

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**WALESKA LAISA CORSI**

**ANÁLISE DE FALHAS EM UM ELASTÔMERO EMPREGADO NA PRÁTICA DE  
EXERCÍCIOS FÍSICOS**

**LONDRINA**

**2021**

**WALESKA LAISA CORSI**

**ANÁLISE DE FALHAS EM UM ELASTÔMERO EMPREGADO NA PRÁTICA DE  
EXERCÍCIOS FÍSICOS**

**Failure Analysis in an Elastomer Used in the Practice of Physical Exercise**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof. Dr. Marcio Andreato Batista  
Mendes  
Coorientador(a): Ms. Filippe de Carvalho Bernardino

**LONDRINA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**WALESKA LAISA CORSI**

**ANÁLISE DE FALHAS EM UM ELASTÔMERO EMPREGADO NA PRÁTICA DE  
ATIVIDADES FÍSICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26/novembro/2021

---

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres  
Doutorado em Engenharia Metalúrgica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Alessandra Stevanato  
Doutorado em Química Inorgânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes  
Doutorado em Engenharia de Materiais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**LONDRINA**

**2021**

## RESUMO

A análise de falhas permite determinar as raízes físicas, humanas e latentes envolvidas no processo, bem como identificar os responsáveis, apresentar soluções e evitar a reprodução de falhas semelhantes. Neste trabalho foi realizada a análise de falhas em um elastômero utilizado na prática de atividades físicas, fraturado em serviço. A análise visual dos elastômeros, feita durante as investigações das condições de armazenamento, mostraram que os artigos novos continham marcas de dobras permanentes em sua superfície, possivelmente causadas pelo dobramento dentro de suas embalagens. Essas marcas são descontinuidades e atuam como regiões propícias a nucleação e propagação de trincas de fadiga. Três elastômeros novos, similares ao falhado, foram adquiridos com o propósito de simular as condições de armazenamento por 4, 6 e 14 meses, com e sem exposição ao sol, e avaliar a influência desse condicionamento nas propriedades mecânicas por meio do ensaio de tração. Os resultados apontaram que o dobramento dos elastômeros por 14 meses em ambientes sem exposição ao sol reduz a resistência mecânica à tração do material, no caso dos elastômeros dobrados e expostos ao sol por 4, 6 e 14 meses, a deterioração dessa propriedade também foi observada. Além desses ensaios, os elastômeros foram caracterizados por meio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Análise Termogravimétrica (TGA) e Espectroscopia Vibracional na região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Os resultados indicaram que os materiais analisados são Elastômeros Termoplásticos baseados em Estireno (TPE-S). A fractografia do componente fraturado, realizada por meio de estereoscopia, revelou a presença de *rib marks* na origem da fratura e apontou o mecanismo de fadiga como a raiz física da falha.

Palavras-chave: Análise de falhas; Elastômeros termoplásticos; Fadiga em elastômeros; Elastômeros a base de estireno.

## **ABSTRACT**

Failure analysis makes it possible to determine the physical, human and latent roots involved in the process, as well as identify those responsible, present solutions and avoid the reproduction of similar failures. In this work, the failure analysis of an elastomer used in the practice of physical activities, fractured in service, was performed. Visual analysis of the elastomers made during investigations of storage conditions showed that the new articles had permanent fold marks on their surface, possibly caused by folding inside their packaging. These marks are discontinuities and act as favorable regions for the nucleation and propagation of fatigue cracks. Three new elastomers, similar to the failed one, were acquired with the purpose of simulating the storage conditions for 4, 6 and 14 months, with and without exposure to the sun, and to evaluate the influence of this conditioning on the mechanical properties through the tensile test. The results showed that the bending of elastomers in environments without exposure to the sun for 14 months reduces the mechanical tensile strength of the material, whereas in the case of bended elastomers exposed to the sun for 4, 6 and 14 months, the deterioration of this property was also observed. In addition to these tests, the elastomers were characterized by Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermogravimetric Analysis (TGA) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The results indicated that the materials analyzed are styrene-based thermoplastic elastomers (TPS). Fractography of the fractured component, performed through stereoscopy, revealed the presence of rib marks at the origin of the fracture and pointed to the fatigue mechanism as the physical root of the failure.

**Keywords:** Failure analysis; Thermoplastic elastomers; Fatigue on elastomers; Styrene based elastomers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da análise de falhas .....	14
Figura 2 – Estudos desenvolvidos em materiais poliméricos por análise térmica.....	16
Figura 3 – Representação das medidas de diâmetro interno e externo dos elastômeros .....	21
Figura 4 – Elastômero EL-Fr fraturado em serviço .....	22
Figura 5 – Elastômeros EL-1N, EL-2N e EL-3N .....	22
Figura 6 – Fluxograma das análises desenvolvidas nos elastômeros .....	23
Figura 7 - Gabarito utilizado na confecção do entalhe .....	25
Figura 8 – (a) Inserção do gabarito na parte interna de um corpo de prova, (b) processo de realização do entalhe, indicação da região do entalhe nos corpos de prova, (c) EL-2N e (d) EL-3N.....	26
Figura 9 – Corpos de prova das amostras: (a) EL-2N e (b) EL-3N .....	27
Figura 10 - Corpos de prova da amostra EL-2N durante o a simulação de armazenamento em um ambiente sem exposição ao sol.....	27
Figura 11 - Corpos de prova da amostra EL-3N durante o a simulação de armazenamento em um ambiente exposto ao sol.....	28
Figura 12 - Corpos de prova das amostras (a) EL-2N e (b) EL-3N durante o teste de tração .....	28
Figura 13 – (a) Imagem de um elastômero na embalagem feita durante a visita a uma loja de artigo esportivo e (b) marca de dobra na superfície do elastômero após retirado da embalagem.....	30
Figura 14 – Imagens (a) da vista superior da embalagem contendo os elastômeros novos e (b) com a embalagem aberta.....	31
Figura 15 – Espectros de absorção na região do infravermelho por Transformada de Fourier do elastômero (a) EL-2N, (b) EL-3N, (c) EL-Fr e (d) uma comparação entre eles .....	32
Figura 16 – Curvas DSC referentes ao 2º Aquecimento dos elastômeros EL-2N, EL-3N e EL-Fr.....	34
Figura 17 – Sobreposição das curvas TGA dos elastômeros analisados.....	35
Figura 18 – Imagens da superfície fraturada do elastômero EL-Fr, com aumentos de (a) 2X, (b) 7X e (c) 16X.....	39
Figura 19 – Representação da seção transversal do elastômero EL-Fr, com as indicações de <i>rib marks</i> na origem da falha e da região de rápida propagação da fratura até o final da falha.....	40
Figura 20 – Curva DSC referente ao 1º Aquecimento do elastômero EL-2N.....	47
Figura 21 – Curva DSC referente ao 2º Aquecimento do elastômero EL-2N.....	47
Figura 22 – Curva DSC referente ao 1º Aquecimento do elastômero EL-3N.....	48
Figura 23 – Curva DSC referente ao 2º Aquecimento do elastômero EL-3N.....	48
Figura 24 – Curva TGA e DTGA do elastômero EL-2N .....	50
Figura 25 – Curva TGA e DTGA do elastômero EL-3N .....	50
Figura 26 – Curva TGA e DTGA do elastômero EL-Fr.....	51
Figura 27 – Curvas tensão de tração x deformação dos corpos de prova do elastômero EL-2N (a) antes, após (b) 4 meses, (c) 6 meses e (d) 14 meses de simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol.....	53

<b>Figura 28 – Curvas tensão de tração x deformação dos corpos de prova do elastômero EL-3N (a) antes, após (b) 4 meses, (c) 6 meses e (d) 14 meses de simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 29 – Espectro no Infravermelho Poliestireno-poli(etileno-propileno)-estireno (SEPS) .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 30 – Espectro no Infravermelho Copolímero em bloco estireno-butadieno (SBS) .....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplo de causas raízes da falha de um vaso de pressão .....	14
Quadro 2 – Técnicas de análise comumente utilizadas na caracterização de materiais.....	15
Quadro 3 – Distribuição normal .....	61



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura atribuída aos elastômeros, de acordo com a sua procedência e características dimensionais. ....	21
Tabela 2 – Nomenclatura atribuída aos corpos de prova .....	29
Tabela 3 – Bandas identificadas nos espectros de absorção na região do infravermelho dos elastômeros analisados .....	33
Tabela 4 – Eventos térmicos identificados no 2º aquecimento dos elastômeros na análise DSC .....	34
Tabela 5 – Resultados da análise TGA dos elastômeros analisados .....	36
Tabela 6 – Valores médios das propriedades em tração dos elastômeros analisados .....	37
Tabela 7 – Resultados do teste de hipótese ao nível de significância de 5% ....	37
Tabela 8 – Propriedades em tração do elastômero EL-2N antes da simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol .....	54
Tabela 9 – Propriedades em tração do elastômero EL-2N após 4 meses de simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol .....	55
Tabela 10 – Propriedades em tração do elastômero EL-2N após 6 meses de simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol .....	55
Tabela 11 – Propriedades em tração do elastômero EL-2N após 14 meses de simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol .....	55
Tabela 12 – Propriedades em tração do elastômero EL-3N antes da simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol .....	55
Tabela 13 – Propriedades em tração do elastômero EL-3N após 4 meses de simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol .....	56
Tabela 14 – Propriedades em tração do elastômero EL-3N após 6 meses de simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol .....	56
Tabela 15 – Propriedades em tração do elastômero EL-3N após 14 meses de simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol .....	56
Tabela 16 – Grupos funcionais SEPS .....	58
Tabela 17 – Grupos funcionais SBS .....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATR	Reflectância Total Atenuada
DRX	Difração de Raios X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTGA	Derivada da curva obtida pela Análise Termogravimétrica
EL-1N	Elastômero novo utilizado nos testes preliminares de tração
EL-2N	Elastômero novo utilizado na simulação de dobramento e sem exposição ao sol
EL-3N	Elastômero novo na utilizado na simulação de dobramento com exposição ao sol
EL-Fr	Elastômero falhado em serviço
EP	Etileno-propileno
FTIR	Espectroscopia Vibracional na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier
GC/MS	Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas
ISO	<i>International Standard Organization</i>
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SEPS	Estireno-etileno-propileno-estireno
SIS	Estireno-isopreno-estireno
T <sub>c</sub>	Temperatura de cristalização
T <sub>g</sub>	Temperatura de transição vítrea
TGA	Análise Termogravimétrica
T <sub>m</sub>	Temperatura de fusão cristalina
TPEs	Elastômeros Termoplásticos
TPE-S	Elastômeros Termoplásticos baseados em Estireno
UV-VIS	Espectroscopia de Absorção na Região do Ultravioleta e Visível

## LISTA DE SÍMBOLOS

$N_2$	Gás nitrogênio
$H_0$	Hipótese nula
$H_1$	Hipótese alternativa
$z$	Valor crítico correspondente à média aritmética obtida na amostra
$z_\alpha$	Valor crítico da distribuição normal Z correspondente ao nível de significância $\alpha$
$\bar{x}$	Média aritmética
$\mu_0$	Média da população
$\Sigma$	Desvio padrão
$N$	Número total de observações
$N_2$	Gás nitrogênio
$CH_3$	Grupo metila
$CH_2$	Grupo metileno
$C_6H_5$	Grupo fenila
$RCH=CH_2$	Grupo alceno monossustituído

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>24</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>25</b>
1.1.1	Objetivo Geral.....	25
1.1.2	Objetivos Específicos .....	25
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>26</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1</b>	<b>Falhas em Componentes</b> .....	<b>27</b>
2.2.1	Etapas da Análise de Falhas .....	14
<u>2.2.1.1</u>	<u>Investigação da situação que levou à falha, exame visual e caracterização</u> .....	<u>14</u>
<u>2.2.1.2</u>	<u>Caracterização de Polímeros</u> .....	<u>16</u>
<u>2.2.1.3</u>	<u>Fractografia</u> .....	<u>17</u>
<u>2.2.1.4</u>	<u>Análise Mecânica</u> .....	<u>18</u>
<u>2.2.1.5</u>	<u>Inferência Estatística e Teste de Hipóteses</u> .....	<u>19</u>
<u>2.2.1.6</u>	<u>Simulação da Falha</u> .....	<u>20</u>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>22</b>
3.2.1	Investigação das Condições de Armazenamento.....	24
3.2.2	Caracterização Química .....	24
3.2.3	Caracterização Térmica .....	24
3.2.4	Análise Mecânica .....	25
3.2.5	Inferência Estatística e Teste de Hipóteses.....	29
3.2.6	Fractografia .....	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Investigações das Condições de Armazenamento dos Elastômeros</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização Química</b> .....	<b>31</b>
4.2.1	Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	31
<b>4.3</b>	<b>Caracterização Térmica</b> .....	<b>33</b>
4.3.1	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	33
4.3.1	Análise Termogravimétrica (TGA) .....	35
<b>4.4</b>	<b>Análise Mecânica e Teste de Hipóteses</b> .....	<b>36</b>

<b>4.5</b>	<b>Fractografia.....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>
	<b>APÊNDICE A - Resultados da Análise DSC .....</b>	<b>46</b>
	<b>APÊNDICE B - Resultados da análise TGA.....</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE C - Resultados do ensaio de tração .....</b>	<b>52</b>
	<b>ANEXO A - Espectros no infravermelho do SEPS e SBS.....</b>	<b>57</b>
	<b>ANEXO B - Quadro de Distribuição Normal .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os benefícios oferecidos pela prática de atividades físicas são responsáveis pela busca crescente por academias e até mesmo pela realização de exercícios físicos em ambientes domiciliares. Um artigo esportivo comumente utilizado nesses espaços é o elástico extensor, que segundo Loss *et al.* (2002), originalmente era oferecido por fisioterapeutas em exercícios de reabilitação, mas ganhou espaço em outras modalidades esportivas, devido à facilidade em ser adquirido, seu custo acessível, possibilidade de ser levado e utilizado em qualquer lugar, simples de manusear e permitir trabalhar todos os grandes grupos musculares.

As pessoas que adquirem e utilizam esses objetos esperam que os elásticos sejam suficientemente seguros e duráveis. Em vista disso, os profissionais responsáveis pelo projeto desses componentes, além de instituir uma relação entre a composição química, a microestrutura e o processamento, de forma que as propriedades almejadas e especificações sejam atingidas, devem garantir que a falha do material seja previsível e a probabilidade de ocorrência esteja limitada a níveis mínimos aceitáveis ou estabelecidos no projeto.

O objetivo do presente trabalho é identificar possíveis causas raízes de falha em serviço de um elastômero empregado na realização de atividades físicas, apresentar soluções para que esse tipo de falha seja evitada e aumentar a confiabilidade do componente em serviço, posto que esses objetos ao falhar podem causar danos físicos às pessoas durante a sua utilização. Para isso, foi realizada a investigação das condições de armazenamento dos elastômeros, a fim de identificar possíveis causas humanas da falha. Além disso, elastômeros novos adquiridos, bem como o falhado, foram caracterizados por meio das análises térmicas de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Termogravimétrica (TGA), e análise química de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), com o propósito de verificar se o material que compõe o artigo esportivo fornece as propriedades necessárias para a sua aplicação. Os elastômeros adquiridos para as análises do presente trabalho foram submetidos ao dobramento, com o propósito de simular o seu armazenamento por 4, 6 e 14 meses, com e sem exposição ao sol. Após condicionados nos referidos tempos, foram testados mecanicamente por meio de ensaio de tração, com o intuito de investigar os efeitos da simulação nas propriedades

mecânicas dos elastômeros novos. No elastômero fraturado foi realizada a análise fractográfica com a finalidade de identificar as causas raízes físicas da falha.

As investigações das condições de armazenamento, revelaram que os elastômeros novos continham marcas de dobras permanentes em sua superfície, que são descontinuidades e atuam como regiões concentradoras de tensão, propiciando a nucleação e propagação de trincas de fadiga. Os resultados das análises de DSC, TGA e FTIR indicaram que os materiais estudados são Elastômeros Termoplásticos baseados em Estireno (TPE-S). A fractografia do componente fraturado permitiu a observação de *rib marks* na origem da fratura e evidenciou que a causa raiz física da falha foi o mecanismo de fadiga. Os resultados da análise mecânica apontaram redução da resistência mecânica à tração dos elastômeros mantidos dobrados por tempo prolongado em ambientes sem exposição ao sol, bem como dos elastômeros dobrados e expostos ao sol.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é identificar possíveis causas raízes da falha e o mecanismo de fratura em um elastômero que apresentou falha durante a sua utilização.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os materiais poliméricos de estudo por meio de análises de FTIR, TGA e DSC, para, com isso, avaliar se o material utilizado é adequado para a função;
- Realizar a análise fractográfica do componente fraturado por meio de Estereoscopia pra averiguar a causa raiz física da falha;
- Simular as condições de armazenamento por meio de dobramento de corpos de prova dos elastômeros pelo período de 4, 6 e 14 meses;
- Determinar as propriedades de resistência à tração dos elastômeros antes e após a simulação das condições de armazenamento, por meio do ensaio de tração, para verificar se o armazenamento pode deteriorar a resistência mecânica do material;

Investigar o efeito da exposição ao sol nas propriedades mecânicas das seções submetidas ao dobramento, por meio do ensaio de tração, após 4, 6 e 14 meses de simulação.

## **1.2 Justificativa**

Os elastômeros são comumente empregados como um instrumento auxiliar na realização de exercícios físicos, desempenhando um papel importante tanto em tratamentos fisioterapêuticos como em atividades destinadas à melhoria do condicionamento físico.

Esse artigo esportivo geralmente é manuseado por pessoas, portanto é fundamental que a sua integridade seja mantida durante o seu uso, com o propósito de evitar acidentes que possam causar danos físicos ao manuseador. Desse modo, este trabalho se justifica pela investigação da causa de fratura em serviço de um elastômero utilizado na prática de atividades físicas, a fim de fornecer maior confiabilidade a esses produtos e evitar falhas catastróficas que possam colocar pessoas em situações de risco.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Dado o escopo do presente trabalho, neste tópico será apresentada uma introdução sobre falhas e uma revisão dos procedimentos comumente adotados na análise de falhas de componentes que vieram a falhar durante a sua utilização, bem como os métodos mais empregados no de estudo de falhas de materiais poliméricos.

### 2.1 Falhas em Componentes

De acordo com Castro e Meggiolaro (2009), o termo “falha” refere-se a perda parcial ou total da funcionalidade de qualquer equipamento e os “mecanismos de dano” são os processos que contribuem para a ocorrência de falhas, os quais podem agir de forma simultânea ou individualmente. O Quadro 1 apresenta mecanismos de dano atuantes em algumas falhas.

**Quadro 1 - Tipos de falhas e mecanismos de danos**

<b>Tipos de Falha</b>	<b>Mecanismo de Dano</b>
Fratura trans ou intergranular	Fadiga, fluência, corrosão sob tensão, corrosão ou clivagem
Distorção excessiva	Flambagem, fluência, escoamento ou eventuais cargas
Desgaste excessivo	Desgaste adesivo, erosivo, fadiga superficial, <i>fretting</i> ou cavitação
Obsolescência	Perda da funcionalidade competitiva

**Fonte: Adaptado de Castro e Meggiolaro (2009).**

A distorção excessiva e a fratura trans ou intergranular podem ser evitadas se a operação e o dimensionamento forem feitos de forma correta, no entanto, o desgaste e a obsolescência não podem ser evitados, mas podem ser retardados por meio de manutenções adequadas (CASTRO; MEGGIOLARO, 2009).

Devido à competitividade global, há uma preocupação por parte de empresas em oferecer produtos e serviços de alta qualidade, com o intuito de acompanhar o ritmo acelerado do desenvolvimento em todo o mundo (KARSAK et al., 2003). Nesse contexto, a análise de falhas torna-se importante, uma vez que a falha de materiais de engenharia, na maioria das vezes, é indesejável, visto que pode colocar vidas em risco, ocasionar perdas econômicas e interferir na disponibilidade dos produtos e serviços (CALLISTER, 2012).

Por meio do estudo das características de um componente falhado é possível determinar a raiz física da falha, ou seja, o mecanismo de dano que levou a falha do material. Entretanto, isso não é suficiente para atingir os principais objetivos da análise de falhas, que são identificar os responsáveis e evitar a reprodução de falhas semelhantes. Para isso, as raízes humanas e latentes envolvidas devem ser investigadas e apontadas (BECKER; SHIPLEY, 2002; BROOKS; CHOUDHURY, 2002).

De acordo com Becker e Shipley (2002), as raízes humanas estão relacionadas às ações humanas que contribuem para a ocorrência de falhas. Já as raízes latentes, que envolvem aspectos de natureza organizacional, procedimental, ambiental, entre outros, induzem os erros humanos.

O Quadro 2 mostra as raízes físicas, humanas e latentes identificadas na falha de um vaso de pressão.

**Quadro 2 – Exemplo de causas raízes da falha de um vaso de pressão**

<b>Tipo de Raiz</b>	<b>Falha de um vaso de pressão</b>
Raízes físicas	Dano por corrosão, redução da espessura da parede
Raízes humanas	Inspeção inadequada
Raízes latentes	Treinamento inadequado do inspetor

**Fonte: Adaptado de Becker e Shipley (2002).**

Devido à competitividade global, há uma preocupação por parte de empresas em oferecer produtos e serviços de alta qualidade, com o intuito de acompanhar o ritmo acelerado do desenvolvimento em todo o mundo (KARSAK et al., 2003). Nesse contexto, a análise de falhas torna-se importante, uma vez que a falha de materiais de engenharia, na maioria das vezes, é indesejável, visto que pode colocar vidas em risco, ocasionar perdas econômicas e interferir na disponibilidade dos produtos e serviços (CALLISTER, 2012).

Por meio do estudo das características de um componente falhado é possível determinar a raiz física da falha, ou seja, o mecanismo de dano que levou a falha do material. Entretanto, isso não é suficiente para atingir os principais objetivos da análise de falhas, que são identificar os responsáveis e evitar a reprodução de falhas semelhantes. Para isso, as raízes humanas e latentes envolvidas devem ser investigadas e apontadas (BECKER; SHIPLEY, 2002; BROOKS; CHOUDHURY, 2002).

De acordo com Becker e Shipley (2002), as raízes humanas estão relacionadas às ações humanas que contribuem para a ocorrência de falhas. Já as raízes latentes, que envolvem aspectos de natureza organizacional, procedimental, ambiental, entre outros, induzem os erros humanos.

O Quadro 1 mostra as raízes físicas, humanas e latentes identificadas na falha de um vaso de pressão.

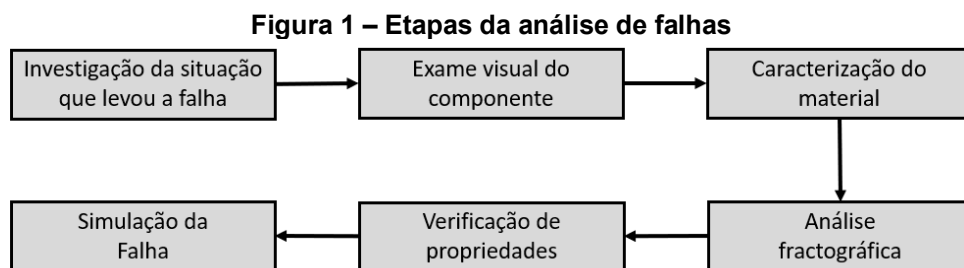
**Quadro 1 – Exemplo de causas raízes da falha de um vaso de pressão**

Tipo de Raiz	Falha de um vaso de pressão
Raízes físicas	Dano por corrosão, redução da espessura da parede
Raízes humanas	Inspeção inadequada
Raízes latentes	Treinamento inadequado do inspetor

Fonte: Adaptado de Becker e Shipley (2002).

### 2.2.1 Etapas da Análise de Falhas

A análise de falhas envolve as etapas de investigação da situação que levou a falha, exame visual do componente falhado, caracterização do material, análise fractográfica, verificação de propriedades e simulação da falha, conforme mostrado na Figura 1. A sequência dessas etapas pode ser alterada dependendo do tipo do material, das condições de serviço e dos recursos disponíveis (BROOKS; CHOUDHURY, 2002).



Fonte: Autoria própria (2021).

#### 2.2.1.1 Investigação da situação que levou à falha, exame visual e caracterização

O primeiro passo na investigação da falha de qualquer componente é a coleta de informações relevantes para a análise, como a descrição da forma que a peça falhada estava sendo utilizada, a caracterização do material e suas propriedades. Nesta etapa também deve ser feito o exame visual da peça, com cautela, a fim de

evitar que a superfície de fratura seja danificada e características importantes para o estudo sejam perdidas (BROOKS; CHOUDHURY, 2002).

A caracterização de um material pode ser feita por diversas técnicas de análise que de alguma forma estimulam a amostra, com a finalidade de produzir uma resposta que pode ser convertida e interpretada pelas leis fundamentais da química e da física (SKOOG; HOLLER; NIEMAN, 2002). Algumas técnicas de análises térmicas, microscópicas, cristalográfica e espectroscópicas comumente utilizadas na caracterização de materiais durante a análise de uma falha são mostradas no Quadro 2.

**Quadro 2 – Técnicas de análise comumente utilizadas na caracterização de materiais**

<b>Tipo de Análise</b>	<b>Técnicas de Análise de Materiais</b>
<b>Térmica</b>	Termogravimetria
	Calorimetria Exploratória Diferencial
	Análise Térmica Diferencial
<b>Microscópica</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura
	Microscopia Óptica
	Microscopia Eletrônica de Transmissão
<b>Cristalográfica</b>	Difração de Raios X
<b>Espectroscópica</b>	Espectroscopia de Energia Dispersiva
	Espectroscopia Vibracional na região do Infravermelho
	Espectroscopia de Fluorescência de Raios X

**Fonte: Autoria própria (2021).**

Muitas vezes uma única técnica não fornece informações suficientes para concluir o estudo do material. Em vista disso, é muito comum associar os resultados obtidos entre duas ou mais técnicas (CANEVAROLLO, 2003). Além disso, ensaios mecânicos como dureza, tração, compressão, entre outros, podem ser utilizados na busca de informações adicionais.

Uma vez que os componentes em estudo no presente trabalho tratam-se de elastômeros, nos itens subsequentes serão apresentadas técnicas voltadas a caracterização de materiais poliméricos.

### 2.2.1.2 Caracterização de Polímeros

As técnicas de análise envolvendo métodos térmicos, como a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Termogravimétrica (TGA), são amplamente utilizadas na caracterização de polímeros, uma vez possibilitam o desenvolvimento de diferentes estudos, conforme mostrado na Figura 2.

**Figura 2 – Estudos desenvolvidos em materiais poliméricos por análise térmica**



Fonte: Canevarolo (2013).

A técnica de DSC permite a observação de eventos térmicos que ocorrem em substâncias em função do aquecimento. Esses eventos podem aparecer na forma de picos quando há variações de entalpia ou deslocamentos na linha base da curva quando ocorrem mudanças na capacidade calorífica da amostra. A partir desses fenômenos térmicos, é possível determinar as temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ), de cristalização ( $T_c$ ) e de fusão ( $T_m$ ), calcular o grau de cristalinidade de polímeros, o calor específico e a magnitude de entalpias de fusão (ALMEIDA; SOUZA, 2015).

A análise de TGA revela as alterações na massa de substâncias submetidas ao aquecimento. Nesse ensaio, é possível estabelecer as faixas de temperatura que ocorre ganho ou perda de massa. Com isso, é possível acompanhar os processos de desidratação, oxidação, combustão, decomposição, entre outros (CANEVAROLO, 2003).

A Espectroscopia Vibracional na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), apropriada tanto para análises quantitativas como qualitativas,

fornece informações complementares para os resultados obtidos por análises térmicas. A interpretação do espectro no infravermelho é feita empiricamente, através da comparação das frequências vibracionais observadas com as de grupos funcionais característicos, com base nas frequências do monômero, do oligômero e de substâncias homólogas. A utilização de informações de técnicas complementares como Difração de Raios X (DRX), Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e Espectroscopia de Absorção na Região do Ultravioleta e Visível (UV-VIS), também podem contribuir para a consistência da atribuição espectral (CANEVAROLO, 2003; SKOOG; HOLLER; NIEMAN, 2002).

### 2.2.1.3 Fractografia

A fractografia é uma ciência que procura relacionar a morfologia de uma superfície de fratura às condições do processo de fratura como material, carregamento, temperatura, ambiente, direção e taxa de crescimento da trinca, entre outros. Além disso, segundo Hayes, Edwards e Shah (2015), todas as causas raízes, com exceção das raízes latentes, podem ser esclarecidas através desse método científico.

Em componentes que apresentaram falha por fratura, a análise fractográfica deve ser incluída entre as etapas da análise de falhas, com os objetivos de identificar a origem da fratura, a direção de propagação de trincas, os mecanismos de falha, a presença de descontinuidades no material e a natureza das tensões (PARRINGTON, 2001). A análise fractográfica envolve duas etapas principais: observações macroscópicas e microscópicas.

Na análise macroscópica, a estereoscopia é uma técnica comumente empregada, já que permite identificar a origem do processo de fratura e as principais direções de propagação de trincas, observar aspectos e características da superfície fraturada, bem como detectar a presença de descontinuidades superficiais (BALAN, 2018; JOLLIVET; GREENHALGH, 2015).

A análise microscópica é uma ferramenta essencial no diagnóstico de falhas de materiais poliméricos, visto que além de atuar na confirmação das direções de propagação de trincas feitas a partir do exame macroscópico, permite avaliar a influência dos aspectos microestruturais nos processos de iniciação e propagação de fissuras (MICHLER, 2015).

As análises microfractográficas convencionais de polímeros são conduzidas por meio de microscopia óptica (MO), no entanto, essa técnica possui a desvantagem de não fornecer informações de profundidade das fraturas. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) comumente é utilizada para estudar a fratura e o fluxo plástico de materiais poliméricos, já que possibilita a análise com maior profundidade de foco. A microscopia eletrônica de transmissão (MET), permite a inspeção de superfícies por meio de réplicas da superfície de fratura e analisar deformações plásticas locais que ocorrem em zonas de cisalhamento ou *crazes* durante os estágios iniciais da fratura (DESHMUKH *et al.*, 2020).

A análise fractográfica por MEV, apesar de apresentar um menor poder de resolução em relação a MET, possibilita a observação de grandes regiões superficiais e sem a preparação da superfície da amostra, exigindo apenas uma limpeza da fratura, e em alguns casos recobrimento, ao contrário do MET, onde a área da superfície de análise é bem menor e o seu preparo é trabalhoso e dispendioso, sendo necessário o uso de réplicas. Em adição, as imagens tridimensionais obtidas por MEV são mais fáceis de interpretar quando comparadas as de projeção fornecidas pela análise MET (CANEVAROLO, 2003; COLPAERT, 2008).

Segundo Canevarolo (2003), outra desvantagem da técnica MET em relação a MEV é a susceptibilidade das amostras poliméricas aos danos causados pela alta dosagem de radiação eletromagnética durante a análise. Em vista disso, as consequências da radiação devem ser monitoradas para garantir que os efeitos morfológicos em estudo sejam intrínsecos do material e não uma consequência do dano imposto pela própria técnica (LIBERA; EGERTON, 2010).

#### 2.2.1.4 Análise Mecânica

De acordo com Canevarolo (2006), na análise do comportamento mecânico dos polímeros podem ser empregados ensaios estáticos, dinâmicos, destrutivos, não-destrutivos, de curta ou longa duração, entre outros, através de solicitações impostas na forma de tensão ou deformação.

Muitos ensaios são registrados por meio de curvas de tensão versus deformação, como tração, compressão, flexão, cisalhamento, dentre outros. Os principais parâmetros de resistência mecânica de polímeros fornecidos por essas curvas são módulo de elasticidade (rigidez), tensão e deformação no escoamento,

tensão e deformação na ruptura, tenacidade e tensão máxima (CANEVAROLO, 2006).

Segundo Canevarolo (2006), o estudo do comportamento de materiais poliméricos quando submetidos ao impacto é de extrema importância, uma vez que a resistência ao impacto é um fator de decisão na seleção de materiais. No aspecto tecnológico, as técnicas mais utilizadas para medir a resistência ao impacto de polímeros são os tipos Izod e Charpy.

Na indústria o ensaio de dureza é amplamente utilizado, em razão de auxiliar no controle de especificações de matérias-primas e componentes durante as etapas de fabricação, e fornecer dados quantitativos de resistência à deformação permanente de peças produzidas (GARCIA, 2014). Além disso, a dureza é um teste simples de ser realizado, não danifica a peça e pode ser relacionada a muitas outras propriedades, como a resistência ao escoamento (BROOKS; CHOUDHURY, 2002).

Os ensaios mecânicos podem fornecer resultados com elevada variação de valores para uma determinada amostra, desse modo, é necessário realizar o teste de hipóteses, a fim de inferir que os resultados obtidos são válidos para a população analisada, conforme será discutido no próximo tópico.

#### 2.2.1.5 Inferência Estatística e Teste de Hipóteses

De acordo com Ara, Musetti e Schneiderman (2003), a inferência estatística consiste na obtenção de informações sobre aspectos de uma determinada população por meio de resultados obtidos na observação de uma ou mais amostras e o teste de hipótese permite tomar decisões baseadas em evidências científicas fornecidas pelos dados amostrais. Em vista disso, essa análise pode ser utilizada como uma ferramenta para aceitar ou rejeitar hipóteses de causas raízes da falha, que foram apontadas durante a análise de falhas.

A hipótese supostamente verdadeira é a hipótese nula ( $H_0$ ), que afirma que não há efeito ou variação na população, já na hipótese alternativa ( $H_1$ ) é afirmado o oposto de ( $H_0$ ), ou seja, que há variação ou efeito na população (ARA; MUSETTI; SCHNEIDERMAN, 2003).

O teste de hipótese pode ser feito por meio da comparação do valor crítico ( $z$ ), correspondente à média aritmética obtida na amostra quando  $H_0$  é verdadeira, e o valor crítico da distribuição normal, correspondente ao nível de significância adotado



( $z_\alpha$ ). O valor de  $z$  é calculado conforme a Equação 1 e  $z_\alpha$  pode ser obtido por meio de consultas em tabelas e quadros disponíveis na literatura de estatística.

$$z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (1)$$

Onde:

$\bar{x}$  = a média aritmética;

$\mu_0$  = média da população;

$\sigma$  = desvio padrão;

$n$  = número total de observações.

Na hipótese  $H_1$  de que a estimativa obtida é maior que a média da população, se o valor de  $z$  for maior ou igual a  $z_\alpha$ , rejeita-se  $H_0$ . De forma análoga, na hipótese  $H_1$  de que a estimativa obtida é menor que a média da população, se o valor de  $z$  for menor ou igual  $z_\alpha$ , rejeita-se  $H_0$ .

#### 2.2.1.6 Simulação da Falha

A simulação da falha é realizada ao submeter uma peça idêntica às condições em que o componente falhado foi projetado para suportar. Essa análise, frequentemente, não é executada uma vez que esse procedimento pode ser dispendioso ou exigir recursos que muitas vezes não estão disponíveis (BROOKS; CHOUDHURY, 2002).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais

Os materiais em estudo foram quatro elastômeros empregados na prática de exercícios físicos. Um deles apresentou falha em serviço, os outros três foram elastômeros semelhantes ao fraturado e que foram adquiridos para avaliar a influência do dobramento e da degradação por intempéries nas propriedades de resistência à tração, visto que o tamanho do elastômero falhado era insuficiente para a execução das análises do presente trabalho.

A Tabela 1 fornece informações sobre as características dimensionais e a nomenclatura atribuída aos elastômeros, de acordo com a sua procedência.

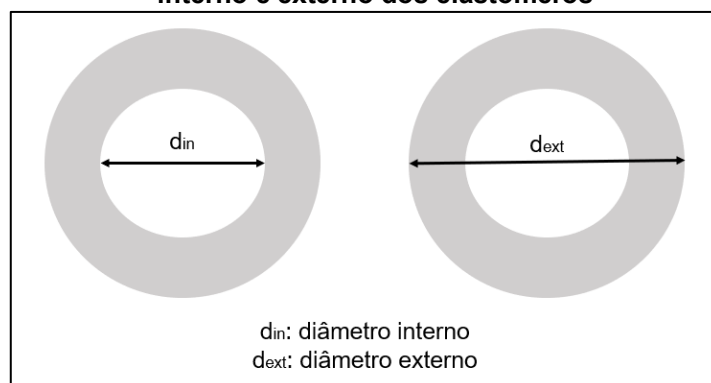
**Tabela 1 – Nomenclatura atribuída aos elastômeros, de acordo com a sua procedência e características dimensionais.**

Nomenclatura Elastômero	Procedência do Elastômero	Comprimento (mm)	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)
EL-Fr	Fraturado em serviço	1145	6,00	10,00
EL-1N	Novo	1100	6,00	11,00
EL-2N	Novo	1100	5,00	11,00
EL-3N	Novo	1100	7,00	11,00

Fonte: Autoria própria (2021).

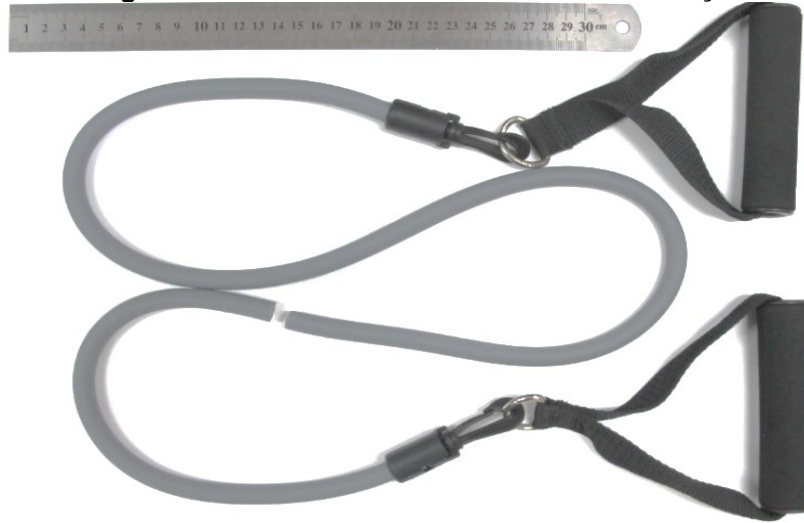
A representação das medidas de diâmetros interno e externo dos elastômeros é apresentada na Figura 3. Na Figura 4 é mostrado o elastômero EL-Fr fraturado em serviço.

**Figura 3 – Representação das medidas de diâmetro interno e externo dos elastômeros**



Fonte: Autoria própria (2021).

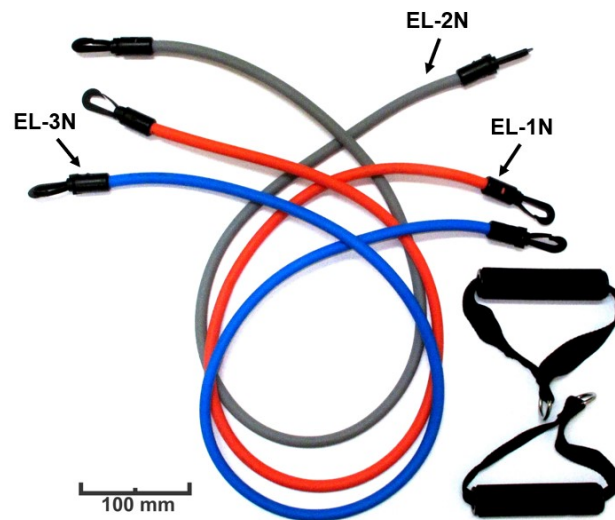
**Figura 4 – Elastômero EL-Fr fraturado em serviço**



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 5 mostra os elastômeros EL-1N, EL-2N e EL-3N adquiridos, especialmente, para as análises referentes a este trabalho.

**Figura 5 – Elastômeros EL-1N, EL-2N e EL-3N**

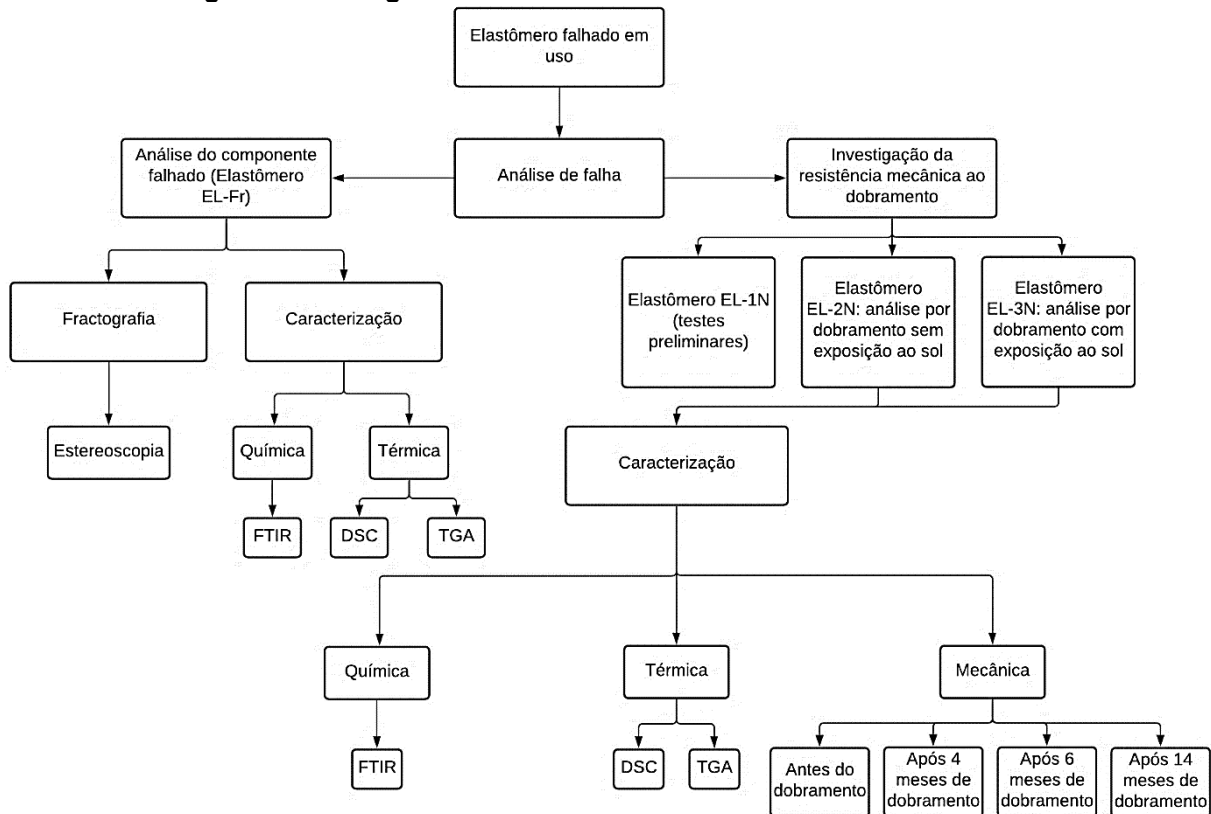


Fonte: Autoria própria (2021)

### 3.2 Métodos

As análises e estudos desenvolvidos nos elastômeros são apresentados na Figura 6 e serão detalhados nesta seção.

**Figura 6 – Fluxograma das análises desenvolvidas nos elastômeros**



Fonte: Autoria própria (2021).

Com a finalidade de identificar as causas raízes da falha do elastômero fraturado em serviço, foi investigada a hipótese de armazenamento inadequado dos elastômeros por meio de averiguação das condições de armazenamento em uma loja de artigos esportivos. Essa investigação forneceu informações sobre a possibilidade de fratura do material ter sido originada em uma região onde houve degradação e perdas de propriedades mecânicas devido a descontinuidades geradas durante o armazenamento do fabricante. No entanto, isso não exclui a possibilidade de uso indevido por parte do usuário do produto.

Com o propósito de verificar se há deterioração de propriedades mecânicas dos elastômeros quando acondicionados dobrados, foi realizado ensaio de tração em elastômeros novos submetidos ao dobramento em ambientes com e sem exposição ao sol, simulando o armazenamento adotado pelo usuário do objeto e fabricante, respectivamente. Essa análise, aliada ao teste de hipóteses, permitiu estabelecer uma relação entre a resistência à tração, o condicionamento dos elastômeros e a possível causa da falha do material.

As análises de DSC, TGA e FTIR foram realizadas nos elastômeros, a fim de identificar e verificar se o material selecionado para compor o objeto é adequado para a sua aplicação.

Por fim, a fractografia do componente falhado por estereoscopia foi utilizada para investigar a possível causa raiz física da falha. Nos próximos tópicos são detalhadas essas investigações.

### 3.2.1 Investigação das Condições de Armazenamento

Uma das causas levantadas previamente que poderia ter ocasionado a redução da vida do elastômero falhado foi o armazenamento inadequado da mercadoria. Assim, em busca de informações sobre as condições nas quais os elastômeros utilizados na prática de exercícios físicos são submetidos, foi feita uma averiguação das condições de armazenamento em uma loja de artigos esportivos por meio de uma avaliação visual qualitativa desses produtos. Também foi feita a inspeção visual dos elastômeros adquiridos para as análises do presente trabalho.

### 3.2.2 Caracterização Química

A caracterização química dos quatro elastômeros foi feita por meio da técnica de FTIR, pelo método reflectância total atenuada (ATR), na faixa espectral de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . O equipamento utilizado na análise foi o espectrofotômetro de modelo Spectrum Two, marca Perkin Elmer.

### 3.2.3 Caracterização Térmica

O estudo da decomposição térmica dos elastômeros foi realizado por meio de TGA, na faixa de temperatura de 15°C a 800°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min, em uma atmosfera inerte de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) com vazão de 20 mL/min. O analisador termogravimétrico de marca Shimadzu, modelo TGA-51, foi empregado na análise.

A avaliação dos eventos térmicos para a caracterização dos elastômeros foi feita por meio da análise de DSC, utilizando 2 aquecimentos, a fim de apagar a história térmica dos polímeros e verificar no segundo aquecimento as propriedades intrínsecas de cada elastômero. A faixa de temperatura em cada corrida foi de -100°C a 200°C, com taxa de aquecimento de 20°C/min, em uma atmosfera inerte  $\text{N}_2$  com

vazão de 50 mL/min. O equipamento utilizado no ensaio foi o modelo DSC-60, marca Shimadzu.

#### 3.2.4 Análise Mecânica

A caracterização mecânica dos elastômeros EL-2N e EL-3N foi feita por meio de ensaio de tração antes e após a simulação das condições de armazenamento, com o objetivo de avaliar a influência desse condicionamento nas propriedades mecânicas em tração dos elastômeros.

Os elastômeros necessitaram da confecção de um entalhe na região central dos corpos de prova para romperem durante a execução do ensaio de tração, visto que durante testes preliminares com o elastômero EL-1N, os corpos de prova foram alongados e escapavam das garras do equipamento antes de fraturar.

A Figura 7 mostra o gabarito selecionado para a padronização do entalhe. A região escolhida para entalhar os corpos de prova é indicada pela seta na imagem.

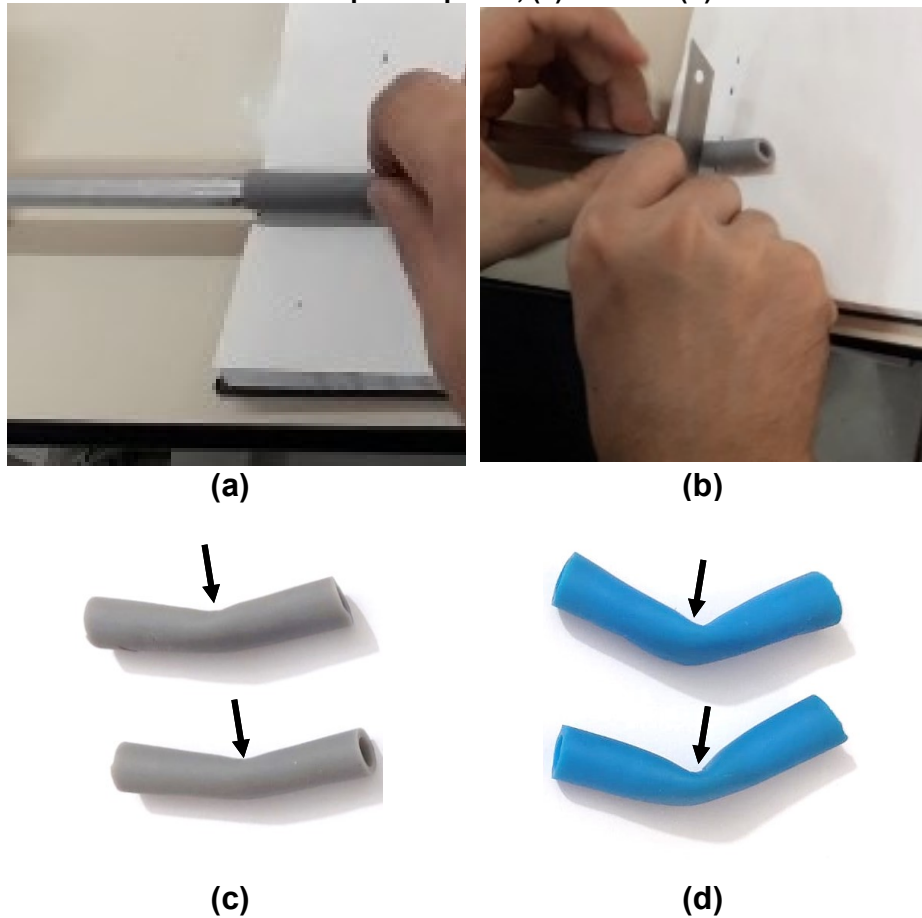
**Figura 7 - Gabarito utilizado na confecção do entalhe**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

O procedimento de entalhe dos corpos de prova teve início com a introdução da área pontilhada, mostrada na Figura 7, na região interna dos corpos de prova. Em seguida, foi feito o entalhe com uma lâmina, sem tensionar o objeto. A Figura 8 mostra em (a) a inserção do gabarito na parte interna de um corpo de prova, em (b) o processo de realização do entalhe com a lâmina, e em (c) e (d) a região dos corpos de prova EL-2N e EL-3N escolhida para a confecção do entalhe indicada pela seta, respectivamente.

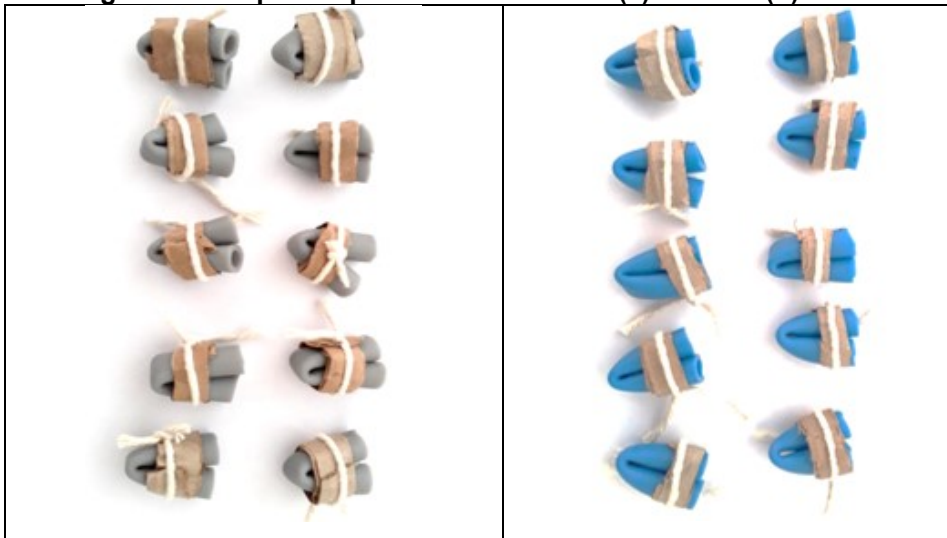
**Figura 8 – (a) Inserção do gabarito na parte interna de um corpo de prova, (b) processo de realização do entalhe, indicação da região do entalhe nos corpos de prova, (c) EL-2N e (d) EL-3N**



Fonte: Autoria própria (2021).

Para simular as condições de armazenamento, os elastômeros EL-2N e EL-3N foram particionados em seções de aproximadamente 5 centímetros de comprimento, dobrados e armazenados durante 4, 6 e 14 meses, em triplicata. O dobramento dos corpos de prova foi feito através de um barbante e uma tira de papelão, conforme mostrado na Figura 9.

**Figura 9 – Corpos de prova das amostras: (a) EL-2N e (b) EL-3N**



Fonte: Autoria própria (2021).

Os corpos de prova dobrados da amostra EL-2N foram colocados em uma caixa de papelão e armazenados em um ambiente sem exposição ao sol, conforme apresentado na Figura 10.

**Figura 10 - Corpos de prova da amostra EL-2N durante o a simulação de armazenamento em um ambiente sem exposição ao sol**



Fonte: Autoria própria (2019).

Os corpos de prova dobrados da amostra EL-3N foram armazenados em um recipiente de vidro, vedado com silicone, e expostos ao sol, conforme mostrado na Figura 11.



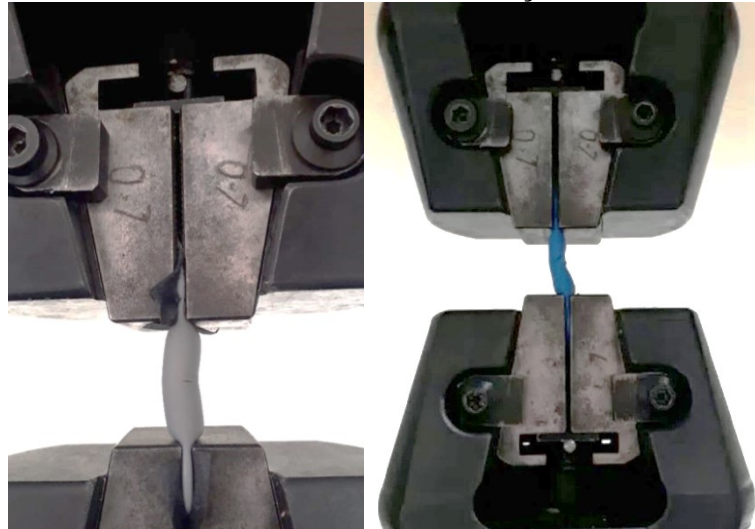
**Figura 11 - Corpos de prova da amostra EL-3N durante o a simulação de armazenamento em um ambiente exposto ao sol**



Fonte: Autoria própria (2019).

Após o tempo de dobramento, os corpos de prova foram ensaiados mecanicamente na Máquina Universal de Ensaio, marca Time Group, modelo WDW100E, com velocidade de 500 mm/min até a ruptura dos corpos de prova, conforme mostrado na Figura 12.

**Figura 12 - Corpos de prova das amostras (a) EL-2N e (b) EL-3N durante o teste de tração**



Fonte: Autoria própria (2019).

O teste de tração em cada amostra foi realizado em triplicata e as nomenclaturas atribuídas aos corpos de prova são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Nomenclatura atribuída aos corpos de prova**

<b>Nomenclatura dos Corpos de Prova</b>	<b>Descrição</b>
CP1	Primeiro corpo de prova ensaiado
CP2	Segundo corpo de prova ensaiado
CP3	Terceiro corpo de prova ensaiado

**Fonte: Autoria própria (2021).**

### 3.2.5 Inferência Estatística e Teste de Hipóteses

Com a finalidade de validar a hipótese de que o armazenamento dos elastômeros dobrados contribui para a redução de propriedades mecânicas em tração, foi realizado teste de hipóteses por meio da comparação entre o valor crítico dos elastômeros dobrados submetidos ao teste de tração e o valor crítico da distribuição normal ao nível de significância de 5%.

Para isso foi estabelecida como hipótese nula ( $H_0$ ) que o armazenamento dos elastômeros dobrados não causa redução da resistência mecânica em tração do material e como hipótese alternativa ( $H_1$ ) que o armazenamento dos elastômeros dobrados causa diminuição na resistência mecânica em tração do material.

### 3.2.6 Fractografia

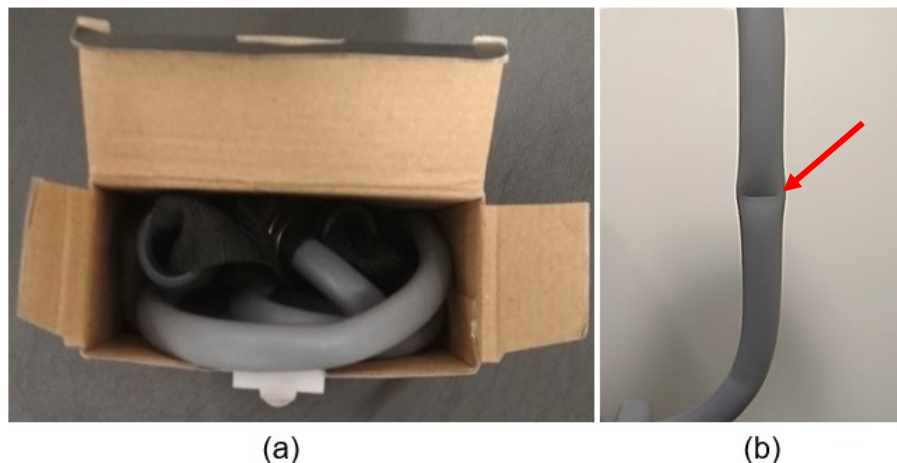
A caracterização fractográfica do elastômero EL-Fr foi feita por meio da técnica de Estereoscopia, utilizando o estereoscópio de marca Physis e uma câmera Canon PoweShot G11.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Investigações das Condições de Armazenamento dos Elastômeros

A Figura 13 (a) mostra a imagem de um elastômero na embalagem feita durante a visita a uma loja de artigos esportivos para averiguar possíveis erros de armazenamento que poderiam comprometer as suas propriedades mecânicas. Vários elastômeros analisados, ao serem retirados de sua embalagem para uma inspeção visual possuíam marcas de dobras permanentes em sua superfície, conforme é mostrado na Figura 13 (b). O tempo que esse produto da imagem ficou armazenado é indeterminado, mas é notável que essa forma de empacotamento pode ter efeitos deletérios nas propriedades do material e diminuir seu tempo de vida útil.

**Figura 13 – (a) Imagem de um elastômero na embalagem feita durante a visita a uma loja de artigo esportivo e (b) marca de dobra na superfície do elastômero após retirado da embalagem**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Os três elastômeros adquiridos para as análises deste trabalho foram recebidos dobrados em uma embalagem de papelão, conforme mostrado na Figura 14, em (a) a vista superior da embalagem e em (b) os elastômeros com a embalagem aberta. No momento de recebimento dos elásticos esportivos foi observado que o elastômero EL-1N, que foi utilizado para testes de dobramento e ensaio de tração, apresentava marcas de dobras permanentes em sua superfície, semelhante à da Figura 14 (b), que podem ter sido causadas pelo modo que foi acondicionado na embalagem.

**Figura 14 – Imagens (a) da vista superior da embalagem contendo os elastômeros novos e (b) com a embalagem aberta**



Fonte: Autoria própria (2021).

## 4.2 Caracterização Química

### 4.2.1 Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 15 são apresentados os espectros de absorção na região do infravermelho dos elastômeros (a) EL-2N, (b) EL-3N e (c) EL-Fr, e em (d) uma comparação entre eles. Os espectros foram obtidos pelo modo ATR.

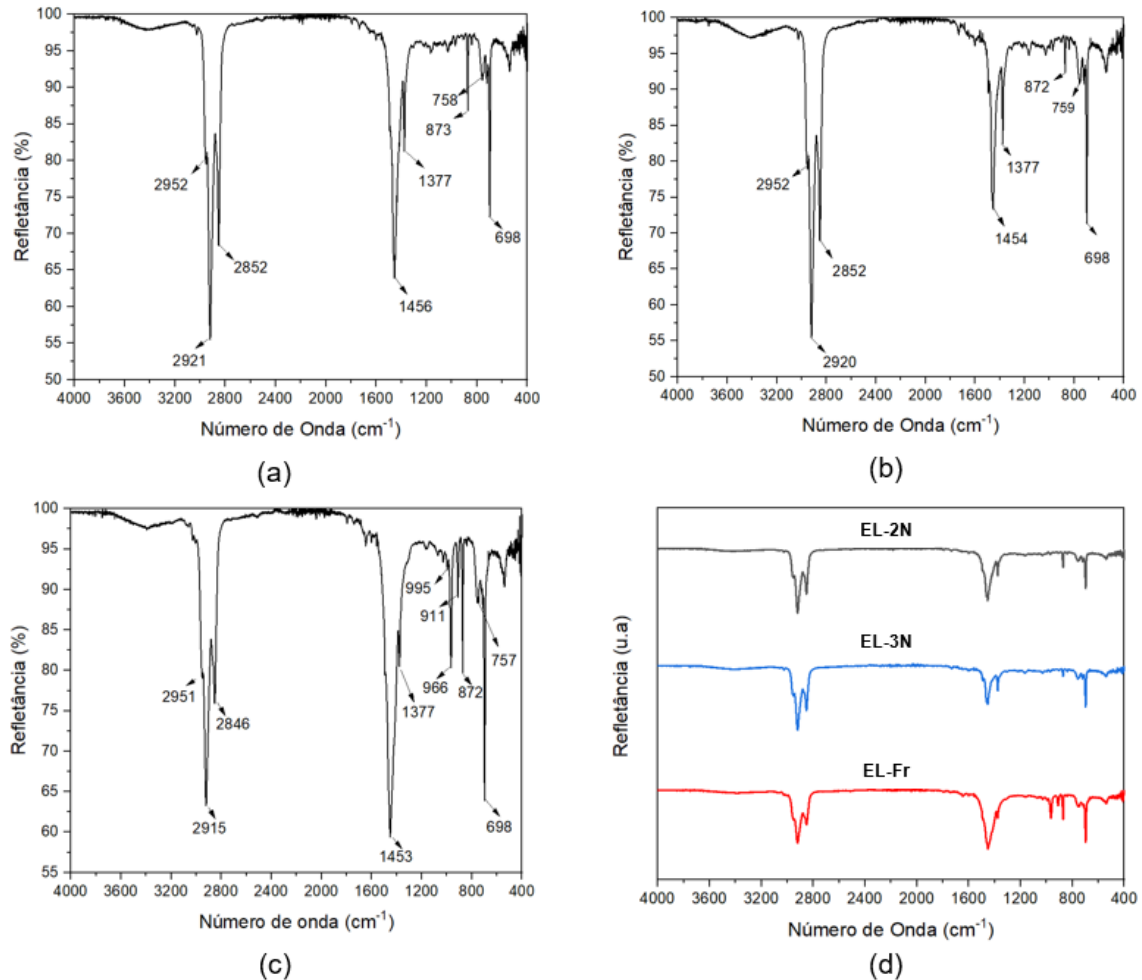
No elastômero EL-2N foram identificadas bandas em  $2952\text{ cm}^{-1}$ ,  $2921\text{ cm}^{-1}$  e  $2852\text{ cm}^{-1}$  que são atribuídas às vibrações de C-H, associadas ao estiramento assimétrico de  $\text{CH}_3$ , assimétrico de  $\text{CH}_2$  e simétrico de  $\text{CH}_2$ , respectivamente. Em  $758\text{ cm}^{-1}$  e  $698\text{ cm}^{-1}$  foram observadas bandas de deformação angular características de anéis aromáticos ( $\text{C}_6\text{H}_5$ ). As bandas em  $1377\text{ cm}^{-1}$  e  $1456\text{ cm}^{-1}$  correspondem as vibrações dos grupos metila ( $\text{CH}_3$ ) e metileno ( $\text{CH}_2$ ), respectivamente. Em  $873\text{ cm}^{-1}$  foi constatada uma banda que pode estar relacionada à vibração de anel aromático em blocos de estireno (TOMA *et al.*, 2011).

No espectro do elastômero EL-3N foram constatadas bandas referentes aos mesmos grupamentos químicos observados no espectro do elastômero EL-2N. Já o espectro do elastômero EL-Fr, além de indicar a presença dos mesmos grupos funcionais observados nas amostras EL-2N e EL-3N, foram observadas bandas entre  $990$  a  $910\text{ cm}^{-1}$ , associadas à deformação angular fora do plano  $\text{RCH}=\text{CH}_2$  (ISO 4650, 2012), ademais, há uma banda mais intensa em  $872\text{ cm}^{-1}$ , característica de anel aromático.

A comparação mostrada na Figura 15 (d) evidenciou que os espectros de absorção na região do infravermelho obtidos possuem características

semelhantes, embora o elastômero EL-Fr tenha apresentado bandas características do grupo alceno, que não foram observadas em EL-2N e EL-3N.

**Figura 15 – Espectros de absorção na região do infravermelho por Transformada de Fourier do elastômero (a) EL-2N, (b) EL-3N, (c) EL-Fr e (d) uma comparação entre eles**



Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados da análise FTIR dos polímeros analisados indicam que esses materiais são TPEs a baseados em estireno (TPE-S), uma vez que foi constatada a presença de anel aromático, hidrocarbonetos alifáticos saturados metila (CH<sub>3</sub>) e metileno (CH<sub>2</sub>) nos três materiais. Além disso, a observação de bandas associadas a hidrocarbonetos alifáticos insaturados, permitiu diferenciar a amostra EL-Fr das demais.

A comparação dos espectros no infravermelho dos materiais analisados com o de referência do TPE-S estireno-etileno-propileno-estireno (SEPS) da norma ISO 4650 (2012), apresentado no ANEXO A, aponta que as amostras podem ser

compostas pelo mesmo tipo de material, visto que há elevada similaridade entre os espectros.

As bandas associadas ao grupo funcional alceno, identificadas no espectro da amostra EL-Fr, são compatíveis com as do espectro do TPE-S estireno-butadieno-estireno (SBS), mostrado no ANEXO A, e, portanto, essa amostra pode ser uma mistura de TPE-S.

A Tabela 3 apresenta as bandas identificadas nos espectros de absorção na região do infravermelho por transformada de Fourier dos elastômeros analisados

**Tabela 3 – Bandas identificadas nos espectros de absorção na região do infravermelho dos elastômeros analisados**

Número de Onda da Banda (cm <sup>-1</sup> )	Atribuição da banda	Elastômero
2952	Estiramento assimétrico de CH <sub>3</sub> em PP	EL-2N, EL-3N e EL-Fr
2921	Estiramento de CH <sub>3</sub> em PS, CH em PP e CH <sub>2</sub> em PE	EL-2N, EL-3N e EL-Fr
2851	Estiramento simétrico de CH <sub>2</sub> em PS e PE	EL-2N, EL-3N e EL-Fr
1456	Deformação angular simétrica de CH <sub>2</sub>	EL-2N, EL-3N e EL-Fr
1377	Deformação angular simétrica de CH <sub>3</sub> em PP e PE, deformação de CH <sub>2</sub> em PE	EL-2N, EL-3N e EL-Fr
995		EL-Fr
966	Deformação angular fora do plano RCH=CH <sub>2</sub>	EL-Fr
911		EL-Fr
873	Vibração de (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) em blocos de estireno	EL-2N, EL-3N e EL-Fr
759		EL-2N, EL-3N e EL-Fr
698	Deformação angular de (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> )	EL-2N, EL-3N e EL-Fr

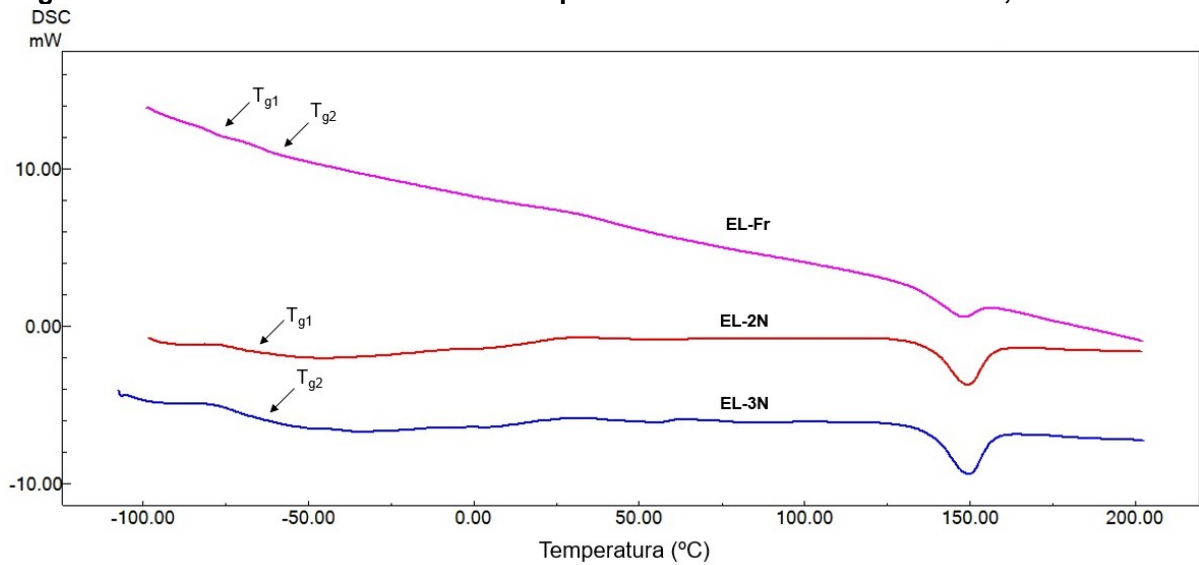
Fonte: Adaptado de Toma *et al.* (2011).

### 4.3 Caracterização Térmica

#### 4.3.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As curvas DSC obtidas no segundo aquecimento dos elastômeros, mostradas na Figura 16, revelam dois eventos térmicos, um relacionado à mudança na capacidade calorífica e outro associado à variação de entalpia das amostras, referentes aos fenômenos de transição vítrea e fusão cristalina, respectivamente.

**Figura 16 – Curvas DSC referentes ao 2º Aquecimento dos elastômeros EL-2N, EL-3N e EL-Fr**



Fonte: Autoria própria (2021).

A constatação do fenômeno de fusão cristalina confirma a hipótese de que os polímeros estudados tratam-se de TPEs, visto que borrachas convencionais vulcanizadas são amorfas.

Os eventos térmicos identificados na análise de DSC durante o segundo aquecimento das amostras, que revelam as propriedades intrínsecas dos materiais, são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Eventos térmicos identificados no 2º aquecimento dos elastômeros na análise DSC**

Elastômero	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	Fusão Cristalina	
			$T_m$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
EL-2N	-67,55	-	149,43	9,91
EL-3N	-66,76	-	149,62	10,29
EL-Fr	-79,32	-63,55	148,28	4,75

Nota:  $T_g$  corresponde à temperatura de transição vítrea e  $T_m$  à fusão cristalina

Fonte: Autoria própria (2021).

A  $T_m$  em torno de 149°C, observada nos três materiais elastoméricos, pode ser atribuída ao bloco de Polipropileno (PP) presente no SEPS, apesar de estar consideravelmente menor do que a  $T_m$  característica de PP, que geralmente ocorre em torno de 160°C. Esse comportamento pode estar relacionado à diminuição no tamanho dos cristalitos ou mudanças na ordem cristalina, em função de possíveis interações com outros segmentos como o Polietileno (PE) e Poliestireno (PS) (TOMA *et al.*, 2011).

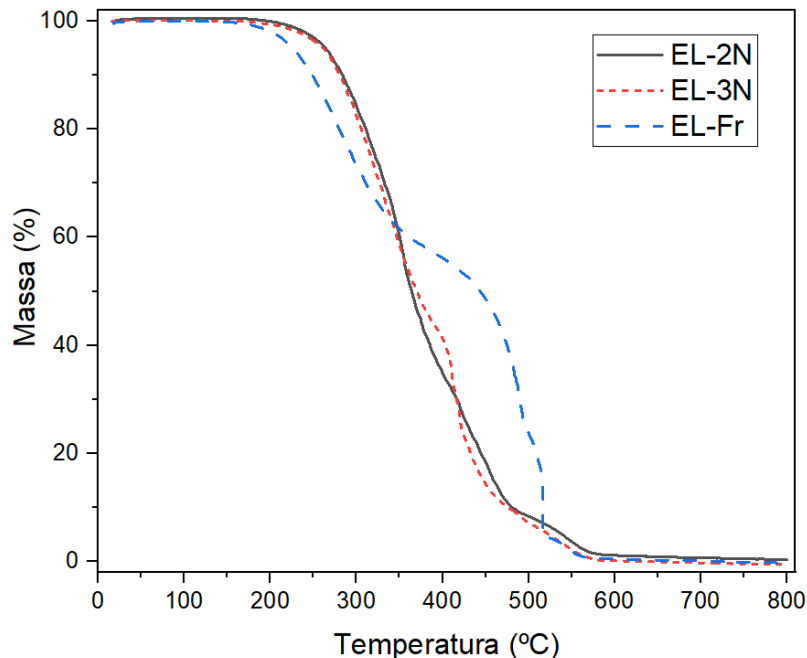
Os elastômeros EL-2N e EL-3N apresentaram  $T_g$  próximas, em torno de  $-67^\circ\text{C}$ , que podem estar associadas à fase etileno-propileno (EP) (ZHAO *et al.* 2018).

O elastômero EL-Fr apresentou duas  $T_g$ , uma em  $-79,32^\circ\text{C}$  e outra em  $-63,55^\circ\text{C}$ , compatíveis com a faixa de temperatura na qual as cadeias de butadieno e EP adquirem mobilidade, respectivamente. Essas observações consolidam a hipótese de que a amostra é composta por uma mistura de TPE-S, possivelmente SEPS e SBS (HOLDEN *et al.*, 2017).

#### 4.3.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

As curvas TGA, presentes na Figura 17, revelaram que as amostras EL-2N e EL-3N possuem comportamento térmico semelhante, consolidando os resultados de DSC e FTIR que indicaram que esses elastômeros são compostos pelo mesmo material. As curvas TGA e DTGA individual de cada elastômero são apresentadas no ANEXO B, sendo apresentadas nesta seção apenas a sobreposição dessas curvas, com o propósito de confirmar os resultados fornecidos pelas técnicas de FTIR e DSC.

**Figura 17 – Sobreposição das curvas TGA dos elastômeros analisados**



Fonte: Autoria própria (2021).

As variações de massa e as respectivas faixas de temperatura identificadas nas curvas TGA de cada elastômero, apresentadas na Tabela 5, ressaltam que os



elastômeros EL-2N e EL-3N possuem as mesmas faixas de temperatura de decomposição.

**Tabela 5 – Resultados da análise TGA dos elastômeros analisados**

<b>Elastômero</b>	<b>Faixa de Temperatura (°C)</b>	<b>Varição de Massa (%)</b>	<b>Resíduo Estável a 800°C (%)</b>
<b>EL-2N</b>	180 a 380	46,73	
	390 a 490	43,70	0
	490 a 600	9,57	
<b>EL-3N</b>	180 a 390	56,01	
	390 a 490	34,87	0
	490 a 600	9,12	
<b>EL-Fr</b>	150 a 380	41,79	
	380 a 530	53,42	0
	530 a 600	4,79	

**Fonte: Autoria própria (2021).**

As técnicas de FTIR, DSC e TGA permitiram caracterizar os elastômeros EL-2N e EL-3N como SEPS e o EL-Fr como mistura de SBS e SEPS. Nesses materiais, os blocos rígidos de estireno atuam como ligações cruzadas físicas, fornecendo excelente resistência mecânica, enquanto os blocos flexíveis de EP e butadieno oferecem elevada elasticidade (ZHAO *et al.*, 2018). Em vista disso, esses TPEs fornecem as propriedades requeridas para serem utilizados como artigos esportivos. Ademais, a diferença de composição entre o material falhado e os novos adquiridos para os ensaios de dobramento não é suficiente para ter diferenças significativas nas respostas mecânicas entre eles. Portanto a análise do comportamento mecânico dos elastômeros novos após o ensaio de dobramento, apresentados no próximo tópico, reflete o comportamento mecânico do elastômero fraturado.

#### **4.4 Análise Mecânica e Teste de Hipóteses**

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas em tração dos elastômeros EL-2N e EL-3N testados antes e após a simulação das condições de armazenamento. As propriedades obtidas para cada corpo de prova e as respectivas curvas são mostradas no Anexo B, sendo apresentados nesta seção somente os valores médios.

**Tabela 6 – Valores médios das propriedades em tração dos elastômeros analisados**

Elastômero	Tempo de dobramento (meses)	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
<b>EL-2N</b> (sem exposição ao sol)	0	4189,65 ± 363,64	0,80 ± 0
	4	3767,88 ± 1070,63	0,68 ± 0,02
	6	3500,75 ± 821,11	0,70 ± 0,10
	14	3261,74 ± 190,19	0,55 ± 0,02
<b>EL-3N</b> (com exposição ao sol)	0	3761,29 ± 695,71	0,70 ± 0,17
	4	2803,36 ± 135,85	0,84 ± 0,07
	6	2507,71 ± 247,64	0,71 ± 0,06
	14	2211,70 ± 170,80	0,69 ± 0,02

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos valores médios de tensão na ruptura e desvio padrão foram calculados os valores críticos ( $z$ ), conforme a Equação 1. Para a média da população ( $\mu_0$ ) foi utilizado o valor médio de tensão na ruptura dos corpos de prova ensaiados antes da simulação de dobramento e o valor crítico da distribuição normal ao nível de 5% de significância ( $z_\alpha$ ) foi fornecido pelo Quadro 3, presente no ANEXO B. Esses dados, que são apresentados na Tabela 7, permitiram rejeitar  $H_0$  após 14 meses de dobramento do elastômero EL-2N, portanto, é possível afirmar que após 14 meses de dobramento sem exposição ao sol, ocorre diminuição da resistência mecânica em tração do material.

**Tabela 7 – Resultados do teste de hipótese ao nível de significância de 5%**

Elastômero	Tempo de dobramento	Valor crítico ( $z$ )	Valor crítico da distribuição normal padrão ( $z_\alpha$ )	Conclusão
EL-2N	4	-0,68		Não rejeita $H_0$
	6	-1,45	-1,64	Não rejeita $H_0$
	14	-8,45		Rejeita $H_0$
EL-3N	4	-12,21		Rejeita $H_0$
	6	-8,77	-1,64	Rejeita $H_0$
	14	-15,71		Rejeita $H_0$

Fonte: Autoria própria (2021).

No caso do elastômero EL-3N,  $H_0$  foi rejeitado em todos os testes, desse modo, as evidências indicam que o dobramento e exposição ao sol possui efeito deletério na resistência mecânica em tração do material. Em vista disso, o

armazenamento desses objetos deve ser feito de forma que o componente não fique dobrado em sua embalagem e é fundamental que o fabricante ou fornecedor orientem os usuários a não deixar esses objetos dobrados e expostos ao sol, a fim de prolongar a sua vida útil.

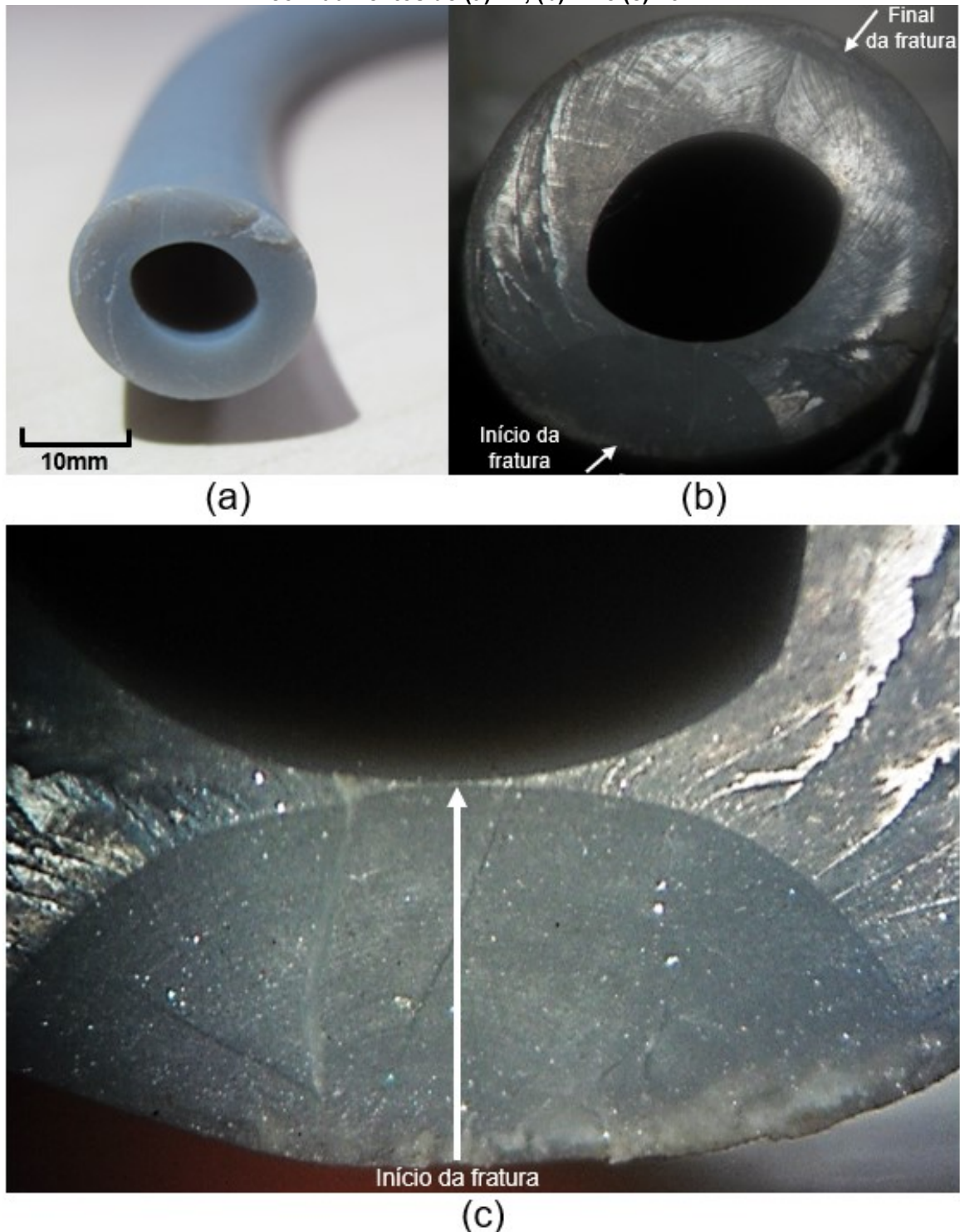
#### 4.5 Fractografia

Na Figura 18 são apresentadas imagens da superfície fraturada do elastômero EL-Fr, obtidas por uma câmera em (a), com ampliação de 2X, e por estereoscopia em (b) e (c). Na imagem em (b) é mostrada a origem e o final da fratura com ampliação de 7X, e em (c) é destacada a origem da fratura com ampliação de 16X.

Na região do início da fratura são observadas *rib marks*, que são marcas produzidas por mudanças na velocidade de propagação de trincas ou quando estas são interrompidas em situações de carregamentos cíclicos, com propagação somente quando o componente é solicitado mecanicamente. Uma vez que essas marcas semicirculares se expandem a partir do local de nucleação de uma trinca, foi identificada a origem da falha e a direção de propagação indicada pela seta na Figura 19 (c) (LAMPMAN, 2003).

A presença de *rib marks* na superfície de fratura revela que houve fadiga no material. Trincas podem ter sido nucleadas e propagadas na origem da fratura à medida que o componente era solicitado durante a sua utilização, percorrendo a direção indicada pela seta, e quando a área remanescente do material não suportou a carga aplicada ocorreu a falha catastrófica do material, caracterizada pelas marcas de propagação instável da trinca de ambos os lados do elastômero na Figura 18 (b).

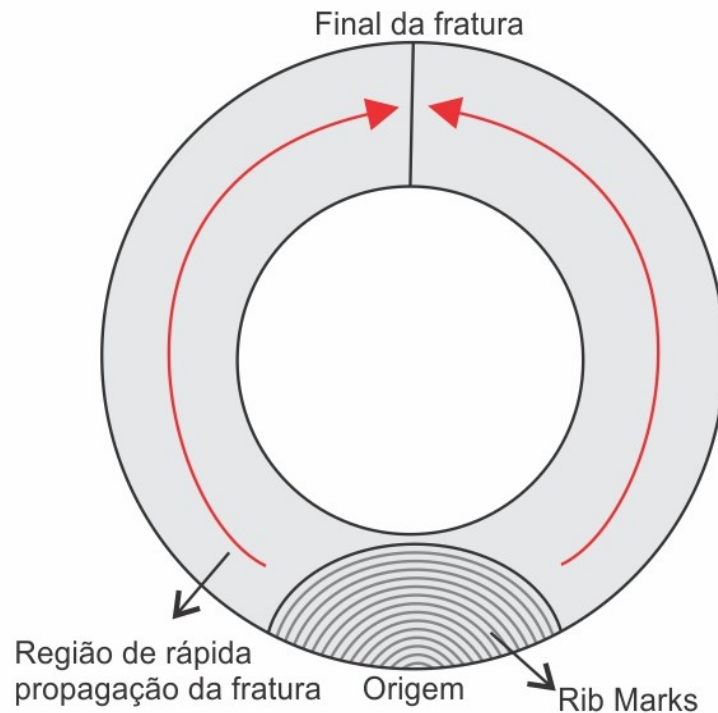
Figura 18 – Imagens da superfície fraturada do elastômero EL-Fr, com aumentos de (a) 2X, (b) 7X e (c) 16X



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 19 é apresentada a seção transversal do elastômero EL-Fr, indicando as marcas semicirculares características de *rib marks* na origem da fratura e a região de rápida propagação da falha até o final da fratura.

**Figura 19 – Representação da seção transversal do elastômero EL-Fr, com as indicações de *rib marks* na origem da falha e da região de rápida propagação da fratura até o final da falha**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Apesar da imagem obtida por estereoscopia não ter revelado a descontinuidade na origem da fratura que causou a falha do elastômero EL-Fr, a simulação das condições de armazenamento e os testes de hipóteses apontaram que esse condicionamento tem efeito deletério na resistência à tração do material, dependendo do tempo que o componente é armazenado dobrado e do ambiente, com ou sem exposição ao sol, que pode ser atribuído às marcas permanentes em sua superfície geradas durante o armazenamento. Essas descontinuidades podem atuar como regiões concentradoras de tensão, durante a solitação do componente, e propiciar a nucleação e propagação de trincas pelo mecanismo de fadiga. Portanto, a causa raiz humana da falha pode ser estar relacionada ao armazenamento incorreto do objeto pelo fabricante ou pelo usuário do artigo esportivo.

## 5 CONCLUSÃO

As investigações e análises desenvolvidas neste trabalho permitiram concluir:

- Por meio dos resultados de FTIR:
  - Que os materiais estudados são elastômeros baseados em estireno, uma vez que foi constatada a presença de anel aromático, hidrocarbonetos alifáticos saturados metila e metileno nos espectros obtidos;
  - Que o elastômero falhado, EL-Fr, possui composição química diferente dos elastômeros novos, EL-2N e EL-3N, possivelmente uma mistura de SEPS e SBS, já que foram observadas bandas associadas a hidrocarbonetos alifáticos insaturados, além de bandas características dos grupos metila, metileno e anel aromático;
- Com os resultados de DSC:
  - Que os elastômeros analisados tratam-se de elastômeros termoplásticos, visto que foi constatado o evento térmico de fusão cristalina nas curvas DSC;
  - Que as amostras possuem em sua composição SEPS, já que foi observado nos três materiais elastoméricos um evento endotérmico em torno de 149°C, característico de fusão cristalina de PP em interações com PE e PS;
  - Que o elastômero EL-Fr é composto por uma mistura de SEPS e SBS, posto que esse material apresentou duas transições vítreas, uma em -79,32°C e outra em -63,55°C, características de butadieno e etileno-propileno, respectivamente;
- Com os resultados de TGA verificou-se que os elastômeros EL-2N e EL-3N são compostos pelo mesmo material, uma vez que apresentaram as mesmas faixas de temperatura de decomposição térmica;
- Por meio dos resultados do ensaio de tração e testes de hipóteses:
  - Que o dobramento dos elastômeros em ambientes sem exposição por tempo prolongado pode reduzir a resistência mecânica à tração do material;

- Que o dobramento dos elastômeros em ambientes com exposição ao sol, possui efeito deletério na resistência mecânica à tração do material após 4 meses de armazenamento;
- Que a deterioração das propriedades mecânicas em tração dos elastômeros é acentuada com a exposição ao sol e pode ocorrer antes do período de 4 meses, que foi o tempo mínimo de simulação neste trabalho;
- Por meio de fractografia do elastômero EL-Fr que a causa raiz física da falha foi o mecanismo de fadiga, devido à presença de *rib marks* na origem da fratura;
- Que as causas raízes humanas podem ter sido:
  - o dobramento do artigo esportivo na embalagem fornecida pelo fabricante, já que esse condicionamento mostrou ser prejudicial às propriedades mecânicas dos elastômeros após 14 meses sem exposição ao sol;
  - a utilização incorreta do componente por parte do usuário, que pode ter deixado o elastômero dobrado por período suficiente para causar dobras permanentes em sua superfície, e até mesmo exposto o objeto ao sol;
- Que as causas raízes latentes podem ter sido:
  - regulamentos internos da empresa que fabrica o produto, que ditam procedimentos para o empacotamento dos elastômeros e que precisariam ser revistos para evitar falhas semelhantes;
  - falta de instruções do fabricante ao usuário sobre a forma adequada de armazenar o produto, de modo que o dobramento e a exposição ao sol sejam evitados, com o intuito de prolongar a vida útil do objeto.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar se o dobramento dos elastômeros utilizados na prática de atividades físicas causa fragilização nas regiões das dobras, devido à exsudação de plastificante presente no material, por meio de técnicas de análise química como a Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC/MS);
- Simular o dobramento dos elastômeros sem exposição ao sol por tempos distintos dos adotados neste trabalho e realizar o ensaio de tração, com o propósito de verificar se há evidências de redução da resistência mecânica em tração do material antes do período de 14 meses de condicionamento;
- Avaliar o comportamento em fadiga dos elastômeros após a simulação de dobramento com e sem exposição ao sol, por meio de ensaio de fadiga.



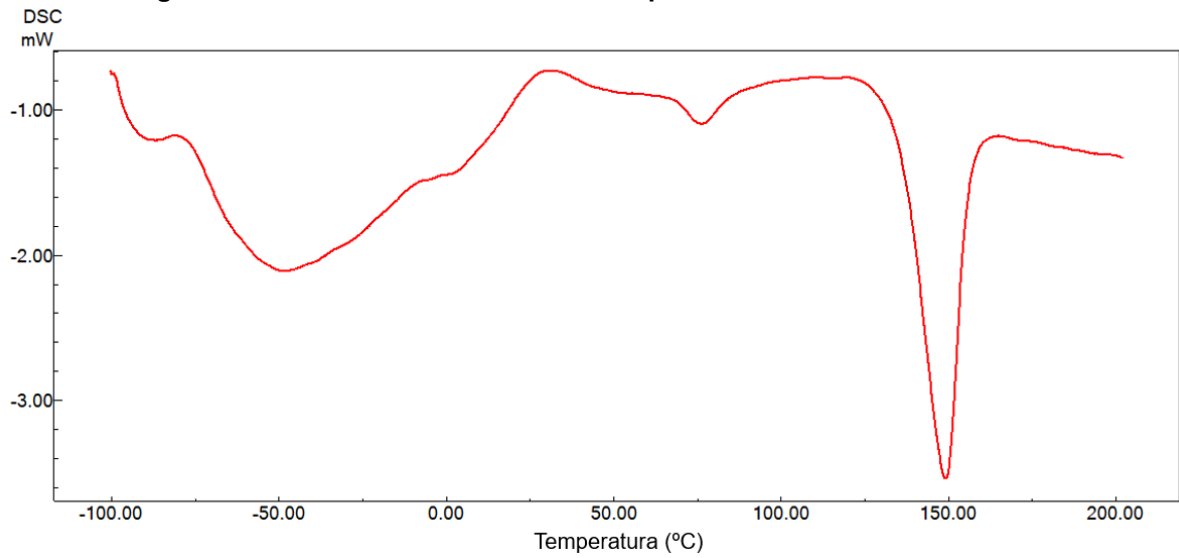
## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G. S. de; SOUZA, W, B. **Engenharia dos Polímeros: Tipos de Aditivos, Propriedades e Aplicação**. 1 ed. São Paulo: Érica: 2015.
- ARA, A. B; MUSETTI, A. V; SCHNEIDERMAN, B. **Introdução à Estatística**. 1 ed. São Paulo: Blücher, 2003.
- BALAN, K. P. Tools and Techniques. **Metallurgical Failure Analysis**, [S.I.], p. 17-26, 2018.
- BECKER, W. T; SHIPLEY, R. J. **Failure Analysis and Prevention**. v.11. USA: ASM International, 2002.
- BROOKS, C. R; CHOUDHURY, A. **Failure Analysis of Engineering Materials**. McGraw-Hill, 2002.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CANEVAROLO, S. V. Jr. **Ciência de Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed., Artliber: São Paulo, 2006.
- CANEVAROLO, S. V. Jr. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. Artliber: São Paulo, 2003.
- CASTRO, J. T. P. de; MEGGIOLARO; M. A. **Fadiga: técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço**, v. I. Create Space: Estados Unidos, 2009.
- DESHMUKH, K. *et al.* Mechanical analysis of polymers. **Polymer Science And Innovative Applications**, [S.L.], p. 117-152, 2020.
- GARCIA, A; SPIM, J. A; SANTOS, C. A dos. **Ensaaios dos Materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- HAYES, M. D.; EDWARDS, D. B; SHAH, A. R. *et al.* Fractography as a Failure Analysis Tool. **Fractography In Failure Analysis Of Polymers**, [S.I.], p. 6-22, 2015.
- HOLDEN, G. *et al.* Thermoplastic Elastomers. **Applied Plastics Engineering Handbook**, [S.L.], p. 91-107, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4650: Rubber — Identification — Infrared spectrometric methods**. Switzerland, 2012.
- JOLLIVET, T; GREENHALGH, E. Fractography, a Powerful Tool for Identifying and Understanding Fatigue in Composite Materials. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 133, p.171-178, 2015.

- KARSAK, E. E. *et al.* Product planning in quality function deployment using a combined analytic network process and goal programming approach. **Computers & Industrial Engineering**, [s.l.], v. 44, n. 1, p.171-190, jan. 2003.
- LAMPMAN, S. **Characterization and Failure Analysis of Plastics**. ASM International: Materials Park, Ohio, 2003.
- LIBERA, M. R.; EGERTON, R. F. Advances in the Transmission Electron Microscopy of Polymers. **Polymer Reviews**, [s.l.], v. 50, n. 3, p. 321-339, 27 jul. 2010.
- LOSS, J. F. *et al.* Quantificação da resistência oferecida por bandas elásticas. **Revista Brasileira de Ciências do Esporte**, v. 24, n. 1, 2002.
- MICHLER, G. H. Techniques and Methods. **Atlas Of Polymer Structures**, [S.L.], p. 27-56, 4 dez. 2015.
- PARRINGTON, R. J. Fractography of Metals and Plastics. **Plastics Failure Analysis And Prevention**, [S.I.], p. 127-134, 2001.
- SANCHES, N. B. *et al.* Avaliação do uso de técnicas PIR-G/FT-IR para caracterização de elastômeros. **Polímeros**, [s.l.], v. 16, n. 3, p.211-216, 2006.
- SKOOG, D. A; HOLLER, F. J; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5 ed. Porto Alegre: Brookman, 2002.
- TOMA, L. *et al.* Thermal and Spectral Characterization of PP-TPE Blends. **Materials, Methods & Technologies**, v. 5, 2011.
- ZHAO, Z. *et al.* Synthesis and Properties of SEPS-g-PEO Copolymers with Varying Branch Lengths. **Chinese Journal Of Polymer Science**, [S.L.], v. 36, n. 8, p. 934-942, 7 mar. 2018.

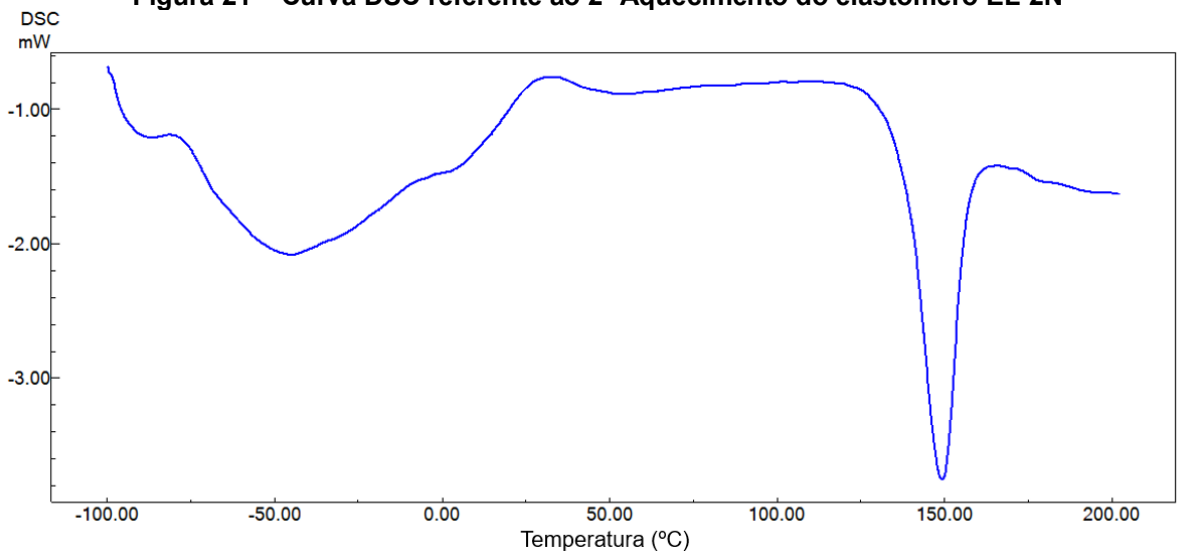
## **APÊNDICE A - Resultados da Análise DSC**

**Figura 20 – Curva DSC referente ao 1º Aquecimento do elastômero EL-2N**



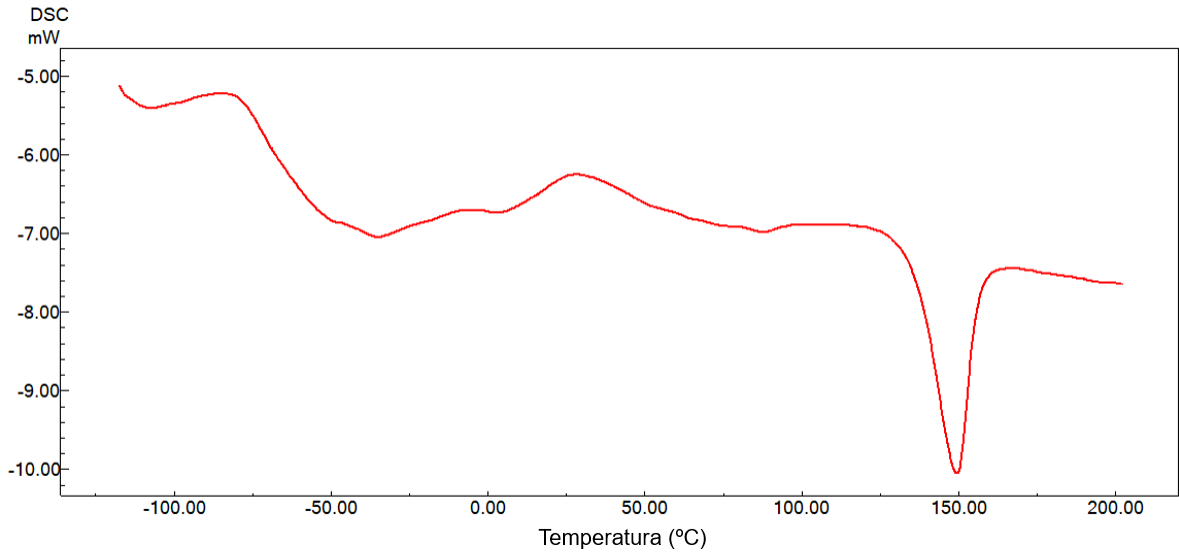
**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Figura 21 – Curva DSC referente ao 2º Aquecimento do elastômero EL-2N**



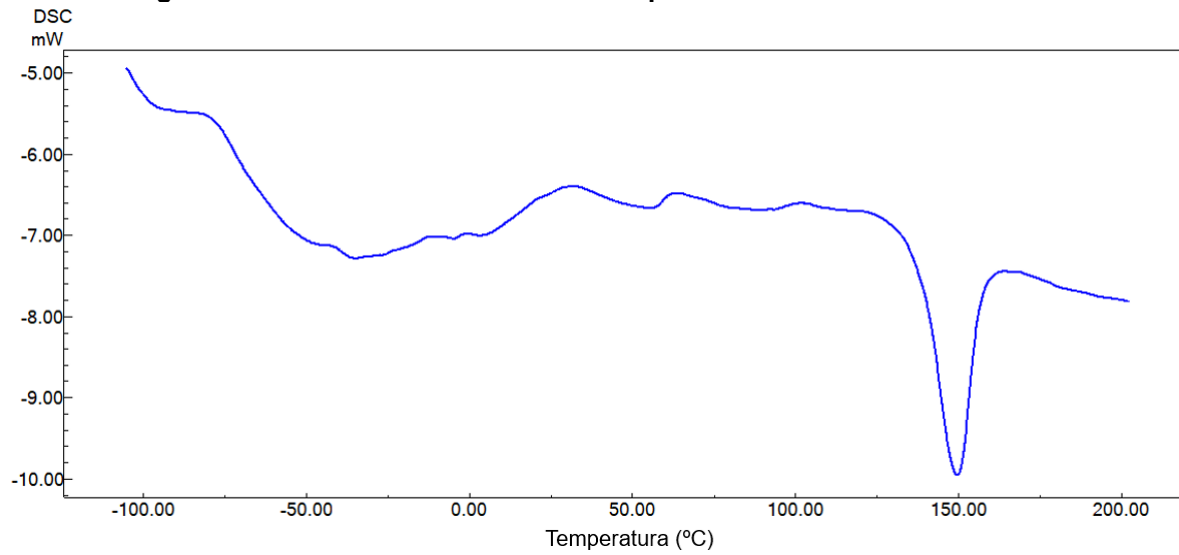
**Fonte: Autoria própria (2021).**

**Figura 22 – Curva DSC referente ao 1º Aquecimento do elastômero EL-3N**



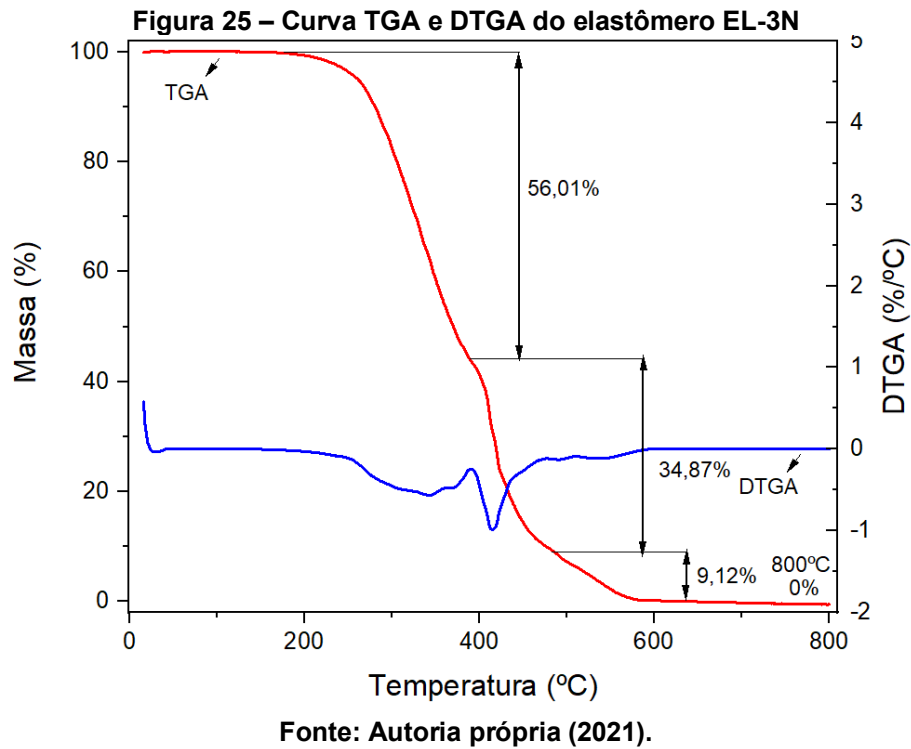
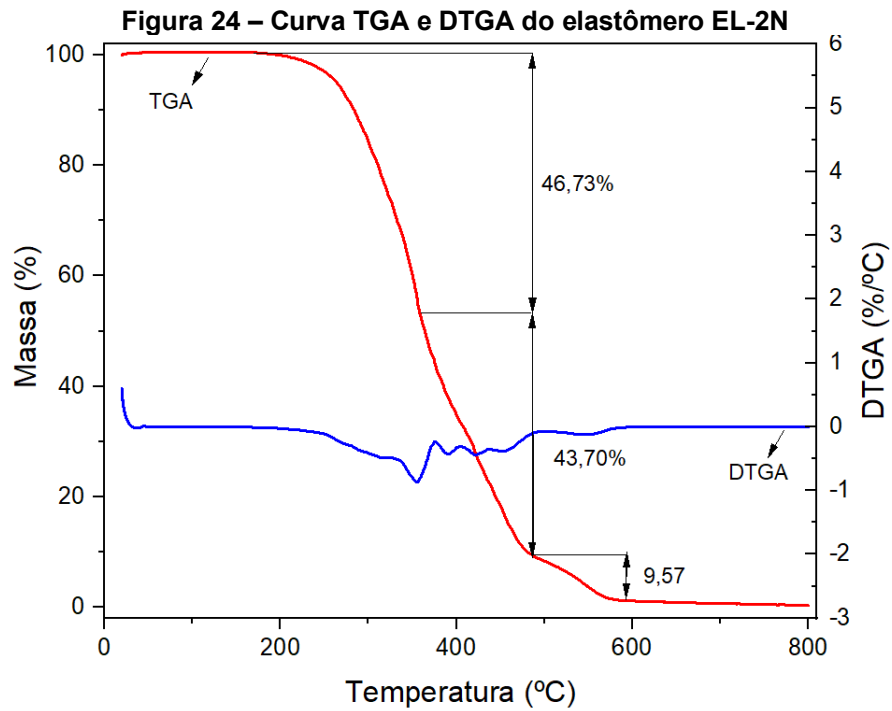
**Fonte: Autoria própria (2021).**

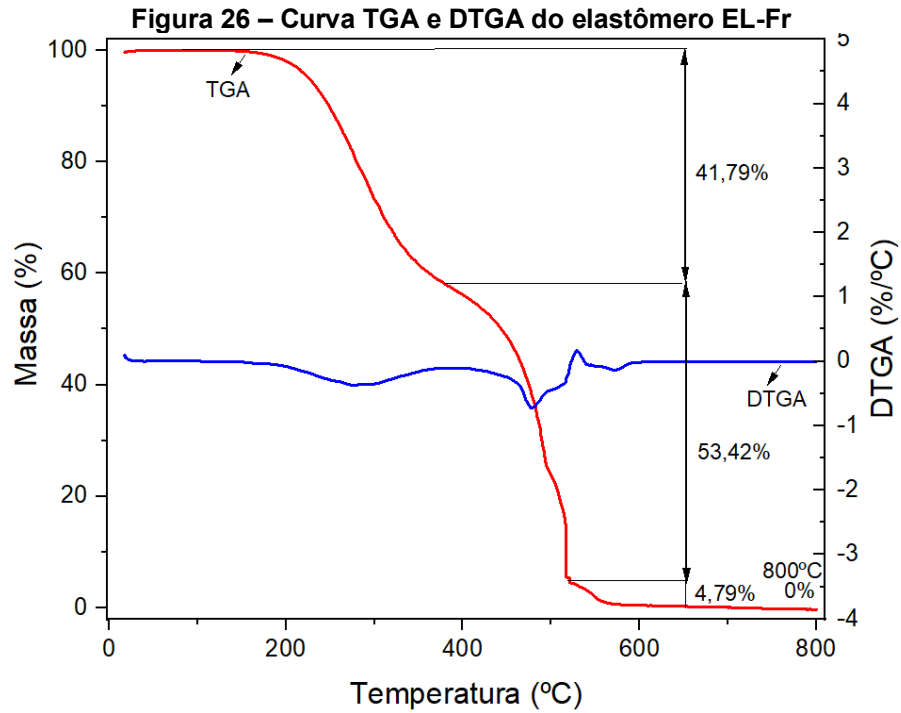
**Figura 23 – Curva DSC referente ao 2º Aquecimento do elastômero EL-3N**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

## **APÊNDICE B - Resultados da análise TGA**

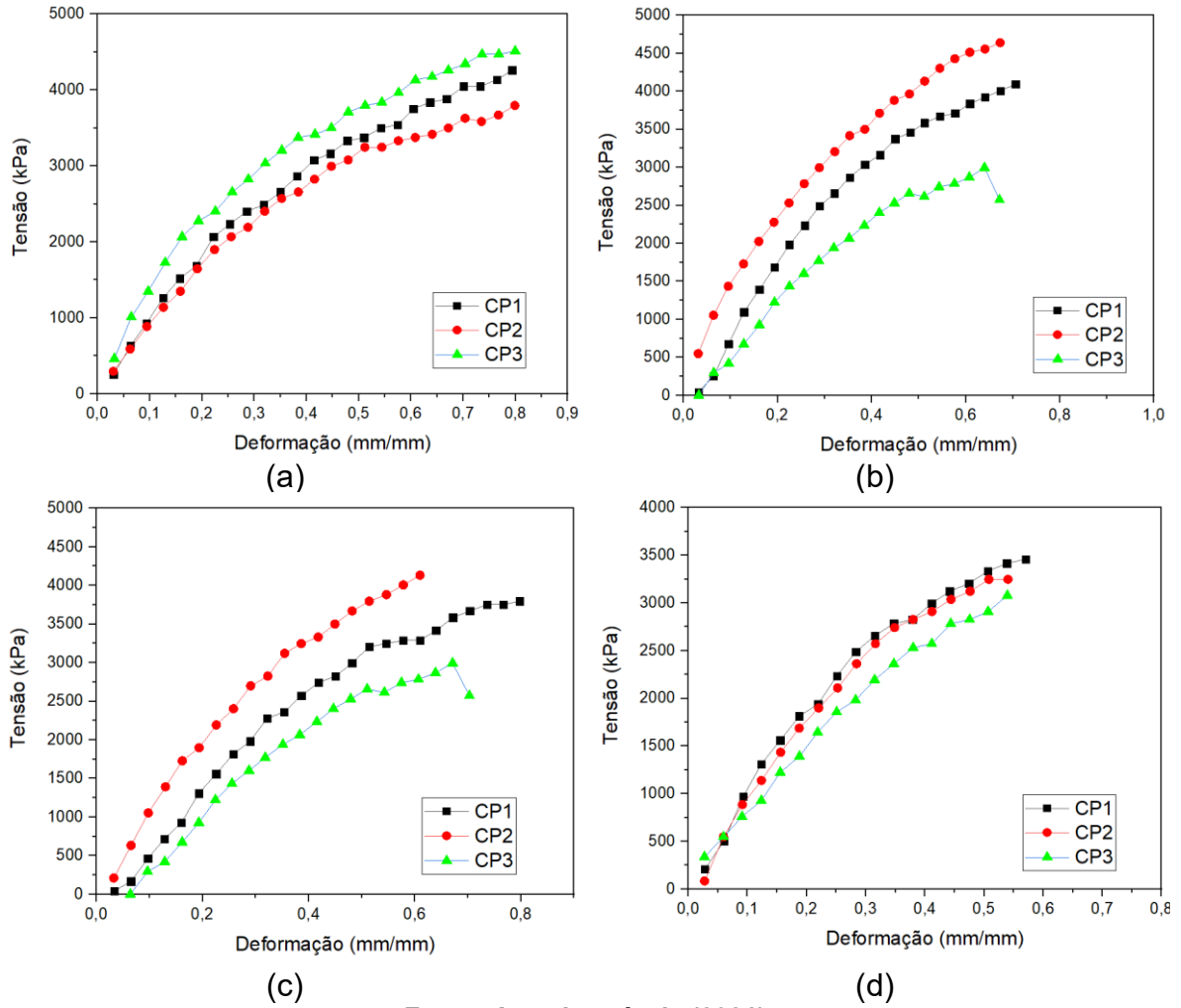






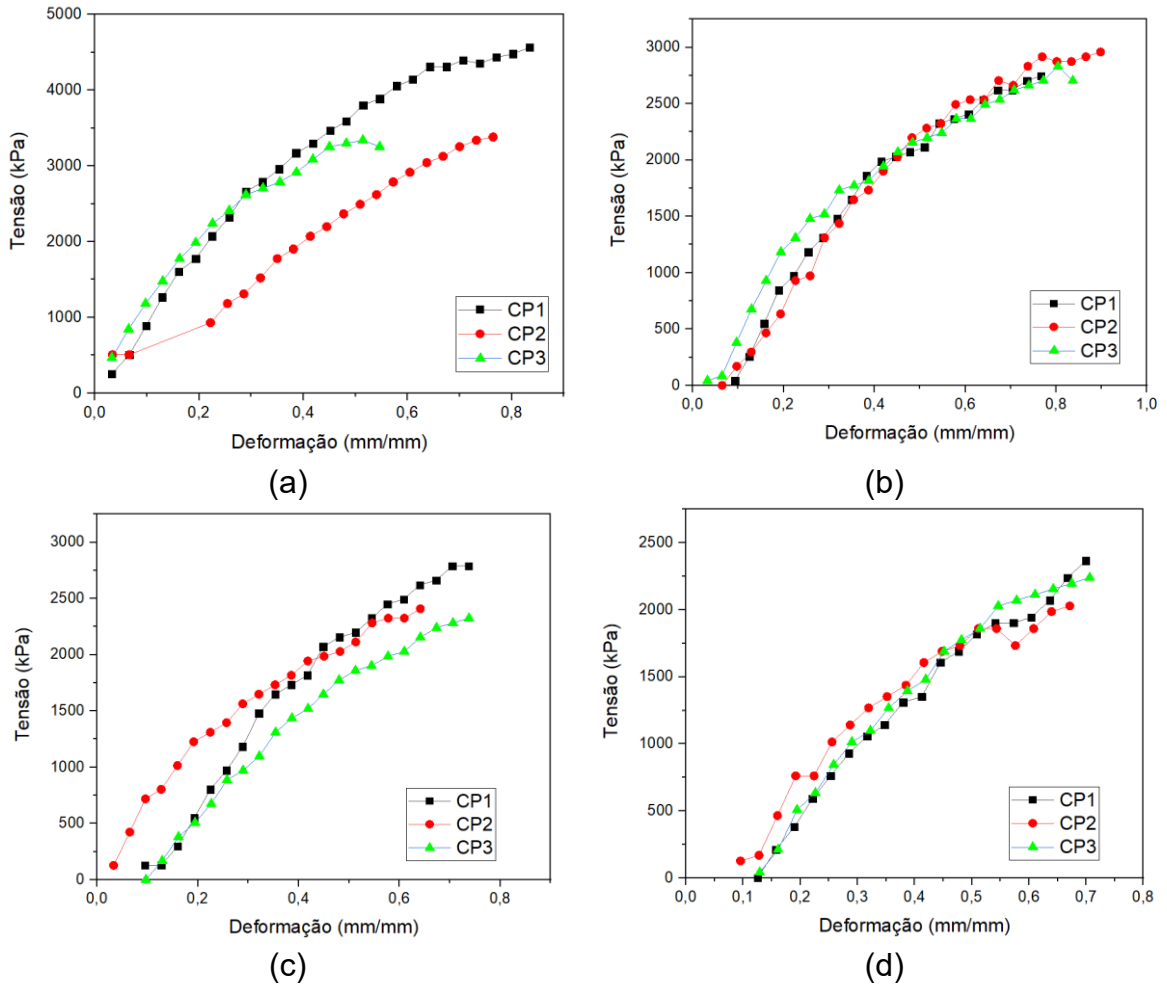
## **APÊNDICE C - Resultados do ensaio de tração**

**Figura 27 – Curvas tensão de tração x deformação dos corpos de prova do elastômero EL-2N (a) antes, após (b) 4 meses, (c) 6 meses e (d) 14 meses de simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 28 – Curvas tensão de tração x deformação dos corpos de prova do elastômero EL-3N (a) antes, após (b) 4 meses, (c) 6 meses e (d) 14 meses de simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 8 – Propriedades em tração do elastômero EL-2N antes da simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol**

CP	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
1	4259,95	0,80
2	3795,99	0,80
3	4513,01	0,80
<b>Média</b>	<b>4189,65</b>	<b>0,80</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>363,64</b>	<b>0</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 9 – Propriedades em tração do elastômero EL-2N após 4 meses de simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol**

CP	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
1	4091,24	0,70
2	4639,55	0,67
3	2572,84	0,67
<b>Média</b>	<b>3767,88</b>	<b>0,68</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1070,63</b>	<b>0,02</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 10 – Propriedades em tração do elastômero EL-2N após 6 meses de simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol**

CP	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
1	3795,99	0,80
2	4133,42	0,61
3	2572,84	0,70
<b>Média</b>	<b>3500,75</b>	<b>0,70</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>821,11</b>	<b>0,10</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 11 – Propriedades em tração do elastômero EL-2N após 14 meses de simulação das condições de armazenamento sem exposição ao sol**

CP	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
1	3458,57	0,57
2	3247,68	0,54
3	3078,97	0,54
<b>Média</b>	<b>3261,74</b>	<b>0,55</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>190,19</b>	<b>0,02</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 12 – Propriedades em tração do elastômero EL-3N antes da simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol**

CP	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
1	4564,26	0,83
2	3380,94	0,76
3	3338,67	0,51
<b>Média</b>	<b>3761,29</b>	<b>0,70</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>695,71</b>	<b>0,17</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 13 – Propriedades em tração do elastômero EL-3N após 4 meses de simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol**

CP	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
1	2747,01	0,77
2	2958,32	0,90
3	2704,75	0,84
<b>Média</b>	<b>2803,36</b>	<b>0,84</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>135,85</b>	<b>0,07</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

**Tabela 14 – Propriedades em tração do elastômero EL-3N após 6 meses de simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol**

CP	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
1	2789,28	0,74
2	2408,92	0,64
3	2324,39	0,74
<b>Média</b>	<b>2507,53</b>	<b>0,71</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>247,64</b>	<b>0,06</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

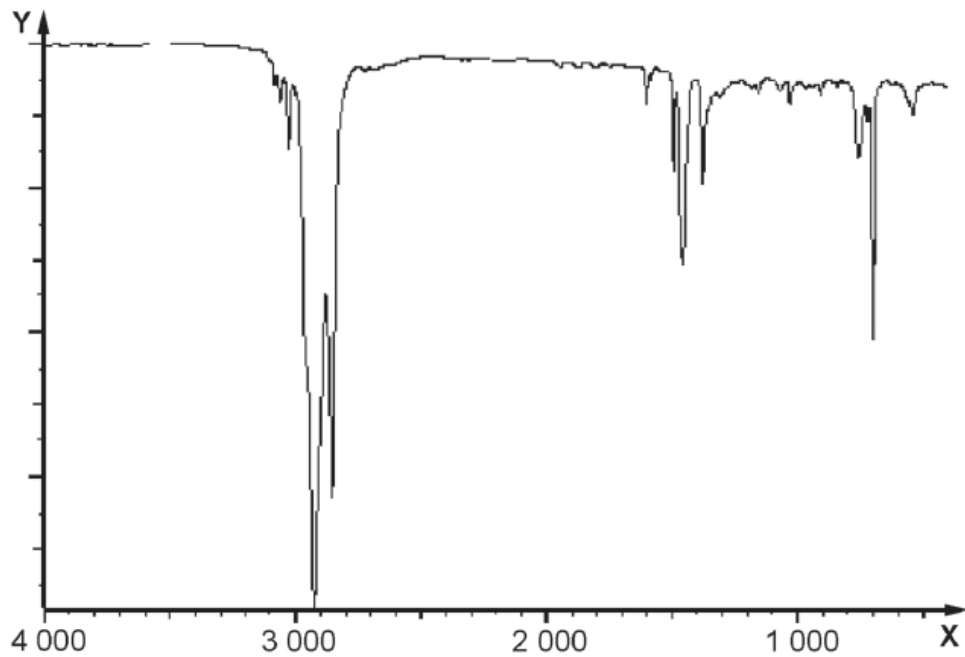
**Tabela 15 – Propriedades em tração do elastômero EL-3N após 14 meses de simulação das condições de armazenamento com exposição ao sol**

CP	Tensão na Ruptura (kPa)	Deformação na Ruptura (mm/mm)
1	2366,66	0,70
2	2028,56	0,67
3	2239,87	0,71
<b>Média</b>	<b>2211,70</b>	<b>0,69</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>170,80</b>	<b>0,02</b>

Fonte: Autoria própria (2021).

## **ANEXO A - Espectros no infravermelho do SEPS e SBS**

**Figura 29 – Espectro no Infravermelho Poliestireno-poli(etileno-propileno)-estireno (SEPS)**



**Nota: O eixo das abscissas corresponde ao número de onda em  $\text{cm}^{-1}$  e o das ordenadas à transmitância em %.**

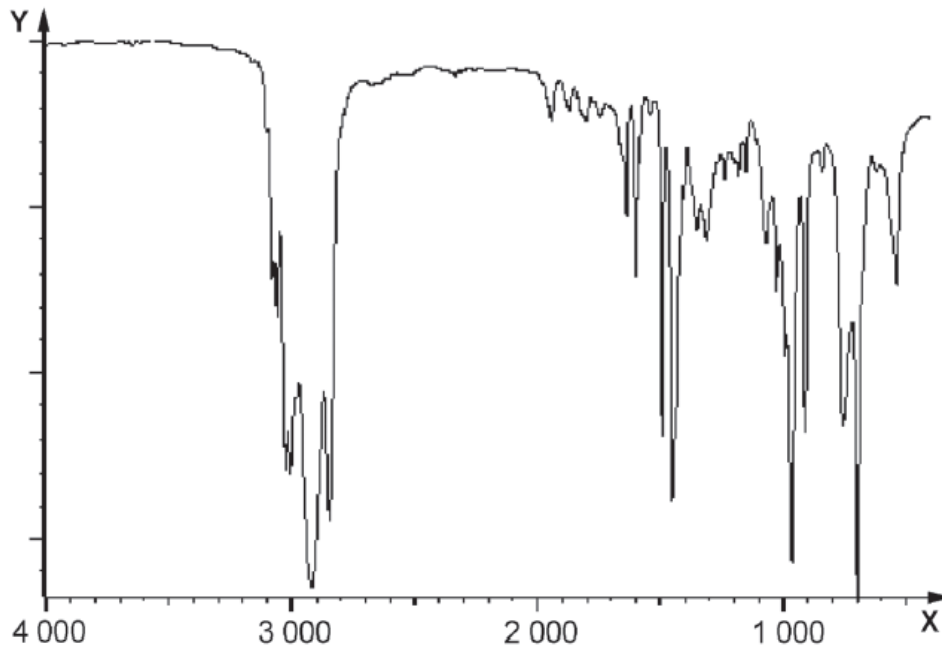
**Fonte: ISO 4650 (2012).**

**Tabela 16 – Grupos funcionais SEPS**

Número de Onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupo Funcional
700 e 760	– $\text{C}_6\text{H}_5$
1370	$\text{CH}_3$
1460	– $\text{CH}_2$
1500 e 1600	– $\text{C}_6\text{H}_5$

**Fonte: Adaptado de ISO 4650 (2012).**

**Figura 30 – Espectro no Infravermelho Copolímero em bloco estireno-butadieno (SBS)**



**Nota: O eixo das abscissas corresponde ao número de onda em  $\text{cm}^{-1}$  e o das ordenadas à transmitância em %.**

**Fonte: ISO 4650 (2012).**

**Tabela 17 – Grupos funcionais SBS**

Número de Onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupo Funcional
700 e 760	– $\text{C}_6\text{H}_5$
910	– $\text{CH}=\text{CH}_2$
970	– $\text{CH}=\text{CH}-$ (trans)
995	$\text{CH}_2=\text{CH}-$ – $\text{CH}=\text{CH}-$ (cis)
1460	– $\text{CH}_2$
1500 e 1600	– $\text{C}_6\text{H}_5$
1640	$> \text{C}=\text{C} <$

**Fonte: Adaptado de ISO 4650 (2012).**



## **ANEXO B - Quadro de Distribuição Normal**

Quadro 3 – Distribuição normal

Parte inteira e primeira decimal de $z$	Segunda decimal de $z$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4841	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641
0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4091	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2644	0,2611	0,2579	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2297	0,2266	0,2236	0,2207	0,2177	0,2148
0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
1,0	0,1587	0,1563	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1094	0,1075	0,1057	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,0096	0,0094	0,0091	0,0089	0,0087	0,0084
2,4	0,0082	0,0080	0,0078	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0068	0,0066	0,0064
2,5	0,0062	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048
2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
2,8	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019
2,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014
3,0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010

Fonte: Ara, Musetti e Schneiderman (2003).