2002.
- [32] CANEVAROLO, S. J. Técnicas de Caracterização de Polímeros. p. 209-221. São Paulo: Artliber, 2003.
- [33] CANEVAROLO, S. J. Técnicas de Caracterização de Polímeros. p. 17-35. São Paulo: Artliber, 2003.
- [34] CONSTANTINO, M. G. Espectroscopia no Infravermelho. In: Química Orgânica, volume 3: Curso básico universitário. [s.l: s.n.]. p. 95–137, São Paulo: LTC, 2006.

[35] CANEVAROLO, S. J. Técnicas de Caracterização de Polímeros. p. 341-355. São Paulo: Artliber, 2003.