

SARAH MENDES  
ORGANIZADORA

**ESTUDO DOS ATUADORES  
DE MONOFILAMENTOS DE POLIAMIDA  
ESPIRALADOS**

CURITIBA  
EDITORA REFLEXÃO ACADÊMICA  
2025



**Sarah Silveira Mendes**  
Organizadora



**Estudo dos atuadores de  
monofilamentos de poliamida  
espiralados**

Reflexão Acadêmica  
editora

**Curitiba**  
**2025**

Copyright © Editora Reflexão Acadêmica  
Copyright do Texto © 2025 O Autor  
Copyright da Edição © 2025 Editora Reflexão Acadêmica  
Editora-Chefe: Profa. Msc. Barbara Luzia Sartor Bonfim Catapan  
Diagramação: Editora  
Edição de Arte: Editora  
Revisão: O Autor

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva da autora. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos a autora, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

### Conselho Editorial:

Prof<sup>a</sup>. Msc. Rebeka Correia de Souza Cunha, Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Prof. Msc. Andre Alves Sobreira, Universidade do Estado do Pará – UEPA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Clara Mariana Gonçalves Lima, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Prof<sup>a</sup>. PhD Jalsi Tacon Arruda, Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriana Avanzi Marques Pinto, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP

Prof. Dr. Francisco Souto de Sousa Júnior, Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFRSA

Prof. Dr. Renan Gustavo Pacheco Soares, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Sérgio Campos, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Brasil.

Prof. Dr. Francisco José Blasi de Toledo Piza, Instituição Toledo de Ensino, Brasil.

Prof. Dr. Manoel Feitosa Jeffreys, Universidade Paulista e Secretaria de Educação e Desporto do Amazonas, Brasil.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mariana Wagner de Toledo Piza, Instituição Toledo de Ensino, Brasil.

Prof. Msc. Gleison Resende Sousa, Ananguera Polo Camocim, Brasil.

Prof<sup>a</sup>. Msc. Raiane Vieira Chaves, Universidade Federal de Sergipe, Brasil.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thalita Siqueira Sacramento, Escola da Natureza- Secretaria de Educação do Distrito Federal, Brasil.

Prof. Msc. André Luiz Souza, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leonice Aparecida de Fatima Alves Pereira Mourad, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lenita de Cássia Moura Stefani, Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil.



Reflexão Acadêmica  
editora

Ano 2025

Prof.<sup>a</sup>. Msc. Vanesa Nalin Vanassi, Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Khétrin Silva Maciel, Universidade Federal do Sul da Bahia, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Adriana Crispim de Freitas, Universidade Federal do Maranhão, Brasil.  
Prof. Esp. Richard Presley Silva Lima Brasil, Centro De Educação Superior De Inhumas Eireli, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Vânia Lúcia da Silva, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Anna Maria de Oliveira Salimena, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Maria Clotilde Henriques Tavares, Universidade de Brasília, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Márcia Antonia Guedes Molina, Universidade Federal do Maranhão, Brasil.  
Prof. Msc. Mateus Veppo dos Santos, Centro Universitário Euro-Americano, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Adriana Xavier Alberico Ruas, Funorte, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Eliana Amaro de Carvalho Caldeira, Centro Universitário Estácio – Juiz de Fora MG, UFJF, Brasil.  
Prof. Msc. João Gabriel de Araujo Oliveira, Universidade de Brasília, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Anísia Karla de Lima Galvão, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rita Mônica Borges Studart, Universidade de Fortaleza, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Adriane Karal, UDESC/UCEFF, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Darlyne Fontes Virginio, IFRN, Brasil.  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Luciana Mação Bernal, Universidade Federal de São Carlos, Brasil.  
Prof. Dr. Roberto José Leal, Escola de Enfermagem Anna Nery / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.



Reflexão Acadêmica  
editora

**Ano 2025**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Estudo dos atuadores de monofilamentos de poliamida espiralados [livro eletrônico] / organização Sarah Mendes. -- 2. ed. -- Curitiba, PR : Editora Reflexão Acadêmica, 2025.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui: Bibliografia

ISBN: 978-65-84610-66-8

DOI: 10.51497/reflex.978-65-84610-66-8

1. Engenharia. 2. Engenharia mecânica.  
I. Mendes, Sarah. II. Título.

25-259767

CDD-621

Editora Reflexão Acadêmica  
Curitiba – Paraná – Brasil  
contato@reflexaoacademica.com.br



Reflexão Acadêmica  
editora

**Ano 2025**

Aos Meus Pais, Paula e Lucas

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar com as dificuldades.

Aos meus pais, Fernando e Rejane, pelo apoio e amor incondicionais, sempre, principalmente nas horas mais difíceis. Por sempre me ajudarem de modos que eu nem sabia que seriam possíveis.

À minha irmã e amiga, Paula, que mesmo sendo tão diferente de mim é a melhor irmã que eu poderia pedir a Deus.

Ao Lucas, pelo apoio incondicional, carinho, amor, força e paciência. Ao Fred e Nilton por serem perfeitos e alegrarem meus dias. À Risete e Ricardo, pela amizade e apoio. Ao Luthi, por todos os rabinhos abanando e lambeijos.

Aos meus avós, Anésia, Celeste e Guido† pelo incentivo e amor.

Às amigas Rafa e Marina, pela amizade, incentivo, apoio e ajuda possibilitando a realização deste trabalho.

À Ana Vitória e Carol pelo apoio, companheirismo, amizade incentivo, apoio e ajuda possibilitando a realização de todos meus sonhos.

Aos colegas do LOM e UFF pela ajuda prestada durante os ensaios, pela amizade e momentos de descontração.

Ao meu orientador Professor Luiz Carlos, que me mostrou os caminhos a serem seguidos e me apoiou nos momentos mais críticos. Também não posso deixar de agradecer a compreensão e pelas discussões que enriqueceram o trabalho.

Gostaria de agradecer ao apoio financeiro das agências de financiamento do governo brasileiro FAPERJ, Capes e CNPq.

## **SOBRE A AUTORA**

Sarah Silveira Mendes é doutora e mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Fluminense (UFF), com graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Possui também formação em Licenciatura em Física pelo Centro Universitário ETEP.

Além disso, tem diversas especializações na área de engenharia e ensino, incluindo Engenharia Metalúrgica – Processos de Fabricação, Engenharia de Materiais, Engenharia de Segurança do Trabalho, Docência e Gestão do Ensino Superior e Gerenciamento de Projetos TI.

Atualmente, é professora adjunta de materiais e processos de fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), onde atua no ensino e pesquisa. Sua trajetória acadêmica e profissional é marcada pelo aprofundamento técnico e interdisciplinaridade, contribuindo para a formação de novos engenheiros e para o avanço do conhecimento na área.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal a investigação de uma nova categoria de atuadores termomecânicos fabricados com monofilamentos espiralados de poliamida (MEPs). Os MEPs são materiais com memória de forma, de baixo custo, que atuam sem histerese e que possuem eficiência maior que muitos atuadores já desenvolvidos. O trabalho consistiu em quatro partes: i) o módulo de elasticidade do monofilamento de poliamida não espiralado foi determinado através de testes de tração com temperatura constante (30, 50, 70 e 100°C); ii) o coeficiente de expansão térmica e a temperatura de transição vítrea do monofilamento de poliamida não espiralado foram determinados usando uma nova metodologia; iii) a poliamida também foi caracterizada usando os métodos convencionais de termogravimetria (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), difração de raios X (DRX) e a espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e iv) os MEPs foram fabricados e testados com diferentes pré-deformações e temperaturas. Nesse trabalho foi usado um monofilamento de poliamida 6/66 com diâmetro igual a 0,8 mm. O método de correlação de imagens digitais foi usado para determinar os deslocamentos e deformações nas amostras de poliamida não espiraladas e nos MEPs. Um modelo fenomenológico baseado na teoria de molas helicoidais foi proposto para descrever o comportamento mecânico dos MEPs. Os resultados indicaram que o módulo de elasticidade do monofilamento de poliamida apresenta uma dependência com a temperatura, como já esperado. Além disso, usando a metodologia proposta, foi possível verificar que o coeficiente de expansão térmica mudou de um valor baixo e negativo para um valor alto, e o ponto de transição desta mudança está associado com a temperatura de transição vítrea. Com as informações da temperatura aplicada, força e deslocamentos gerados, foi mostrado que o modelo baseado na teoria de molas helicoidais pode ser usado para prever o comportamento mecânico dos MEPs.

**PALAVRAS-CHAVE:** monofilamento de poliamida, atuadores poliméricos, propriedades mecânicas e térmicas, correlação de imagens digital.

## ABSTRACT

This work had as main objective the investigation of a new category of thermomechanical actuators manufactured with spiraled polyamide monofilaments (MEPs). MEPs are low-cost, shape-memory materials that act without hysteresis and are more efficient than many already- developed actuators. The work consisted of four parts: i) the modulus of elasticity of the non- coiled polyamide monofilament was determined through tensile tests at constant temperature (30, 50, 70 and 100°C); ii) the thermal expansion coefficient and the glass transition temperature of the uncoiled polyamide monofilament were determined using a new methodology; iii) the polyamide was also characterized using the conventional methods of thermogravimetry (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), X-ray diffraction (DRX) and Fourier Transform Infrared spectrometry (FTIR) and iv) the MEPs were manufactured and tested with different pre-strains and temperatures. In this work, a polyamide 6/66 monofilament with a diameter equal to 0.8 mm was used. The digital image correlation method (DIC) was used to determine the displacements and strains in the uncoiled polyamide samples and in the MEPs. A phenomenological model based on the theory of coil springs was proposed to describe the mechanical behavior of MEPs. The results indicated that the modulus of elasticity of the polyamide monofilament is temperature dependent, as expected. Furthermore, using the proposed methodology, it was possible to verify that the thermal expansion coefficient changed from a low and negative value to a high value, and the transition point of this change is associated with the glass transition temperature. With the information of the applied temperature, force and displacements generated, it was shown that the model based on the theory of coil springs can be used to predict the mechanical behavior of MEPs.

**KEYWORDS:** polyamide monofilament, polymeric actuators, mechanical and thermal properties, digital image correlation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem de um braço com os MEPs .....	2
Figura 2 – Bioinspiração de robô e robô com os MEPs .....	2
Figura 3 – Antepup – robô de seis pernas .....	3
Figura 4 – Microestrutura do atuador de poliamida.....	6
Figura 5 – Ilustração esquemática do mecanismo de funcionamento de um atuador homoquiral (a) e de um atuador heteroquiral (b).....	11
Figura 6 – Aparato experimental para os ensaios isotérmicos de tração.....	14
Figura 7 – Perfis de temperatura imposto durante os testes de tração isotérmicos.....	15
Figura 8 – Aparato experimental para os testes com o monofilamento de poliamida. ....	16
Figura 9 – Corpo de prova com o padrão aleatório e o campo de deslocamentos vertical (v) e horizontal (u) obtidos usando o método DIC.....	16
Figura 10 – Perfil de temperatura dos ciclos térmicos com temperatura máxima de 80°C, 90°C e 100°C. .	17
Figura 11 – Perfil de temperatura dos testes com temperatura constante.....	18
Figura 12 – Monofilamentos de poliamida no estado não deformado (a) a 30 ° C, deformadas a 100 ° C com movimentos de corpo rígido (b), deformadas sem rotação de corpo rígido (d) e deformadas sem movimentos de corpo rígido (e).....	21
Figura 13 – Esquema de produção do corpo de prova a) Monofilamento precursor fixado no aparato de produção; b) Início da inserção de torção, monofilamento reduz o tamanho; c) Início da formação de espiras; d) Monofilamento completamente espiralado. ....	23
Figura 14 – Corpo de prova fabricado: monofilamento de poliamida. ....	23
Figura 15 – Esquema do aparato experimental para os testes com o MEP .....	25
Figura 16 – a) Monofilamento espiralado com padrão monocromático aleatório e campos de deslocamento b) horizontal e c) vertical.....	27
Figura 17 – Esquema de um MEP com extremidades fixas. T é a temperatura aplicada; F é a força da reação (ou força induzida); $\zeta$ é a distorção angular; L0 é o comprimento do MEP; Li é o comprimento efetivo inicial; Lf é o comprimento efetivo final; $\delta$ é a deflexão do MEP.....	27
Figura 18 – a) Exemplo de corpo de prova do MEP analisado com b) região de interesse ampliada e c) campos de deslocamento vertical (v) e horizontal (u). ....	28
Figura 19 – a) Região de interesse do corpo de prova do MEP com padrão aleatório monocromático para realização da Correlação de Imagens Digital e b) esquema de uma espira com os parâmetros analisados.....	28
Figura 20 – Temperatura versus deformação térmica. ....	31
Figura 21 – Mola helicoidal na a) posição inicial antes da compressão e b) após a compressão. ....	32
Figura 22 – Mola helicoidal com as extremidades livres com carregamento axial.....	32
Figura 23 – Comportamento da mola ao sofrer deflexão. ....	34
Figura 24 – Elemento analisado de uma espira .....	37
Figura 25 – Variação da projeção ortogonal do raio da espira na base da mola com a mudança de $\beta$ .....	37
Figura 26 – Dados médios da tensão por deformação para Poliamida.....	40
Figura 27 – Dados experimentais de Módulo de Elasticidade para a Poliamida e modelo ajustado. ...	41
Figura 28 – Efeito do movimento de corpo rígido na deformação.....	42

Figura 29 – Deformação longitudinal média das amostras durante seis ciclos de aquecimento-resfriamento nas temperaturas máximas de 100 °C (a, b e c), 90 °C (d, e e f) e 80 °C (g, h e i) .....	44
Figura 30 – Deformação axial média de amostras de poliamida usando o segundo método (a) 70°C, (b) 80°C, (c) 90°C, (d) 100°C com intervalo de 500s entre ciclos; e (e) quatro ciclos com intervalo de 100°C, com 24h de intervalo entre cada um .....	46
Figura 31 – Deformação térmica em função do tempo para uma temperatura constante de 100 °C. ...	47
Figura 32 – Dados experimentais com modelo proposto para experimentos a 100 °C. ....	47
Figura 33 – Curva média de deformação axial, $\epsilon_x$ , dos arames das espiras dos corpos de prova e Modelo ajustado .....	51
Figura 34 – Curva média de deformação radial, $\epsilon_y$ , dos arames das espiras dos corpos de prova e Modelo ajustado .....	52
Figura 35 – Desenrolamento do ângulo de torção por unidade de comprimento, $\Delta\theta$ , dos corpos de prova.....	53
Figura 36 – Força medida experimentalmente com o aumento da temperatura e o modelo proposto. ....	54
Figura 37 – Modelo proposto a partidos dos ensaios de tração isotérmica proposto na Seção 4.1. (Equação (26)) e valores experimentais para o valor do módulo de elasticidade do MEP em relação ao aumento de temperatura .....	55
Figura 38 – Desenho da câmara térmica .....	63
Figura 39 – a) Arduino Uno, b) Base Board L, c) Nanoshield Termopar, d) Nanoshield Mosfet, e) Nanoshield Triac e, f) Nanoshield Zero Cross. ....	64
Figura 40 – a) Montagem do dispositivo no nanoshield mosfet e b) circuito do dispositivo .....	65
Figura 41 – Componentes do sistema de aquecimento. ....	65
Figura 42 – Placa Arduino utilizada com todos os nanoshields acoplados. ....	65
Figura 43 – Distribuição de temperatura na superfície da resistência.....	66
Figura 44 – Distribuição de temperatura do ar ao redor da resistência.....	67
Figura 45 – Curvas de DSC dos corpos de prova de poliamida.....	69
Figura 46 – Temperatura de fusão das amostras de poliamida .....	69
Figura 47 – Curva termogravimétrica das amostras de poliamida .....	70
Figura 48 – Difratoograma da poliamida. ....	71
Figura 49 – FTIR da poliamida .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Corpos de prova após a fabricação.....	25
Tabela 2 – Corpos de prova com pré-deformação inicial.....	25
Tabela 3 – Dados experimentais Poliamida 1.....	40
Tabela 4 – Valores dos coeficientes $\alpha_1$ , $\alpha_2$ e $T_t$ dos experimentos de 100 °C.....	48
Tabela 5 – Tabela com coeficientes dos modelos para a deformação axial.....	52
Tabela 6 – Tabela com coeficientes dos modelos para a deformação radial.....	52
Tabela 7 – Especificações da câmera térmica Flir A 325G.....	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A<sub>a</sub> – área correspondente a fração amorfa do polímero  
A<sub>c</sub> – área correspondente a fração cristalina do polímero  
C – índice de mola  
d – Diâmetro do aro da mola  
E – Módulo de elasticidade do material  
G – Módulo de rigidez torcional do material  
I – Momento de inércia da seção transversal do arame  
I<sub>p</sub> – momento de inércia polar da seção transversal do arame  
m<sub>f</sub> – momento fletor  
m<sub>t</sub> – momento torsor  
n – número de espiras ativas na mola  
P – Força aplicada  
r – raio da espira  
r<sub>o</sub> – raio inicial da espira  
T<sub>c</sub> – temperatura de cristalização  
T<sub>g</sub> – Temperatura de transição vítrea  
T<sub>m</sub> – temperatura de fusão cristalina  
T<sub>t</sub> – temperatura de transição  
X<sub>c</sub> – grau de cristalinidade  
α – fase cristalina das poliamidas com cadeias em zigzag  
α<sub>1</sub> – coeficiente de expansão térmica até a transição vítrea  
α<sub>2</sub> – coeficiente de expansão térmica após a transição vítrea  
β – ângulo de inclinação final  
β<sub>o</sub> – ângulo de inclinação inicial  
γ – fase cristalina das poliamidas com cadeias paralelas  
δ – deflexão nominal  
ΔH<sub>f</sub> – calor de fusão  
Δk – mudança no raio de curvatura do arame da mola após deformação  
δ<sub>o</sub> – deflexão nominal inicial  
Δθ – torção sofrida pelo arame da mola após deformação por unidade de comprimento  
ν – módulo de Poisson do material  
σ – tensão normal  
τ<sub>c</sub> – tensão de cisalhamento na superfície  
φ – ângulo de rotação de uma extremidade em relação a outra  
γ – ângulo de deformação por cisalhamento por unidade de comprimento

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 01</b> .....	<b>1</b>
INTRODUÇÃO	
1.1 Motivação.....	1
1.2 Revisão Bibliográfica.....	3
1.2.1 Poliamida .....	3
1.2.2 Atuador de Poliamida .....	6
1.2.3 Revisão dos MEPs .....	7
1.2.4 Tipos de MEPs .....	10
1.3 Objetivos .....	11
1.4 Organização do Texto .....	11
DOI: 10.51497/reflex.978-65-84610-66-8_1	
<b>CAPÍTULO 02</b> .....	<b>13</b>
MÉTODOS EXPERIMENTAIS	
2.1 Materiais.....	13
2.2 Ensaio de Tração no monofilamento de poliamida não espiralado .....	13
2.3 Expansão Térmica no monofilamento de poliamida não espiralado .....	15
2.3.1 Método de correlação de Imagens Digitais .....	18
2.4 Caracterização dos monofilamento com métodos convencionais .....	21
2.5 Fabricação dos atuadores espiralados de poliamida .....	22
2.6 Arranjo experimental e ensaios dos atuadores poliméricos espiralados .....	24
2.6.1 Determinação da variação do ângulo de torção ( $\Delta\theta$ ) das espiras com DIC .....	26
DOI: 10.51497/reflex.978-65-84610-66-8_2	
<b>CAPÍTULO 03</b> .....	<b>30</b>
MODELOS DE COMPORTAMENTO	
3.1 Modelo para o comportamento térmico do monofilamento de poliamida não espiralado .....	30
3.2 Molas Helicoidais .....	31
3.3 Modelo do Comportamento Térmico do MEP .....	35
DOI: 10.51497/reflex.978-65-84610-66-8_3	
<b>CAPÍTULO 04</b> .....	<b>39</b>
RESULTADOS	
4.1 Ensaio de Tração no monofilamento de poliamida não espiralado .....	39
4.2 Expansão térmica no monofilamento de poliamida não espiralado.....	41
4.2.1 Testes Ciclos.....	42
4.2.2 Testes Temperatura Constante.....	45
4.3 Métodos convencionais de caracterização do monofilamento de poliamida não espiralado ..	49
4.4 Comportamento térmico dos atuadores poliméricos espiralados .....	50
DOI: 10.51497/reflex.978-65-84610-66-8_4	
<b>CAPÍTULO 05</b> .....	<b>56</b>
CONCLUSÕES	
DOI: 10.51497/reflex.978-65-84610-66-8_5	
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>58</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>63</b>
A1- Câmara Térmica .....	63
A2- Controle de temperatura .....	63
A3- Circuitos.....	65
A4- Análise do aquecimento.....	66

<b>ANEXO B</b> .....	<b>67</b>
1. DSC.....	68
2. TGA.....	70
3. Difração de Raios X.....	70
4. Espectrômetro de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	72

# CAPÍTULO 01

## INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Os atuadores poliméricos são uma classe de materiais inteligentes com memória de forma (SMPs- shape memory polymers) que podem modificar sua geometria reversivelmente devido a estímulos externos, como variação de pressão (Chou *et al.*, 1996; Daerden *et al.*, 2002), tensão (Ohm *et al.*, 2010; Pelrine *et al.*, 2002), corrente (Baughman *et al.*, 1996; Lima *et al.*, 2012) ou temperatura (Leng *et al.*, 2011, Sharafi *et al.*, 2015). Os polímeros com memória de forma são conhecidos por sua recuperação de forma ocorrer perto da região de transição vítrea. Tais materiais são frequentemente utilizados como atuadores.

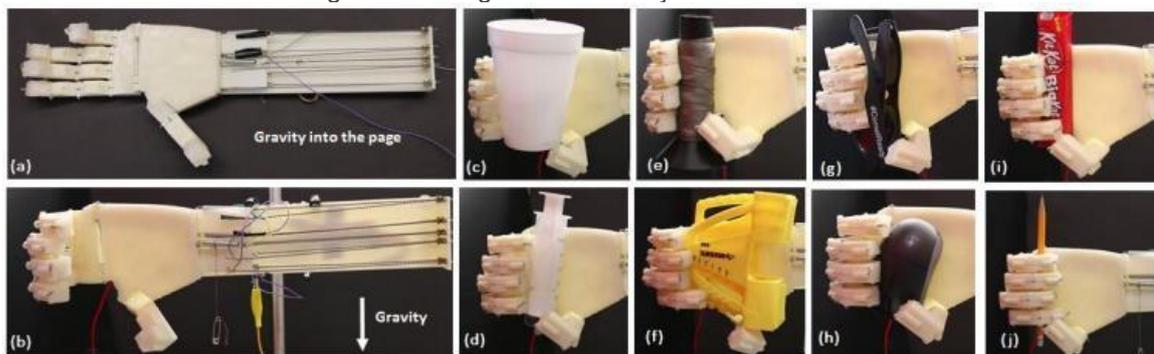
As possibilidades de aplicação dos SMPs motivaram pesquisadores a desenvolverem novas categorias minimizando a perda estrutural e aumentando a eficiência. Com isso, Haines *et al.* (2014) desenvolveram atuadores que trabalham sem histerese, com maior eficiência em relação aos outros tipos de músculos artificiais já desenvolvidos. Os monofilamentos espiralados de poliamida, MEPs, se baseiam nas propriedades dos monofilamentos de poliamida e de sua geometria para operar.

Os MEPs apresentam uma performance bastante satisfatória, com a densidade de energia atingindo 2,63 kJ/kg e densidade de potência superior a 5,3 kW/kg, com torque de 50% (Cherubini *et al.*, 2015), se mostrando centenas de vezes superior a densidade de energia produzida por músculos esqueléticos naturais, normalmente de 39 J/kg (Madden *et al.*, 2004; Aziz *et al.*, 2015). Dentre as características dos MEPs, se destacam as seguintes: contração térmica reversível na direção da monofilamento, grande expansão térmica volumétrica e grande anisotropia durante mudanças de dimensão termicamente induzidas que proporcionam longo curso muscular. A memória de forma e outras características importantes do polímero precursor para os MEPs são altamente dependentes da temperatura imposta, taxa de aquecimento e resfriamento, cristalinidade e sua estrutura (Yang *et al.*, 2016a). Estas características

em conjunto com o baixo custo, aproximadamente US\$5/kg (Haines *et al.*, 2014), torna tal atuador extremamente promissor.

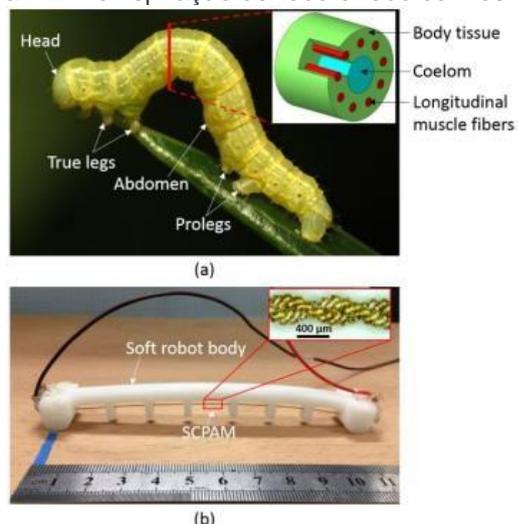
Desde a publicação inicial de Haines *et al.* (2014) diversos pesquisadores têm explorado a utilização dos MEPs em diversas aplicações: a Figuras 1 ilustra um braço com os MEPs (Arjun *et al.*, 2016); a Figura 2, bioinspiração do robô e robô com os MEPs (Yang *et al.*, 2019); e a Figura 3 ilustra o Anteupe – robô de seis pernas (Løklingholm *et al.*, 2018). Além disso, trabalhos posteriores ao de Haines *et al.* (2014) demonstraram o princípio básico de funcionamento dos MEPs, fornecendo dados relevantes para aplicações futuras (Kianzad *et al.*, 2015; Aziz, 2015; Cherubini *et al.*, 2015; Moretti *et al.*, 2015; Sharafi, 2015a; Yang *et al.*, 2016a). Porém, investigações mais detalhadas do atuador e do material precursor são necessárias para possibilitar o seu emprego, principalmente com a utilização de métodos sem contato para não haver influências na medição das propriedades e deformações.

Figura 1 – Imagem de um braço com os MEPs



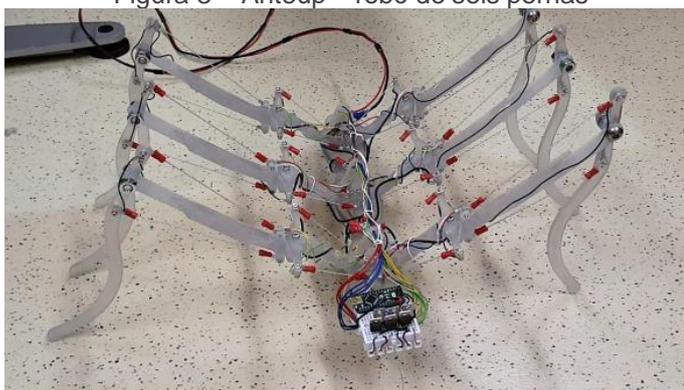
Fonte: (Arjun, 2016)

Figura 2 – Bioinspiração de robô e robô com os MEPs



Fonte: (Yang, 2019)

Figura 3 – Anteup – robô de seis pernas



Fonte: (Løklingholm, 2018)

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.2.1 POLIAMIDA

A poliamida (nylon), material precursor dos MEPs estudados nesse trabalho, é caracterizada por ser um polímero termoplástico e semicristalino, ou seja, possui regiões organizadas e desorganizadas. A ligação amídica (O=C-N-H) presente na cadeia principal deste material é a responsável pelas principais características e propriedades (Lewin *et al.*, 2006). No caso das poliamidas utilizadas em fios de pesca, é comum encontrar uma mistura de poliamidas 6 e 6.6. Estas são consideradas polímeros lineares que possuem cinco grupos metilenos separando os grupamentos amida.

Em todos os monofilamentos de poliamidas, as sequências –CH<sub>2</sub>– serão flexíveis à temperatura ambiente, com apenas atrações fracas de van der Waals por grupamentos vizinhos. Existem algumas regiões do monofilamento onde as moléculas são dispostas regularmente juntas (região cristalina) e outras onde a disposição é mais aleatória (região amorfa). As poliamidas 6 e 6.6 contêm os mesmos grupos de moléculas nas mesmas proporções ao longo da cadeia. Na poliamida 6, as moléculas são direcionais com todos os grupos amida em uma direção específica, por exemplo –NH – CO–, enquanto na poliamida 6,6 ocorre uma inversão na ordem das ligações dos grupos amida.

Ao serem fabricados, as moléculas do polímero e os cristalinos agregados presentes nos monofilamentos de poliamida são orientados na direção da trefilação. Se a amostra apresentar estrutura cristalina, a força axial não alterará muito o grau de

cristalinidade. A extensão da orientação dependerá da taxa de deformação e da temperatura durante a fabricação.

As propriedades mecânicas dos polímeros dependem da mobilidade molecular que é influenciada pela natureza química das macromoléculas, a massa molecular, a presença ou ausência de ramificações, o grau de cristalinidade, presença ou ausência de plastificante, temperatura, umidade, orientação e outros aspectos relacionados à história térmica de uma amostra em particular (Wasilkoski *et al.*, 2006, Choy *et al.*, 1981, Lewin *et al.*, 2006). As propriedades citadas também indicam as respostas do monofilamento às forças e deformações (McIntyre *et al.*, 2004). A presença das ligações amida nas cadeias moleculares tem um considerável efeito sobre as propriedades térmicas, além de aumentar o ponto de fusão do material.

Como é de se esperar das propriedades térmicas, a temperatura tem um efeito considerável nas propriedades de tração dos monofilamentos de poliamida 6 e 6,6. À medida que a temperatura aumenta, a tenacidade do monofilamento de poliamida 6,6 é reduzida e a extensão até a ruptura é aumentada. O módulo de elasticidade inicial também é diminuído. Há uma redução drástica na tenacidade e extensão até a ruptura a 205°C comparado com a 177°C; a temperatura mais alta é próxima daquela em que o amolecimento ocorre na poliamida 6,6.

Existem propriedades térmicas da poliamida que ocorrem abaixo do ponto de fusão. Essas propriedades são devidas à crescente mobilidade das cadeias moleculares nas regiões cristalina e amorfa do monofilamento entre 70°C e 180°C. Se um monofilamento de poliamida 6,6 for aquecido em estado seco e relaxado, a partir de 25°C a 70°C, começa a encolher. A cerca de 70°C, ocorre mais uma cristalização que reduz a mobilidade da cadeia. À medida que o aquecimento continua, qualquer água absorvida será perdida e o encolhimento continua. Acima de 125°C, a estrutura do cristal muda de uma forma triclinica para uma hexagonal. A 170–180°C, os cristais começam a se quebrar e as cadeias moleculares tornam-se cada vez mais móveis; isso explica a acentuada alteração nas propriedades de tração entre 177°C e 205°C.

Para desenvolver um modelo de comportamento dos MEPs, um estudo da variação das características do material precursor em relação a temperatura é necessário. Nesses materiais, a deformação do atuador pode ser dada em função da temperatura e da carga (Karami *et al.*, 2017, Mendes *et al.*, 2017, Yang *et al.*, 2016b). Duas propriedades detectadas para descrever a resposta do MEP são

dependentes da temperatura: o coeficiente de expansão térmica e o módulo de elasticidade (Karami *et al.*, 2017).

Estudos observaram que o módulo de Young de poliamidas depende não apenas da temperatura do polímero e dos outros fatores citados, mas também do número de unidades de monômeros no corpo (Peeters *et al.*, 2002) e sua geometria (Raz *et al.*, 2017, Shan *et al.*, 2007). Foram relatadas (Peeters *et al.*, 2002, Kagan *et al.*, 2000) grandes faixas de valores do módulo de Young, sendo a poliamida 6 entre 3,08-3,33GPa e a poliamida 6.6 sendo 3-3,6GPa à temperatura ambiente (Peraro *et al.*, 2000, Wypych *et al.*, 2016, McIntyre *et al.*, 2005).

Já a expansão térmica, propriedade crítica dos materiais, representa a estabilidade dimensional do material quando este está sob carga térmica. Essa propriedade depende da temperatura, da composição do material (no caso de polímeros, se são copolímeros ou homopolímeros, a taxa de cristalinidade, quantidade de água absorvida), do seu processo de fabricação e forma (Muniandry *et al.*, 2019). Valores para esse coeficiente são definidos, na literatura, como uma grande faixa para pequenos intervalos de temperatura e poucas condições (Wypych *et al.*, 2016; Choy *et al.*, 1985; Choy *et al.*, 1981; Reimschuessel, *et al.*, 1977). Além disso, foi indicado que variáveis como taxa de aquecimento e resfriamento e histórico térmico dos materiais afetam a expansão e contração térmica dos polímeros (Karami *et al.*, 2017).

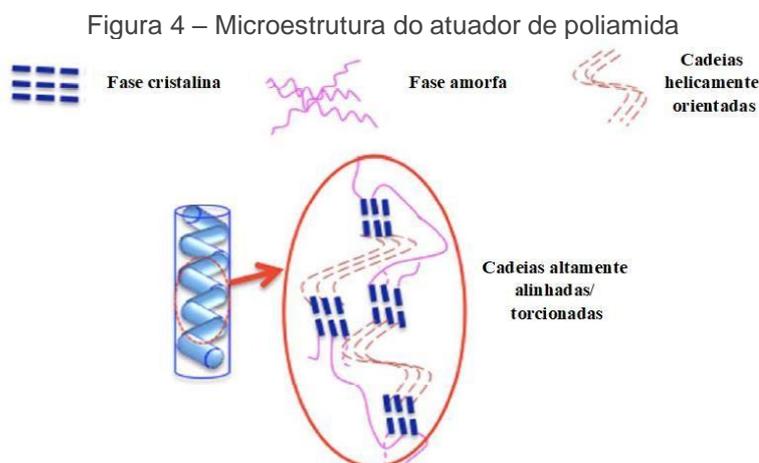
A correlação de imagens digitais (DIC – digital image correlation) é um método óptico usado para medir campos de deslocamentos e deformações sem contato. Ele tem sido usado para medir pequenas deformações térmicas (Velez *et al.*, 2019; Muniandry, 2019; Kim, *et al.*, 2019; de Strycker *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013; Bing *et al.*, 2009; Schreier *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2002). Por exemplo, Kim *et al.* (2019) desenvolveram um método para avaliar a expansão térmica de filmes finos que se expandem livremente na água. No entanto, para os monofilamentos de poliamida, deixar as duas pontas completamente soltas o induz a enrolar, perturbando a medição. Portanto, existe uma demanda por um método adequado para monofilamentos poliméricos. Assim, a especificação dos valores das propriedades termomecânicas dos monofilamentos de poliamidas como o módulo de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica tornam-se necessários neste trabalho.

## 1.2.2 ATUADOR DE POLIAMIDA

Diversos estudos experimentais já foram realizados sobre os MEPs e as poliamidas (Mendes *et al.*, 2017; Aziz, *et al.*, 2017; Swartz *et al.*, 2018). Estes também descreveram o método de produção dos MEPs. Os MEPs desenvolvidos trabalham com uma atuação sem histerese e fornecem uma maior eficiência em comparação com outros tipos de atuadores. Esta resposta melhorada é obtida em sua contração reversível na estrutura microscópica, que tem grande expansão térmica volumétrica e mudança dimensional não-homogênea devido à atuação térmica.

Devido a estrutura molecular da poliamida, durante a produção de monofilamentos, as cadeias se tornam alinhadas. Este fato faz com que os monofilamentos de poliamida sejam caracterizados como um material transversalmente anisotrópico, em que suas propriedades variam conforme a direção. Durante a produção dos MEPs, antes do limite de torção ser atingido e do início da formação de espiras, se aplica um esforço de tração axial e com isso as cadeias sofrem novamente um alinhamento antes da formação das espiras.

A produção do MEP consiste na inserção de torção no monofilamento de poliamida com as cadeias altamente alinhadas, ver Figura 4. Com isso o formato dos MEPs se assemelha a uma mola helicoidal. As cadeias poliméricas altamente trefiladas e helicoidais são capazes de responder a estímulos externos e o grau de alongamento / torção governa a eficiência de atuação dos MEPs.



Fonte: (Sharafi *et al.*, 2015 – modificado).

### 1.2.3 REVISÃO DOS MEPS

Estudos apontaram a aplicabilidade destes MEPS tanto como atuadores baseados na tração quanto como atuadores torcionais. Moretti *et al.* (2015) e Cherubini *et al.* (2015) desenvolveram um aparato para ensaios e um procedimento experimental para investigar a resposta termomecânica dos MEPS, com o objetivo de prover informações e dados úteis para as futuras aplicações. O aparato de testes foi projetado para realizar testes isotérmicos e isométricos de tensão. As curvas isotérmicas de tensão por deformação obtidas com os testes auxiliaram a medição da histerese e da densidade de energia de atuação dos corpos de prova testados.

O módulo de elasticidade dos MEPS foi estudado por Kianzad *et al.* (2015); foi demonstrado um importante comportamento da poliamida espiralado: ao aumentar a temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  para  $200^{\circ}\text{C}$  o módulo de elasticidade diminuiu de  $\sim 155\text{MPa}$  para  $35\text{MPa}$  e a contração térmica detectada foi de aproximadamente 2% na faixa de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  até  $20^{\circ}\text{C}$ . Já na faixa de  $100^{\circ}\text{C}$  até  $160^{\circ}\text{C}$  a contração térmica foi de 10%.

No trabalho de Mirvakili *et al.* (2014), o MEP recebeu uma camada de prata para melhorar sua eficiência. Uma das vantagens deste método é a sua acessibilidade e a possibilidade de ser aplicado em qualquer filamento de polímero. A utilização eficaz desta técnica baseou-se num revestimento uniforme para evitar gradientes de temperatura.

Alguns modelos também foram desenvolvidos para descrever o comportamento dos MPEs. Sharafi e Li (2015a) desenvolveram um modelo constitutivo de resposta de atuação da mola torcida. No entanto, a consideração de muitos parâmetros de escala molecular na estrutura constitutiva, que são difíceis de determinar, tornou o uso do modelo um desafio considerável. Conseqüentemente, também foi proposto, pelo mesmo grupo, um modelo fenomenológico termomecânico, que dependia em grande parte de ajuste de curvas.

A tensão torcional e o torque gerado foram estudados por Aziz *et al.* (2015). Em seu trabalho foram investigados métodos de ensaio para caracterizar os MEPS como atuadores torcionais e a utilização da mudança de temperatura para provocar a atuação. Foi projetado e desenvolvido um método experimental capaz de medir continuamente a atuação torcional induzida termicamente em materiais fibrosos. Já em 2016 os mesmos pesquisadores (Aziz *et al.*, 2016) desenvolveram uma relação

quantitativa entre a atuação torcional e mudança de volume. Os resultados indicam que o curso torcional depende apenas da quantidade de torção inserida no monofilamento e é independente do diâmetro do monofilamento. O torque gerado se mostrou maior em monofilamentos nos quais mais torção foi inserida e com maiores diâmetros.

Posteriormente, Yang *et al.* (2016) desenvolveram um modelo multi-escala visando descrever o comportamento e analisar o efeito de uma ampla gama de fatores, avaliando a resposta do MEP. As comparações entre os resultados do modelo e resultados experimentais demonstraram excelente conformidade. Foram discutidos também, a fim de validar o modelo, os efeitos dos parâmetros em escala micro, meso e macro sobre as respostas de atuação do MEP.

Em 2017, Karami e coautores propuseram um modelo fenomenológico para estimar o deslocamento do MEP, em função da carga e da corrente elétrica de entrada. O problema foi dividido em duas partes, modelagem eletrotérmica e, em seguida, o comportamento termo elástico dos MEPs. Porém considerava a geometria do atuador inalterada.

A capacidade destes MEPs de ter a atuação ajustada foi estudada por Fan *et al.* (2017). Neste mesmo trabalho foram analisadas as transições do material, que são precursoras do funcionamento do atuador. Também foi provado que a inserção da torção durante a produção reduz a anisotropia do monofilamento. No mesmo ano, a dependência da temperatura e da velocidade do coeficiente de transferência de calor durante o acionamento do atuador foram analisados por Masuya *et al.* (2017). Já o trabalho de Tang *et al.* (2017) apresentou um modelo simplificado para o torque recuperado de atuador torcido e enrolado. O método de elementos finitos foi usado para avaliar o monofilamento torcido.

No estudo realizado por Swartz *et al.* (2018), o modelo de Aziz *et al.* (2016) e o modelo de Shafer *et al.* (2016) foram comparados com dados experimentais. O modelo de Shafer *et al.* (2016) foi considerado mais preciso em relação aos dados experimentais, o que indica que a contração axial dos monofilamentos espiralados não é desprezível na previsão da resposta destes atuadores acima de 60°C, diferente do previsto por Aziz e colaboradores.

Em 2019, Huang e coautores fizeram experimentos com o atuador e propuseram um modelo simplificado. Os resultados experimentais mostraram que modelo visco elástico linear padrão poderia ser usado para descrever a fluência dos

monofilamentos musculares da galinha, dos monofilamentos de poliamida não torcidos 6 e dos MEPs.

Também em 2019, Hayashi e coautores utilizaram a proposta de Yip *et al.* (2015), um modelo de deslocamento do atuador em relação a temperatura, e derivaram a temperatura em relação ao modelo para obter uma trajetória do atuador baseado na variação da temperatura. Também em 2019, Cho *et al.* investigaram as limitações dos MEPs e como superá-las, além de utilizá-lo em uma aplicação de braço robótico.

Uma variação da disposição dos atuadores foi estudada por Muruin *et al.* (2019), nela os atuadores foram dispostos para formar um sistema de treliças de von Mises. Métodos numéricos e semi-analíticos foram utilizados para a análise termoelástica do sistema. Em relação ao deslocamento angular do atuador durante o funcionamento, um estudo publicado em 2019 por Hayashi *et al.* analisou o deslocamento angular e propôs um modelo para estimar parâmetros relacionados com essa variação.

Como os MEPs podem ser aplicados de duas formas, a primeira com base no movimento de contração; e a segunda com base no movimento rotacional, alguns trabalhos recentes focaram no segundo modo. Um exemplo é o trabalho de Tahara *et al.*, (2019) que propôs um método estimado de controle de feedback de temperatura para regular um ângulo torcional do atuador.

Giovinco *et al.* (2020) desenvolveram um modelo dinâmico de atuação a partir de um modelo estático proposto anteriormente (Lamuta *et al.*, 2018). Este novo modelo mostrou-se capaz de estimar a variação do tempo de atuação de tração do atuador de acordo com valores térmicos de entrada.

Aplicações dos MEPs também foram estudadas, por exemplo, um destes estudos desenvolvidos por Kim *et al.* (2015) utilizou energia térmica para gerar um grande curso de torção no atuador de poliamida espiralado e, com isso, girar o rotor de um gerador elétrico.

O emprego do MEP em dedo indicador robótico foi estudado por Wu *et al.* (2015). O sistema desenvolvido foi baseado em circulação de água quente e fria para gerar a atuação nos monofilamentos de poliamida espiralados e obter movimentos rápidos nos dedos. O sistema de atuação consistiu no MEP dentro de um tubo de silicone compatível.

Yip *et al.* (2015) empregaram os MEPs em um braço robótico com o propósito de examinar a controlabilidade. Os monofilamentos de poliamida utilizados neste estudo possuíam uma camada condutiva na sua superfície. Nos testes realizados

foram observadas grandes tensões de atuação e força por peso nos atuadores. Foram também desenvolvidos modelos termomecânico e termoelétrico para o atuador. Já Cho *et al.* (2016) empregaram o MEP pintado de prata em um dedo robótico com o propósito de determinar sua estrutura ideal. Com este estudo, foi apresentado a flexão e a extensão de um dedo usando os atuadores de poliamida.

Em 2020 a aplicação dos MEPs como *soft crawling robots* foi analisada por Cheng *et al.* (2020). Estes robôs têm atraído grande atenção devido à sua possibilidade de realizar interações eficazes com humanos e trabalhar ambientes diversos, bem como sua capacidade potencial de completar uma variedade de tarefas que abrangem busca e resgate, inspeção de infraestrutura, vigilância, entrega de medicamentos e assistência humana.

#### 1.2.4 TIPOS DE MEPS

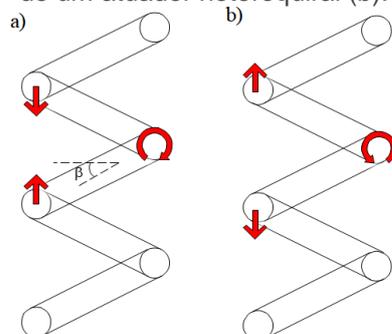
Os MEPs podem ser fabricados de dois modos, torcionando o monofilamento até ele formar espirais ou realizando um tratamento térmico na monofilamento quando está enrolado em forma de espirais em um mandril (Haines *et al.*, 2014). Neste último, a forma do mandril define a geometria final do MEP. Para manter a forma espiralada, o monofilamento é submetido a um tratamento térmico onde é aquecido até seu ponto de fusão. Esse modo de produção viabiliza a formação de espiras com grandes diâmetros e alto índice de mola. Já o outro modo de fabricação dos MEPs consiste na inserção de torção no monofilamento até a formação de espiras. Este foi o método utilizado neste trabalho. Os atuadores fabricados pelo método de torcionamento do monofilamento possuem menor curso e capacidade de carga maior (Sharafi *et al.*, 2015a).

Sob uma determinada carga, espiras são formadas espontaneamente quando a torção inserida é acima da densidade de torção crítica do monofilamento (Haines *et al.*, 2014, Mendes *et al.* 2017). Isso normalmente ocorre devido a formação de núcleos de enrolamento em um ou vários pontos do monofilamento, que em seguida se propagam a partir desses pontos de nucleação para todo o monofilamento.

Dependendo do sentido da inserção de torsão no monofilamento de poliamida podem ser criados dois tipos diferentes de atuadores lineares. MEPs que possuem torção do monofilamento com mesma quiralidade da espira são produzidos com o motor inserindo a torção em sentido anti-horário e denominados homoquirais (ver Figura 5 (a)).

Caso a quiralidade da espira seja oposta ao sentido de torção do monofilamento, os MEPs são denominados heretoquirais, conforme Figura 5 (b). Os MEPs homoquirais quando aquecidos contraem e os heteroquirais expandem (Haines, 2014).

Figura 5 – Ilustração esquemática do mecanismo de funcionamento de um atuador homoquiral (a) e de um atuador heteroquiral (b).



Fonte: O autor

### 1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por intuito estudar o comportamento mecânico de monofilamentos de poliamida espiralados (MEP) submetidos a uma variação de temperatura. Para isso foram realizadas análises da expansão térmica e do comportamento termomecânico dos monofilamentos não espiralados e em sequência espiralados. Com o material precursor dos MEPs também foram efetuadas caracterizações com métodos convencionais de termogravimetria (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), difração de raios X (DRX) e espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O trabalho está organizado da seguinte forma: os conceitos preliminares sobre o material precursor do atuador e suas características principais já estudadas são apresentados no Capítulo 2. No Capítulo 3, o aparato térmico desenvolvido é apresentado. A metodologia de fabricação dos atuadores utilizada é descrita juntamente com a preparação dos corpos de prova. São detalhados os métodos de caracterização usados neste trabalho para a análise das propriedades térmicas e mecânicas do material utilizado na produção dos atuadores de poliamida. É, também, utilizado o método de Correlação de Imagens Digital para a medição dos campos de

deslocamento dos corpos de prova. Ademais, todos os procedimentos experimentais e os métodos de análise dos dados coletados são apresentados.

O Capítulo 4 apresenta um modelo matemático clássico de molas helicoidais e características pertinentes do atuador. As hipóteses assumidas para o desenvolvimento do modelo matemático do comportamento do atuador de monofilamento de poliamida espiralada também são apresentadas.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos para cada tipo de corpo de prova. Discussões sobre o comportamento termomecânico deste atuador, suas propriedades termomecânicas e sua relação com comportamento de uma mola helicoidal também são apresentados.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho como um todo. Informações e resultados adicionais são encontrados nos Apêndices A e B.

## CAPÍTULO 02

### MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho, são apresentados quatro estudos experimentais distintos: i) Os monofilamentos de poliamida são submetidos ao ensaio de tração com diferentes temperaturas e velocidade constante; ii) Os monofilamentos de poliamida são submetidos ao ensaio de expansão térmica usando uma nova metodologia; iii) Amostras dos monofilamentos de poliamida são caracterizadas termicamente usando termogravimetria (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), Difração de raios X (DRX) e a Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR); iv) Os monofilamentos espiralados de poliamida (MEPs) são fabricados e testados.

#### 2.1 MATERIAIS

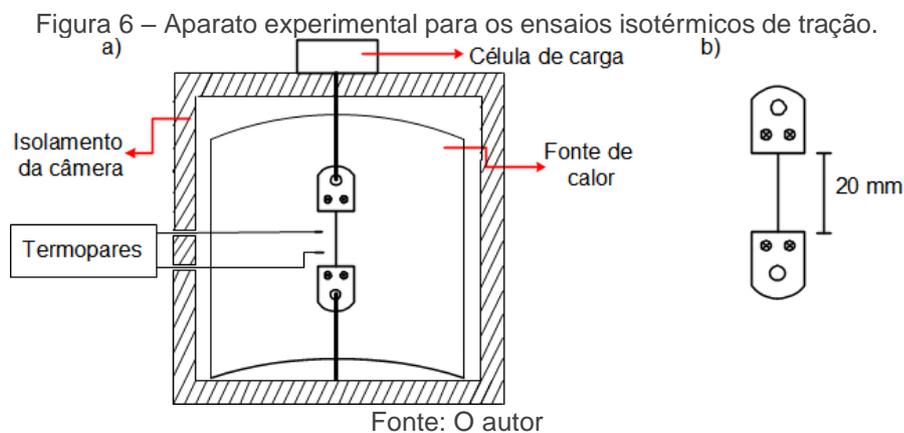
O material utilizado foi o monofilamento de poliamida da marca Ekilon Crystal (São Paulo, Brasil) de 0,8 mm de diâmetro. Tal monofilamento foi fabricado usando uma poliamida de copolímeros 6/66 (Ultramid® C33 01) disponível comercialmente da BASF Corporation. De acordo com a literatura (Wypych, 2016), este polímero semicristalino tem um baixo grau de cristalinidade (0,36-0,56) e uma viscosidade intermediária ( $195 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  - 0,5% em 96% de ácido sulfúrico). Além disso, o módulo de Young e a temperatura de fusão são, 3,2GPa e 196°C, respectivamente (Wypych, 2016).

#### 2.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO NO MONOFILAMENTO DE POLIAMIDA NÃO ESPIRALADO

Os experimentos foram conduzidos utilizando uma câmara térmica com temperatura controlada que foi fabricada a partir de madeira balsa, Teflon, lã de vidro e vidro temperado. Um esquema experimental é ilustrado na Figura 6(a) e o desenho detalhado da câmara é mostrado na Figura 40 (Ver Apêndice A). A parte frontal da câmara foi fabricada com vidro

temperado transparente para capturar imagens, visando a utilização do método de Correlação de Imagens Digital. A câmera CCD (charged couple device) de alta resolução utilizada foi da marca Sony modelo XCD-SX900 (resolução de 1280 x 960 pixels) com lentes C-Mount 10x Zoom posicionada a uma distância constante do aparato durante todo o procedimento experimental. A temperatura, durante os testes, foi aumentada com o auxílio de uma resistência do Modelo Omega SRFG 809/10. A temperatura da câmara foi controlada com Arduino (plataforma de prototipagem eletrônica livre) com dois termopares do tipo K conectado a ele. Um programa integrando a captura de imagens, a medição da força aplicada no monofilamento de poliamida, a medição de temperatura e o controle da câmera foi desenvolvido. Dados dos testes de temperatura realizados no desenvolvimento do aparato e maiores informações a construção do aparato se encontram no Anexo A.

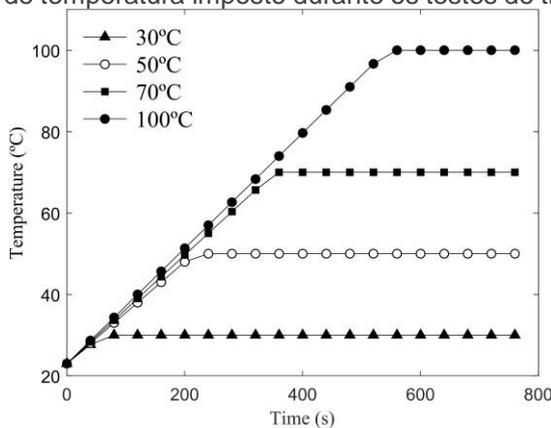
Experimentos com corpos de prova de 20mm do monofilamento foram conduzidos na câmara de temperatura controlada com uma célula de carga de 20kgf. O monofilamento de poliamida foi acoplado à célula de carga (Figura 6 (a)) e posicionado na zona de aquecimento da câmara, como exemplificado na Figura 6.



A câmara foi linearmente aquecida a partir da temperatura ambiente de 23°C até a temperatura máxima de teste (Figura 7). Foram utilizadas quatro temperaturas máximas diferentes, a primeira a 30°C; a segunda, 50°C, próxima à temperatura de transição vítrea dos monofilamentos (Mendes *et al.*, 2018); a terceira, 70°C; e o valor máximo de 100°C. Os testes de tração foram realizados após a temperatura na câmara estar estabilizada. Cinco amostras foram testadas em cada condição de temperatura. Todos os testes de tração foram conduzidos na mesma velocidade, 8 mm / min. Um padrão aleatório preto e branco foi aplicado nos corpos de prova para a

utilização do método de Correlação de Imagens Digital. As imagens capturadas foram processadas utilizando um programa de correlação de imagens digitais, com o objetivo de aferir os campos de deslocamento dos corpos durante os testes isotérmicos.

Figura 7 – Perfis de temperatura imposto durante os testes de tração isotérmicos.

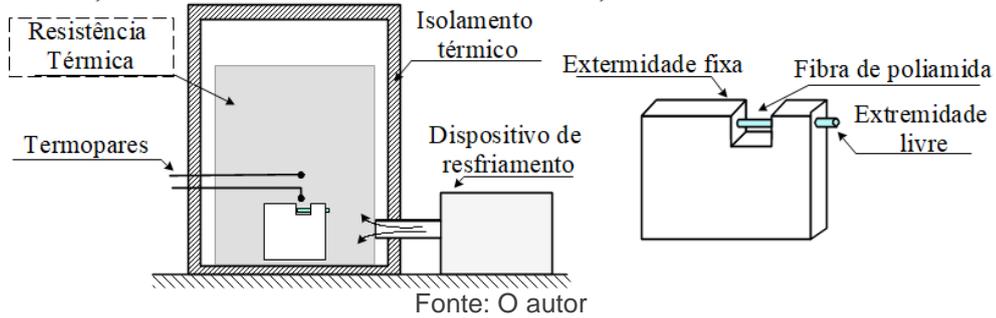


Fonte: O autor

### 2.3 EXPANSÃO TÉRMICA NO MONOFILAMENTO DE POLIAMIDA NÃO ESPIRALADO

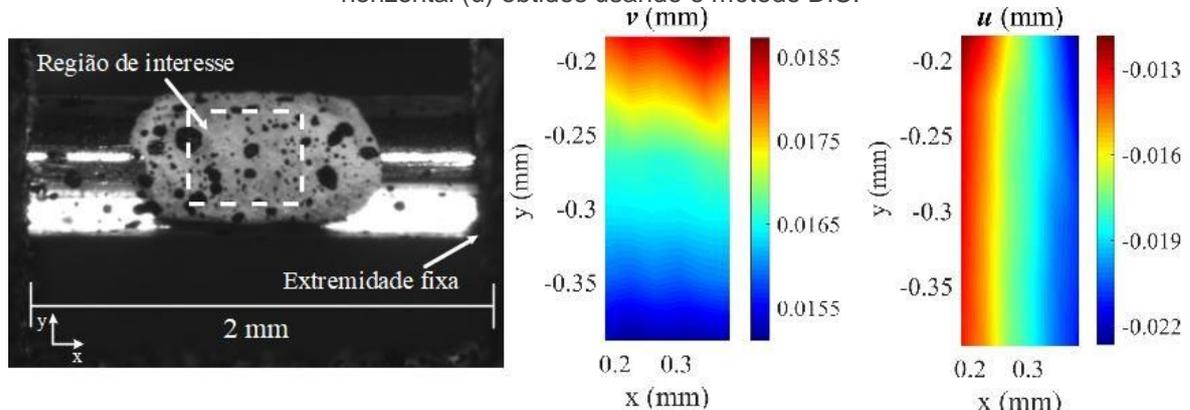
A câmara térmica descrita anteriormente também foi utilizada para os experimentos descritos nesta seção, juntamente com o aparato de resfriamento descrito no Anexo A (Figura 8(a)). O procedimento experimental consistiu no posicionamento de 2mm da poliamida em um canal, para permitir o livre movimento do corpo de prova em uma única direção, durante os testes. Uma de suas extremidades foi engastada no aparato e a outra extremidade deixada livre para movimentos horizontais (Figura 8(b)). A parte frontal da câmara foi fabricada com vidro temperado transparente para a captura de imagens do corpo de prova usando uma câmera CCD (Charged Couple Device) de alta resolução da Sony modelo XCD-SX900 (1280 x 960 pixels) com lentes C-Mount 10x Zoom fixada a uma distância constante do aparato. O método utilizado para a medição dos deslocamentos e deformações dos corpos de prova foi o de Correlação de Imagens Digital (DIC).

Figura 8 – Aparato experimental para os testes com o monofilamento de poliamida.



Para obter as contrações/extensões axiais dos monofilamentos de poliamidas por DIC, foram realizados os seguintes procedimentos: a superfície do monofilamento de poliamida (região central da amostra) foi pintada de branco, para evitar o reflexo da fonte de luz na região de interesse, e depois pulverizada com manchas pretas, gerando um padrão de manchas aleatórias necessário para o método DIC, conforme indicado em Figura 9. A região exposta ao aumento de temperatura cobre 2mm de comprimento das amostras (Figura 9). Além disso, a Figura 9 mostram os deslocamentos horizontal ( $u$ ) e vertical ( $v$ ) associados às coordenadas  $x$  e  $y$ , que foram obtidos a partir das imagens da região de interesse de uma amostra. Durante os testes, imagens e temperatura foram adquiridas simultaneamente. Essas imagens foram processadas por um algoritmo de processamento de imagem, com precisão de 0,02pixel, imagem de referência de  $41 \times 41$ pixels e fator de calibração de 277,5pixel/mm, para extrair os campos de deslocamento.

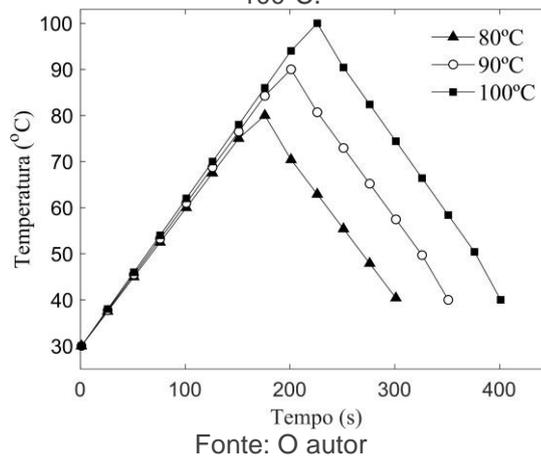
Figura 9 – Corpo de prova com o padrão aleatório e o campo de deslocamentos vertical ( $v$ ) e horizontal ( $u$ ) obtidos usando o método DIC.



Neste trabalho, as amostras de monofilamento de poliamida foram submetidas à duas condições de temperatura, adotando a metodologia proposta para a medição

da contração térmica dos monofilamentos. Todos os testes foram realizados na câmara térmica e os dados coletados processados com o método DIC. Na primeira condição térmica, a temperatura da câmara que conteve a amostra foi aumentada da temperatura ambiente (30°C) para uma temperatura máxima a uma taxa constante e depois resfriada até 40°C, caracterizando assim um ciclo térmico. Foram utilizadas três temperaturas máximas diferentes, iguais à 80°C, 90°C e 100°C. Os ciclos térmicos feitos para cada máxima temperatura são mostrados na Figura 10. Seis ciclos térmicos foram realizados com cada amostra de poliamida e três amostras, totalizando 108 testes. Intervalos de 500 segundos foram dados entre cada ciclo. Imagens das amostras e dados de temperatura foram capturadas a cada 5 segundos.

Figura 10 – Perfil de temperatura dos ciclos térmicos com temperatura máxima de 80°C, 90°C e 100°C.

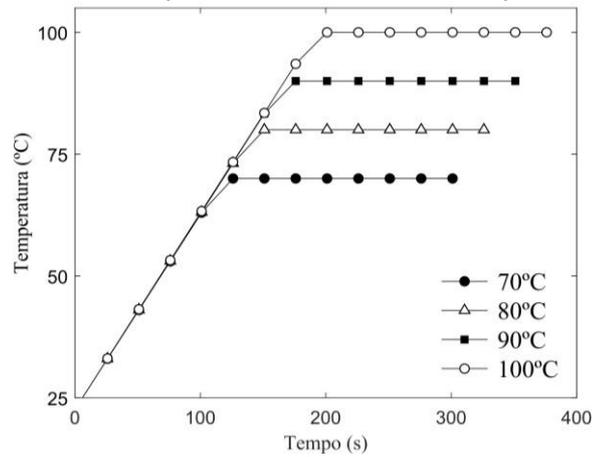


Fonte: O autor

Na segunda condição térmica, cinco testes diferentes foram realizados com o objetivo de observar a máxima contração das amostras, sendo submetidos a uma temperatura constante. Portanto, a temperatura da câmara foi aumentada da temperatura ambiente até a temperatura máxima (70°C, 80°C, 90°C e 100°C) considerando uma taxa constante. Após atingir a temperatura desejada de cada teste, manteve-se a mesma durante 200 segundos, como pode ser observado na Figura 11. Dois aquecimentos consecutivos foram realizados em cada corpo de prova para as temperaturas de 70°C, 80°C e 90°C; e três aquecimentos consecutivos, para temperaturas de 90°C e 100°C. O intervalo entre cada aquecimento foi de 500 segundos. Como a análise visava apenas a análise da variação do comprimento das amostras durante o aquecimento, as amostras de monofilamentos de poliamida foram resfriadas naturalmente. Três amostras de poliamida foram testadas, totalizando 39

testes. Nos dois experimentos, imagens das amostras e dados de temperatura foram capturadas a cada 2 segundos.

Figura 11 – Perfil de temperatura dos testes com temperatura constante.



Fonte: O autor

Para observar se o monofilamento retornaria à sua forma original após o aquecimento, outro conjunto de experimentos foi realizado. Quatro aquecimentos, da temperatura ambiente até 100°C, foram realizados em três monofilamentos diferentes. Para cada amostra foi realizado um intervalo entre o primeiro e o segundo de 500 segundos, como experimentos anteriores. O intervalo entre segundo e o terceiro foi de 24 horas. Após o terceiro aquecimento, o intervalo até o quarto aquecimento foi novamente de 500 segundos. Mais uma vez, as amostras foram resfriadas naturalmente, em temperatura ambiente. Novamente, imagens das amostras e dados de temperatura foram gravados a cada 2 segundos.

Um dos objetivos desta etapa foi medir a expansão e contração linear, ou deformação axial, das amostras de monofilamentos de poliamidas geradas por variações térmicas. Nesta análise também foi necessário eliminar o movimento de corpo rígido das amostras que atrapalhava e dificultava a correta estimativa dos valores de contração linear, descrita na seção 2.3.1. Neste trabalho a sub-imagem de referência possuía 31 x 31 pixels e precisão do método foi de 0,02 pixels.

### 2.3.1 MÉTODO DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Para caracterizar o material, este estudo adotou o método Correlação de imagens digitais (DIC – Digital Image Correlation) para estimar diretamente a rotação

do filamento de espira dos MEPs causado pela variação de temperatura nos monofilamentos de poliamida. O DIC é um método óptico numérico desenvolvido para medição de campos de deslocamentos de corpos de prova. Como vantagem relevante o método permite a obtenção de medidas globais de deslocamento do corpo de prova sem a necessidade de contato físico, diferindo de outros métodos mais comumente utilizados, como é o caso dos strain gauges. Isso viabiliza a análise do comportamento mecânico no material por inteiro sem interferências. O princípio desse método é a comparação entre duas imagens do mesmo espécime, uma antes e outra após a aplicação de uma carga ou deslocamento (Schreier *et al.*, 2009). Para que essa comparação aconteça, a superfície da amostra precisa apresentar um padrão aleatório, que pode ser obtido através da aplicação de tinta spray.

No processo de correlação de imagens, a partir de um sistema de coordenadas  $xy$ , é escolhido um ponto que se deseja obter o deslocamento. Digitalmente, esse ponto é um pixel dentro da imagem que está sendo processada e possui um valor referente à sua cor dentro da escala de cinza. Porém, tratando-se de uma imagem de alta resolução, apesar do padrão aleatório de contraste, é possível encontrar na imagem subsequente o valor de cor do ponto em diversas localizações. Por esse motivo, é escolhida uma vizinhança do ponto analisado, que será reconhecida no entorno desse ponto na imagem subsequente. Essa região é chamada de sub-imagem de referência. Desse modo, há um único ponto com uma única vizinhança especificada que devem ser reconhecidos na imagem subsequente. Para isso, uma região maior do que a sub-imagem de referência e centrada nas antigas coordenadas do ponto analisado é definida na imagem deformada e nomeada sub-imagem de busca.

O processo de correlação se dá pela identificação das regiões em que o grau de correlação é máximo, ou seja, em que os padrões são iguais. Para isso, as imagens são processadas em um programa de correlação de imagens, que identifica o pico da função correlação, indicando a nova localização do ponto analisado. Esse mesmo procedimento é realizado por toda a imagem, fornecendo o campo de deslocamento em pixels. Para realizar a conversão do deslocamento em pixels para milímetros, realiza-se uma calibração. Na primeira imagem do ensaio, aferiu-se o mesmo tamanho em pixels.

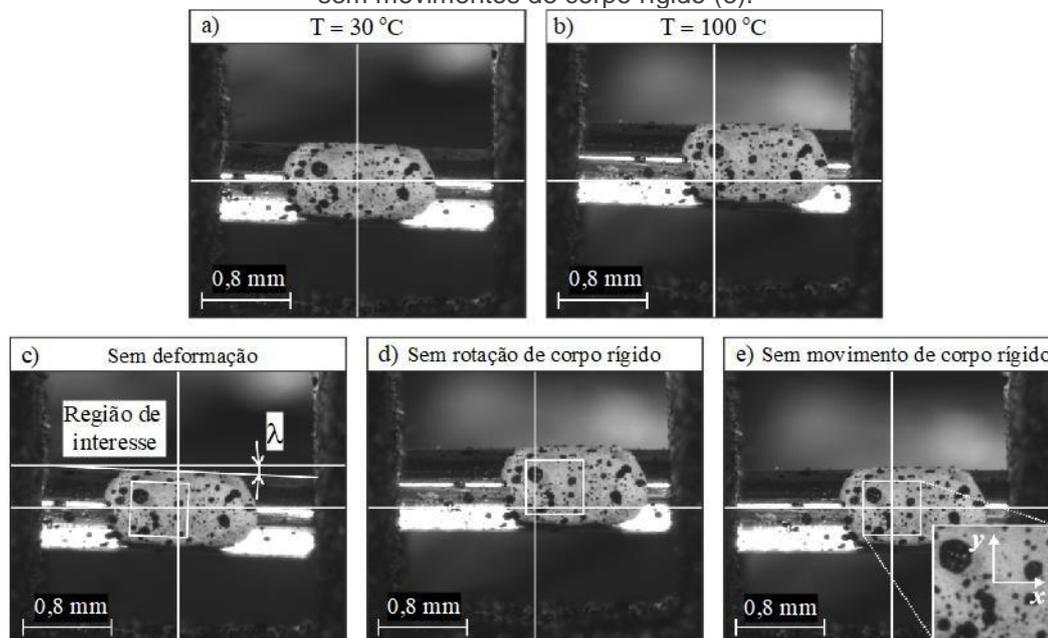
Durante os testes, a região de interesse analisada sofreu uma combinação de deformações e movimentos de corpos rígidos. De fato, movimentos de corpos rígidos,

como translação e rotação, podem influenciar a estimativa da deformação usando o método DIC. Portanto, os movimentos do corpo rígido devem primeiro ser determinados e removidos de todas as imagens para melhorar a estimativa da deformação.

As Figuras 12(a) e 12(b) ilustram uma amostra de monofilamento de poliamida com diâmetro de 0,8mm sob uma temperatura inicial de 30°C e temperatura máxima de 100°C, respectivamente. A amostra de monofilamento é fixada no lado direito. Observe que a amostra é inclinada no início do teste e pode ser transladada e girada quando a temperatura aumenta. Na primeira etapa, a rotação de todas as imagens é removida pela determinação do ângulo de rotação  $\lambda$  definido entre o eixo horizontal da imagem e o eixo da amostra, conforme indicado na Figura 12(c). A imagem da amostra com correção para a rotação do corpo rígido é mostrada na Figura 12(d).

Na próxima etapa, uma região de análise na zona central da imagem da superfície do monofilamento é escolhida e cortada para minimizar a influência da curvatura da amostra de monofilamento. Além disso, para evitar a perda de correlação na correspondência da imagem, é apropriado evitar manchas grandes na seleção da imagem. A região selecionada foi usada como dados de entrada do algoritmo DIC para estimar a posição atual dessa região para cada imagem capturada. Com esses dados, a translação também pode ser removida. O principal objetivo desta etapa é centralizar todas as imagens na mesma origem, definindo um estado sem movimentos de corpo rígido, conforme Figura 12. É importante observar que a translação não afeta a contração ou expansão axial; no entanto, ela deve ser removida para otimizar o procedimento de correspondência de imagem. Finalmente, as deformações de campo completo são extraídas de todas as imagens cortadas usando o algoritmo DIC.

Figura 12 – Monofilamentos de poliamida no estado não deformado (a) a 30 ° C, deformadas a 100 ° C com movimentos de corpo rígido (b), deformadas sem rotação de corpo rígido (d) e deformadas sem movimentos de corpo rígido (e).



Fonte: O autor

## 2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MONOFILAMENTO COM MÉTODOS CONVENCIONAIS

As poliamidas foram submetidas à análise termogravimétrica (TGA), à Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), Difração de raios X (DRX) e a análise Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para caracterização do material. Antes destas análises os materiais não foram submetidos a nenhum tratamento térmico. As análises de DSC foram realizadas no equipamento Instruments Q-1000 sob o fluxo de N<sub>2</sub> de 50ml/min, taxa de aquecimento de 5°C/min, na faixa de 25°C a 300°C. Para a realização destes estudos, foram pesados 8mg ( $\pm$  0.2mg) dos materiais em balança analítica.

A estabilidade térmica e o perfil de degradação da poliamida foram estudadas por TGA. Para a realização destas análises, cerca de 15,0mg de amostra foi analisada sob atmosfera de nitrogênio, na faixa de temperatura de 25°C a 700°C e taxa de aquecimento de 10°C/min. O equipamento utilizado foi o TGA Q500 da TA Instruments. Já a análise de DRX foi realizada no Difratorômetro Rigaku, modelo Miniflex, com radiação CuK $\alpha$  ( $\lambda$ = 1,5418 Å) operando na voltagem de 20kV, corrente de 20mA e à temperatura ambiente. O grau de cristalinidade foi calculado baseado no método de deconvolução gaussiana (Zheng *et al.*, 2003). A análise de Espectroscopia no

Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi realizada no PerkinElmer Spectrum versão 10.4.2, com atenuação total de refletância (ATR) empregando resolução de  $4\text{cm}^{-1}$  e faixa de varredura de  $4000$  a  $600\text{cm}^{-1}$ .

## 2.5 FABRICAÇÃO DOS ATUADORES ESPIRALADOS DE POLIAMIDA

A fabricação dos MEPs se deu com o acoplamento de uma das extremidades do monofilamento a um motor e a outra ligada à um suporte com uma massa, gerando uma tensão nominal no monofilamento, como indicado na Figura 10. A extremidade conectada a massa foi impedida de girar e livre para se movimentar verticalmente ao se ligar o motor em sentido anti-horário. Os MEPs testados neste trabalho foram torcidas até que todo seu comprimento estivesse espiralado. O peso aplicado foi crucial para manter o monofilamento em linha reta e esticada, sem permitir o enroscamento antes do monofilamento se tornar espiralado.

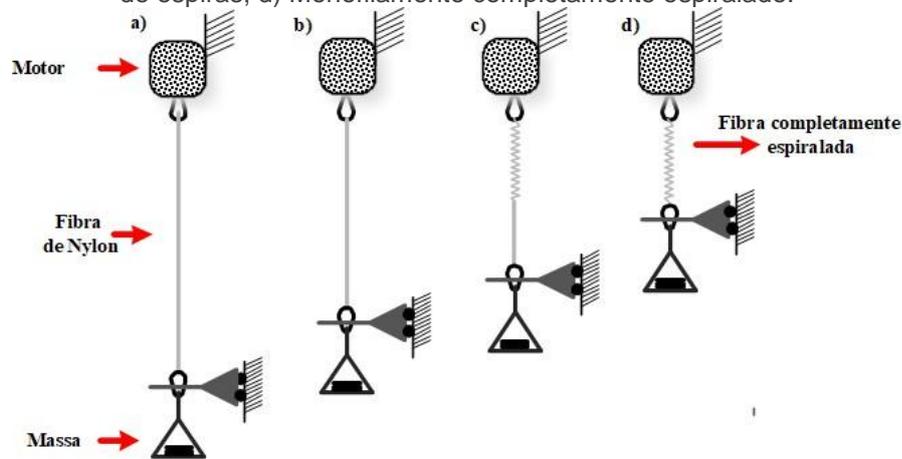
Foram selecionadas três tensões de fabricação, 6MPa, 9MPa e 12MPa, e conseqüentemente distintos índices de mola (3,7, 3,45 e 3,2, respectivamente). Para gerar esta tensão de fabricação foram utilizados pesos com os valores de 307,74g, 461,61g, 615,48g, respectivamente. A tensão nominal de fabricação foi calculada pela razão da força gerada pela massa dividida pela seção transversal do monofilamento. Devido aos diferentes valores de índices de molas, os ângulos iniciais de inclinação de cada mola foram diferentes.

Na Figura 13(a) temos o monofilamento de poliamida preso ao aparato antes do início da produção com a massa fixa na outra extremidade. Essa massa foi impedida de rotacionar, porém ficou livre para realizar movimento vertical. O tamanho do monofilamento é reduzido com o início da inserção de torção, conforme Figura 13(b). Na medida em que a torção foi inserida no monofilamento e este atingiu o seu limite de torção, formaram-se pequenos núcleos espiralados ao longo do seu comprimento conforme Figura 13(c). Na Figura 13(d) pode-se observar o esquema do aparato de fabricação com o monofilamento espiralada completamente formada, neste momento o motor é desligado para prevenir a ruptura do MEP devido ao excesso de torção.

Imediatamente após a fabricação, os MEPs foram submetidos a um tratamento térmico para manter a forma espiral alcançada anteriormente e diminuir a tensão residual gerada na amostra no processo de fabricação. Neste tratamento, as amostras,

fixadas a um aparato para impedir que o monofilamento se desenrolasse, foram submetidas a uma temperatura de 100°C por 30 minutos em uma estufa. Esse tratamento térmico a uma temperatura superior a temperatura de transição vítrea da poliamida (~47°C) torna permanente a geometria espiralada recém introduzida (McIntyre *et al.*, 2005; Herrera *et al.*, 2001; Choy *et al.*, 1981; Wypych *et al.*, 2012, Kobayashi *et al.*, 1970).

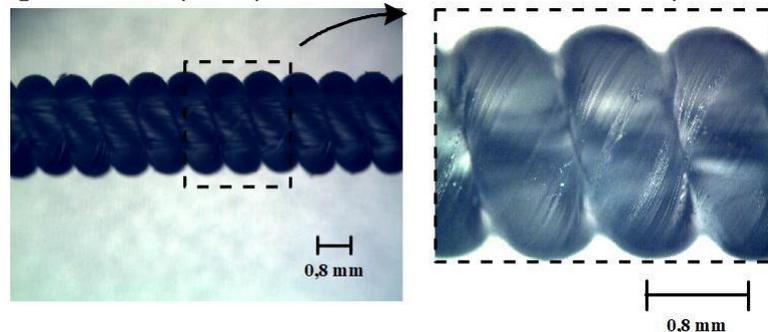
Figura 13 – Esquema de produção do corpo de prova a) Monofilamento precursor fixado no aparato de produção; b) Início da inserção de torção, monofilamento reduz o tamanho; c) Início da formação de espiras; d) Monofilamento completamente espiralado.



Fonte: O autor

Um exemplo do MEP usado como corpo de prova neste trabalho se encontra ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Corpo de prova fabricado: monofilamento de poliamida.



Fonte: O autor

Após o procedimento de fabricação e tratamento térmico, as amostras foram submetidas a um ciclo de treinamento na câmara térmica com a finalidade de diminuir a histerese do atuador. Como Haines *et al.* (2014) estabeleceram, ciclos de treinamento entre altas e baixas temperaturas (25°C até 95°C) garantem a resposta

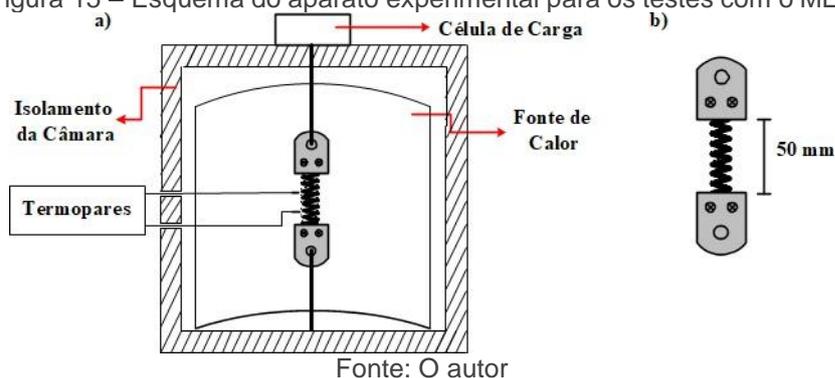
de atuação do MEP estável com o mínimo de efeitos de histerese. Esse processo de múltiplos aquecimentos e resfriamentos é destinado para treinar o MEP até que uma resposta de atuação reversível seja obtida. Ciclos de treinamento foram realizados após 24h do tratamento térmico. Neste intervalo, os corpos de prova foram mantidos fixos no aparato de tratamento térmico. Estes ciclos térmicos de treinamento consistiram no aquecimento do MEP deformado em 50% até a temperatura de 100°C, logo após um resfriamento até a temperatura ambiente (~25°C) mantendo a deformação, seguido de um aquecimento até 100°C com o MEP no seu comprimento não deformado, subsequente a um resfriamento até a temperatura ambiente. Este ciclo térmico foi realizado três vezes em cada corpo de prova. Os testes foram realizados após o término do treinamento do MEP.

## **2.6 ARRANJO EXPERIMENTAL E ENSAIOS DOS ATUADORES POLIMÉRICOS ESPIRALADOS**

Os experimentos foram conduzidos utilizando a câmara de temperatura controlada descrita anteriormente na seção 2.2. e no Anexo A, como indicada na Figura 15(a). A Figura 15(b) ilustra um esquema do corpo de prova sem deformação, com comprimento útil de 50mm. Novamente, imagens do corpo de prova foram capturadas com a câmera CCD de alta resolução da marca Sony modelo XCD-SX900 (resolução de 1280 x 960 pixels) com lentes C-Mount 10x Zoom fixada a uma distância constante do aparato durante todo o procedimento experimental. Os atuadores, dentro da câmara térmica, foram conectados a uma máquina de ensaios universal com uma célula de carga de 5Kgf.

Os testes com o MEP foram realizados utilizando os corpos de prova fabricados com diferentes tensões nominais de fabricação. Os corpos de prova, após serem acoplados ao aparato dentro da câmara térmica que estava conectada a uma máquina de testes universal, sofreram uma pré-deformação específica e a temperatura foi elevada até 100°C enquanto os dados de temperatura, força e fotos foram coletados.

Figura 15 – Esquema do aparato experimental para os testes com o MEP



As pré-deformações iniciais aplicadas nos MEPs foram de 10%, 15% e 20% do valor de comprimento inicial de cada corpo de prova (50mm), tornando seus comprimentos iniciais 55mm, 57,5mm e 60mm respectivamente. Essa pré-deformação foi mantida constante durante os testes. Foram realizados três testes com cada corpo de prova para analisar a deformação resultante da diferença entre a ordem dos aquecimentos no mesmo corpo de prova. Além disso, em cada teste, três espiras diferentes de cada corpo de prova foram analisadas para verificar a diferença entre os valores do desenrolamento, totalizando 27 variações de corpos de prova e 243 espiras analisadas. As variações analisadas podem ser verificadas nas Tabelas 1 e 2, nelas pode-se observar o ângulo  $\beta_0$  e  $\beta_1$  de inclinação das espiras antes e após a pré-deformação,  $\gamma_0$  e  $\gamma_1$  deformação cisalhante inicial e após a pré-deformação, o número de espiras, a pré-deformação aplicada em cada tipo de corpo de prova testado.

Tabela 1 – Corpos de prova após a fabricação.

Tipo de corpo de prova	$\gamma_0$ inicial (°)	$\beta_0$ inicial (°)	Número de espiras
6 MPa	2,23	3,36	57
9 MPa	5,61	7,86	55
12 MPa	8,19	10,76	52

Fonte: O autor

Tabela 2 – Corpos de prova com pré-deformação inicial

Tipo de corpo de prova	$\gamma_1$ (após a pré-deformação inicial) (°)	$\beta_1$ (após a pré-deformação inicial) (°)	Número de espiras	Pré-deformação
6 MPa	4,14	6,16	57	10%
6 MPa	6,76	10,11	57	15%
6 MPa	10,19	15,29	57	20%
9 MPa	7,50	10,51	55	10%
9 MPa	8,92	12,53	55	15%
9 MPa	10,28	14,48	55	20%
12 MPa	9,41	12,36	52	10%
12 MPa	11,09	14,61	52	15%
12 MPa	12,23	16,15	52	20%

Fonte: O autor

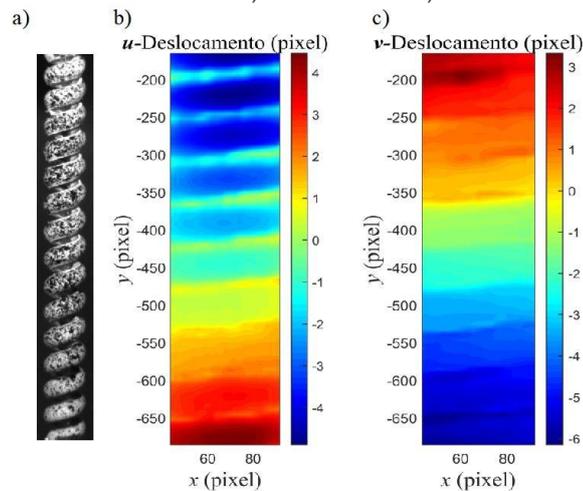
Inicialmente, no procedimento experimental, todos os corpos de prova foram pré-deformados à temperatura ambiente, 25°C, no interior da câmara térmica. Com o controle do microprocessador Arduino, a temperatura da câmara foi elevada da temperatura inicial de 30°C até a temperatura de 100°C. Como o controle do aquecimento da câmara térmica era realizado pelos valores medidos pelos termopares, que foram posicionados nas proximidades da região de interesse, para a medição de um valor médio de temperatura. Maiores informações se encontram no Anexo A. O intervalo entre os testes de um mesmo corpo de prova foi de 360 segundos. Durante o ensaio, a câmara de alta resolução capturou imagens do corpo de prova a cada 1 segundo. Os valores da força produzida pelo atuador devido ao aquecimento foram medidos a cada 1 segundo com a célula de carga.

### 2.6.1 DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE TORÇÃO ( $\Delta\theta$ ) DAS ESPIRAS COM DIC

Para caracterizar o material, este estudo adotou o método Correlação de imagens digitais (DIC – Digital Image Correlation) para estimar diretamente a rotação do filamento de espira dos MEPs causado pela variação de temperatura nos monofilamentos de poliamida. Para que essa comparação presente no método aconteça, a superfície da amostra foi submetida um padrão aleatório, que pode ser obtido através da aplicação de tinta spray.

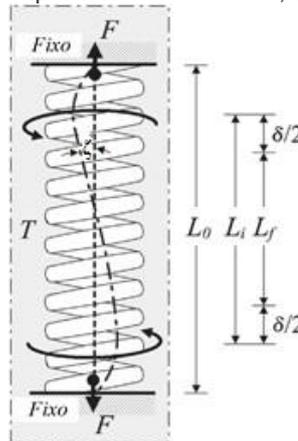
O comportamento como um todo do atuador foi observado com o método de correlação de Imagens Digital em uma análise anterior, seção 2.31. (Mendes *et al.*, 2017). Conforme ilustrado na Figura 16, a variação na temperatura induz uma contração vertical nas espiras do atuador. No campo de deslocamento horizontal, ilustrado na Figura 16(b), pode ser observado que a parte superior do atuador se move para a esquerda enquanto a parte inferior se move para a direita, indicando que o monofilamento espiralado sofre uma deformação torcional. Já no caso do campo de deslocamento ilustrado na Figura 16(c), pode-se observar que o atuador sofre uma contração ao ser aquecido, a parte superior move-se para baixo e a parte inferior move-se para cima. O padrão periódico observado nos dois campos de deslocamento é devido à forma espiralada do atuador. Na Figura 17 é apresentado um diagrama esquemático do movimento do atuador realizado pelos autores.

Figura 16 – a) Monofilamento espiralado com padrão monocromático aleatório e campos de deslocamento b) horizontal e c) vertical.



Fonte: (Mendes *et al.*, 2017 – modificado)

Figura 17 – Esquema de um MEP com extremidades fixas.  $T$  é a temperatura aplicada;  $F$  é a força da reação (ou força induzida);  $\zeta$  é a distorção angular;  $L_0$  é o comprimento do MEP;  $L_i$  é o comprimento efetivo inicial;  $L_f$  é o comprimento efetivo final;  $\delta$  é a deflexão do MEP.

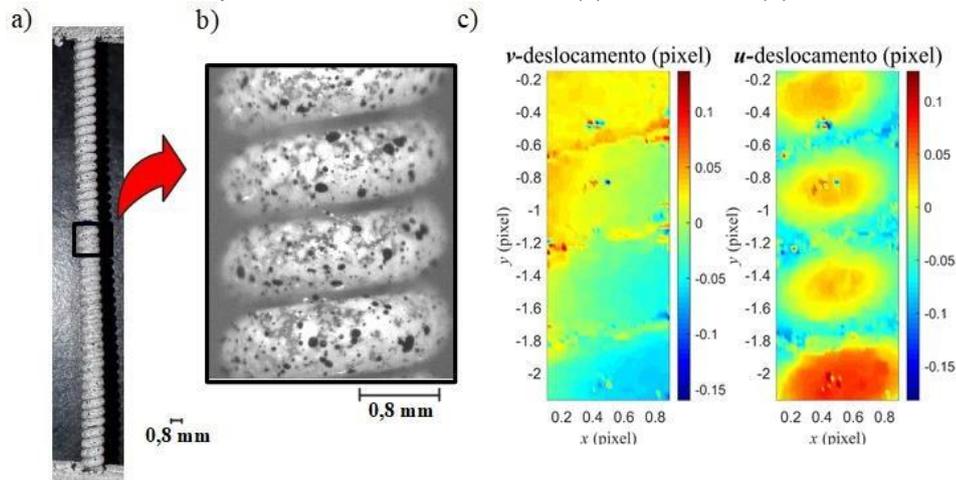


Fonte: (Mendes *et al.*, 2017 – modificado).

Neste trabalho, a região central do MEP (Figuras 18(a) e 18(b)) foi selecionada para a avaliação da variação do enrolamento das espiras, seu deslocamento e sua deformação. Na Figura 18(c) pode-se observar os campos de deslocamento gerados após a correlação de imagens de um corpo de prova durante o ciclo térmico. Na Figura 18(c) é ilustrado o campo deslocamento na horizontal e vertical do corpo de prova quando a temperatura era de 80°C.

Esse dado foi usado para calcular a variação do enrolamento das espiras do atuador. Conforme a Figura 18(c) a região central do corpo de prova permaneceu sem grandes deslocamentos verticais e horizontais conforme esperado.

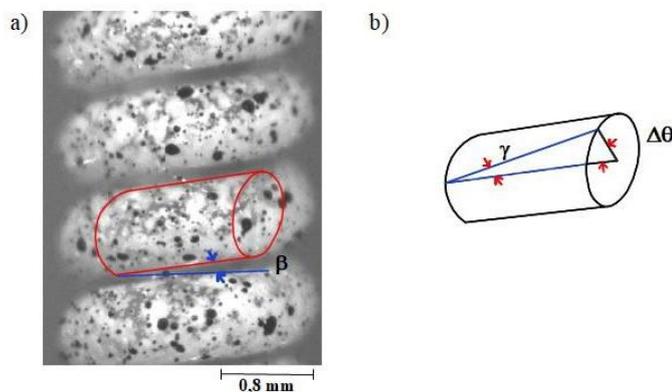
Figura 18 – a) Exemplo de corpo de prova do MEP analisado com b) região de interesse ampliada e c) campos de deslocamento vertical (v) e horizontal (u).



Fonte: O autor

Conforme mencionado anteriormente, as imagens capturadas foram processadas usando um programa de Correlação de Imagens Digitais, objetivando a obtenção dos campos de deslocamento e deformação do MEP durante o ciclo térmico. Antes da avaliação dos campos de deslocamento foram retiradas as rotações e translações de corpo rígido das espiras. Com os campos de deslocamento gerados, os valores do desenrolamento das espiras do atuador ( $\Delta\theta$  e  $\gamma$  – Figura 19(b)) puderam ser avaliados. O padrão randômico pode ser observado na Figura 19. Neste trabalho a sub-imagem de referência possuía 21 x 21 pixels, precisão do método é de 0,02 pixels.

Figura 19 – a) Região de interesse do corpo de prova do MEP com padrão aleatório monocromático para realização da Correlação de Imagens Digital e b) esquema de uma espira com os parâmetros analisados.



Fonte: O autor

Para obter o ângulo de torção do filamento ( $\Delta\theta$ ), deformação cisalhante ( $\gamma$ ) e da mudança de inclinação da espira ( $\beta$ ) com o aumento da temperatura, os campos de deslocamento extraídos foram usados. A inclinação da espira ( $\beta$ ) foi avaliada como sendo a rotação de corpo rígido da espira. E a variação da rotação do filamento e variação da torção na superfície ( $\Delta\theta$ ) foram determinadas analisando a variação do ângulo de inclinação da espira, as deformações horizontais e verticais medidas pelo método DIC durante o aquecimento dos MEPs.

## CAPÍTULO 03

### MODELOS DE COMPORTAMENTO

#### 3.1 MODELO PARA O COMPORTAMENTO TÉRMICO DO MONOFILAMENTO DE POLIAMIDA NÃO ESPIRALADO

O coeficiente de expansão térmica e a temperatura de transição da poliamida podem ser estimados a partir dos resultados da deformação térmica obtida com as duas abordagens feitas com o monofilamento de poliamida não espiralado. Para esse fim, a seguinte expressão de temperatura em função da deformação, pode ser usada,

$$T = T_t \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\xi_1 T_t}\right) \right] + \frac{\varepsilon}{\xi_2} \quad (1)$$

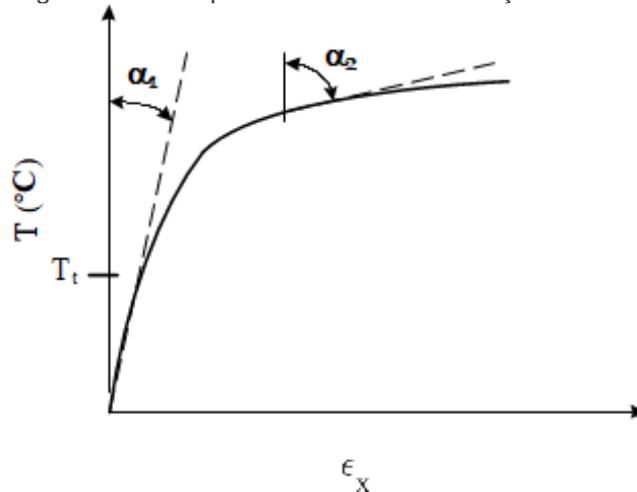
com

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon \rightarrow 0} = \frac{1}{\xi_1} + \frac{1}{\xi_2} = \alpha_1 \quad \text{e} \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon \rightarrow \infty} = \frac{1}{\xi_2} = \alpha_2 \quad (2)$$

onde  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são coeficientes de expansão térmica. A faixa de temperatura de transição é definida por  $T_t$ , é a temperatura na qual as propriedades do material mudam.

Na Figura 20 é ilustrada uma curva típica do modelo proposto. Nesta figura,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são definidos pela primeira e segunda inclinações, respectivamente. O primeiro coeficiente pode ser associado ao coeficiente de expansão térmica do monofilamento até a temperatura de transição vítrea, enquanto o segundo pode ser associado ao coeficiente de expansão térmica do material no estado borrachoso.

Figura 20 – Temperatura versus deformação térmica.



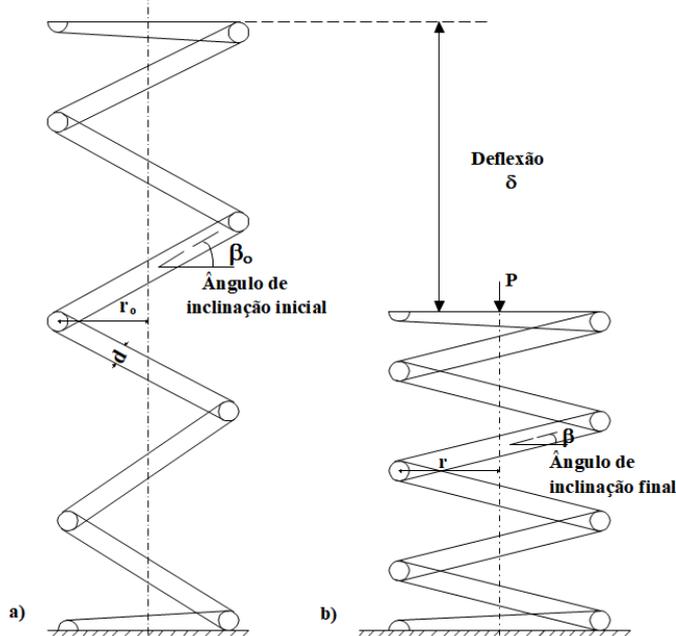
### 3.2 MOLAS HELICOIDAIS

Para modelar o presente problema, utilizou-se a teoria de molas helicoidais com grande índice. Isto se deve ao fato de que a referida teoria é mais indicada para tratar situações em que o ângulo de inclinação é diferente de zero. O índice de mola (C), usado para classificar tipos de molas, é definido como o diâmetro médio da espira ( $2r$ ) dividido pelo diâmetro do arame ( $d$ ).

Em molas de índices elevados, mudanças no ângulo de inclinação e no raio da espira durante a deformação são mais proeminentes. Por outro lado, nas com índices classificados como pequeno ou moderado, altas tensões são estabilizadas antes que a deflexão se torne suficientemente grande. Com isso, mudanças no ângulo de inclinação ou no raio da espira não são significativas. Portanto, a teoria de molas helicoidais de pequeno índice apresenta erros por presumir o ângulo de inclinação inicial nulo e a não ocorrência de mudanças no raio da espira que ocorrem em molas de grande índice.

Durante a compressão de uma mola helicoidal, como mostrado na Figura 21, o raio da espira aumenta de  $r_0$  para  $r$  e o ângulo de inclinação inicial diminui de  $\beta_0$  para  $\beta$ . Quando uma mola helicoidal é submetida a uma tensão axial resultando em uma grande deflexão, há uma tendência das espiras de se destorcerem. Com isso, as extremidades da mola tendem a girar uma em relação a outra em torno do eixo da mola. Caso a mola tenha as extremidades fixas prevenindo sua rotação, surgem momentos atuando nos extremos em relação ao eixo da mola.

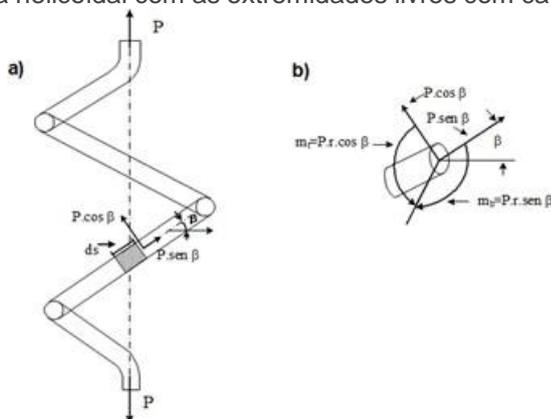
Figura 21 – Mola helicoidal na a) posição inicial antes da compressão e b) após a compressão.



Fonte: O autor

Na Figura 22 (a) podemos observar uma mola helicoidal de grande ângulo inicial de inclinação submetida a um esforço  $P$ . Suas extremidades estão livres para rotação em relação ao eixo da mola. Assumindo o ângulo de inclinação como  $\beta$  e o raio da espira sendo  $r$ , as forças e momentos atuando em um elemento infinitesimal  $A$  (ampliado na Figura 22(b)), de comprimento  $ds$ , serão um momento fletor  $m_b = P r \text{sen}(\beta)$ , um momento torçor  $m_t = P r \text{cos}(\beta)$ , uma força cortante  $P \text{cos}(\beta)$  e uma força normal de  $P \text{sen}(\beta)$ .

Figura 22 – Mola helicoidal com as extremidades livres com carregamento axial.



Fonte: O autor

No cálculo de molas, é relativamente mais simples considerar o raio da espira  $r_0$  na condição de não carregamento como a base do cálculo, dado que esse valor é

facilmente mensurado. Para uma mola axialmente carregada, o raio da espira real é dado por  $r = K_2 \cdot r_0$ , onde  $K_2$  é uma função da razão  $\delta_0/n \cdot r_0$  entre a deflexão nominal por volta e o raio inicial da espira ( $r_0$ ), e do valor inicial de inclinação  $\beta_0$ . A deflexão nominal ( $\delta_0$ ) usando o raio inicial  $r_0$  da espira antes da deflexão é:

$$\delta_0 = \frac{64 P r_0^3 n}{G d^4} \quad (3)$$

onde  $n$  é o número de espiras ativas, e  $G$  o módulo de rigidez torcional e  $P$  a carga axial.

Assumindo uma mola helicoidal axialmente carregada com as extremidades livres para rotação (Figura 22(a)), e conforme a teoria da elasticidade (Love, 2013), temos que na medida em que a mola deflete, uma mudança na curvatura da espira da mola é equivalente a

$$\Delta k = \frac{\cos^2(\beta)}{r} - \frac{\cos^2(\beta_0)}{r_0} \quad (4)$$

onde  $r_0$  e  $r$  são os raios inicial e final da mola e  $\beta_0$  e  $\beta$  são os valores inicial e final do ângulo de inclinação.

De acordo com a Figura 22(b) o momento fletor,  $m_b = P r \text{sen}(\beta)$  gera a mudança na curvatura do arame. Este momento deve ser equivalente a rigidez flexional  $EI$  multiplicada pela mudança de curvatura, conforme:

$$P r \text{sen}(\beta) = EI(\Delta k) \quad (5)$$

onde  $E$  representa o módulo de elasticidade do material do arame e  $I$ , o momento de inércia da seção transversal do arame da espira.

Da teoria da elasticidade (Love, 2013), também pode ser demonstrado que, na medida em que a mola sofre deflexão de um ângulo de inclinação inicial  $\beta_0$  para um ângulo de inclinação final  $\beta$ , sua torção  $\Delta\theta$  por unidade de comprimento do arame pode ser definida por:

$$\Delta\theta = \frac{\text{sen}(\beta)\cos(\beta)}{r} - \frac{\text{sen}(\beta_0)\cos(\beta_0)}{r_0} \quad (6)$$

O ângulo de torção  $\Delta\theta$  multiplicada pela rigidez torcional  $GI_p$  (para um arame de seção transversal redondo) é equivalente ao momento de torção  $m_t$ , conforme abaixo:

$$P r \cos(\beta) = GI_p(\Delta\theta) \quad (7)$$

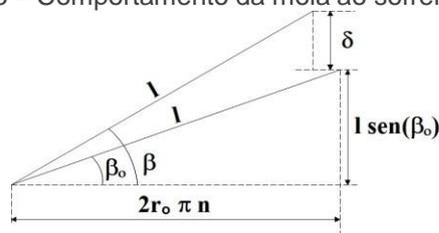
Sendo  $G$  o módulo de rigidez cisalhamento e  $I_p$  momento de inércia polar da seção transversal do arame da espira. A Equação (7) pode ser reescrita como:

$$P = \frac{GI_p}{r \cos(\beta)} \left( \frac{\text{sen}(\beta)\cos(\beta)}{r} - \frac{\text{sen}(\beta_0)\cos(\beta_0)}{r_0} \right) \quad (8)$$

Assumindo que o comprimento ativo do raio da mola ( $l$ ) se mantém constante, que é uma suposição coerente para molas de grande índice, a projeção do raio da espira na base da mola varia quando esta sofre uma deflexão  $\delta$ , ver Figuras 22 e 23. Da geometria da Figura 21, é deduzido que quando o ângulo de inclinação muda de  $\alpha_0$  para  $\alpha$  e a deflexão total  $\delta$  torna-se

$$\delta = l (\text{sen}(\beta) - \text{sen}(\beta_0)) \quad (9)$$

Figura 23 – Comportamento da mola ao sofrer deflexão.



Fonte: O autor

Como  $l \cdot \cos(\beta_0) = 2\pi \cdot n \cdot r_0$ , onde  $n$  é o número total de espiras ativas, a Equação (9) pode ser reescrita como:

$$\delta = \frac{2\pi nr_o}{\cos(\beta_o)} (\text{sen}(\beta) - \text{sen}(\beta_o)) \quad (10)$$

### 3.3 MODELO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO MEP

Parâmetros geométricos, como os expostos na seção anterior, são comumente utilizados para modelar o comportamento de atuadores em formato de mola helicoidal. O presente modelo considera apenas as espiras ativas compondo o comprimento  $L_i$  e devido ao fato de estarmos trabalhando com pequenas deflexões, o raio  $r$  do atuador pode ser considerado constante.

O comportamento do MEP pode ser dividido em três estados: 1- o estado inicial após os tratamentos térmicos e treinamento térmico; 2- o estado pré-deformado em que o corpo de prova se encontra no início do teste; e, 3- o estado de atuação. Ao deformar o MEP de seu estado inicial até a pre-deformação de teste há a separação das espiras, ou seja, uma variação nos parâmetros de ângulo de torção por unidade de comprimento ( $\Delta\theta$ ) e ângulo da espira ( $\beta$ ). Além disso, deformação cisalhante,  $\gamma$ , das espiras também irá variar entre os estados inicial e final. Esta variação por unidade de comprimento pode ser avaliada com a Equação 6 como sendo,

$$\Delta\theta = \frac{\text{sen}(\beta_f)\cos(\beta_f)}{r_f} - \frac{\text{sen}(\beta_i)\cos(\beta_i)}{r_i} \quad (11)$$

Ao analisar a variação do estado 1 para o estado 2 temos que o ângulo  $\beta_f$  tende a ser menor que o ângulo inicial de inclinação das espiras  $\beta_i$ , devido a separação destas.

Para a avaliação da deformação cisalhante,  $\gamma$ , e considerando a definição de cisalhamento por unidade de comprimento, podemos associar a torção por unidade de comprimento ( $\Delta\theta$ ), o diâmetro do arame ( $d$ ) por,

$$\gamma = \frac{d}{2} \frac{\partial\theta}{\partial x} \quad (12)$$

Essa análise pode ser expandida para a variação dos parâmetros  $\gamma$  e  $\Delta\theta$  entre os estados 2 e 3. Porém, nesse caso, há a tendência de aproximação das espiras, sendo

que em alguns casos, dependendo da quantidade de pré-deformação e parâmetros de fabricação, há contato entre as espiras. Desta maneira, há a tendência do ângulo de inclinação final,  $\beta_3$  (ângulo do estado 3) ser maior que o ângulo após a deformação  $\beta_2$  (ângulo do estado 2), dado que este movimento é um movimento das espiras contrário do observado entre os estados 1 e 2 (de  $\beta_1$  para  $\beta_2$ ).

As propriedades do material utilizado variam com a temperatura, assim os valores do módulo de Young e contração térmica foram medidos utilizando também o método de Correlação de Imagens Digitais para eliminar possíveis variações na medição provenientes do contato. O valor do módulo de Poisson ( $\nu$ ) adotado foi de 0,39 (Hearle, 2008). Os valores do módulo de cisalhamento,  $G$ , e do momento de inércia polar,  $I_p$ , são dados pelas Equações (13) e (14):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (13)$$

$$I_p = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (14)$$

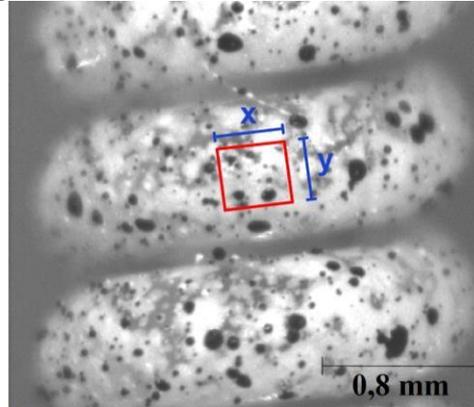
As incógnitas  $E$ ,  $r$ ,  $d$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\gamma$  e  $\beta$  variam durante a atuação do monofilamento espiralado, ou seja, variam com a elevação da temperatura. Com a utilização do método DIC e os procedimentos experimentais apresentados, esses valores podem ser determinados como funções da temperatura. Com isso, a Equação (8) pode ser reescrita como:

$$P(T) = \frac{\frac{E(T)}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{32} d(T)^4}{r(T) \cdot \cos(\beta(T))} (\Delta\theta(T)) \quad (15)$$

Sendo  $d$  o diâmetro do arame da espira,  $r$  o raio da projeção ortogonal da espira do atuador,  $P$  a força gerada pelo atuador,  $E(T)$  o módulo de elasticidade em função com a temperatura,  $\beta(T)$  a função do ângulo de inclinação da espira em relação a temperatura e  $\gamma(T)$  a alteração da deformação cisalhante em relação a variação de temperatura. Considerando  $x$  e  $y$  os valores iniciais de um elemento analisado, ver

Figura 24, a deformação cisalhante foi calculada com os campos de deslocamento  $u$  e  $v$  obtidos usando DIC e a Equação (16).

Figura 24 – Elemento analisado de uma espira



Fonte: O autor

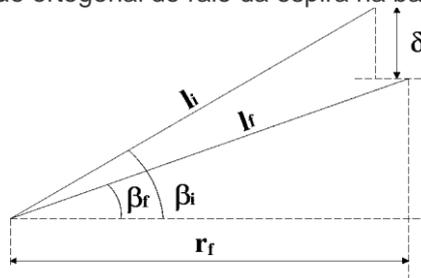
$$\gamma = \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (16)$$

No caso da variação do arame da espira com o aumento da temperatura podemos calculá-lo considerando a deformação vertical  $\varepsilon_y$  e fazendo  $d_i = y_i$ ,

$$d(T) = d_i(1 + \varepsilon_y) \quad (17)$$

O valor da projeção ortogonal do raio da espira na base da mola também sofre uma variação devido à deflexão gerada pelo aumento de temperatura. Considerando a Figura 25 temos que,

Figura 25 – Variação da projeção ortogonal do raio da espira na base da mola com a mudança de  $\beta$



Fonte: O autor

$$r_f = \frac{r_i \cos(\beta_f)(1 + \varepsilon_x)}{\cos(\beta_i)} \quad (18)$$

Considerando todas as equações anteriores (11) até (18), temos que o valor da força gerada pelo atuador pode ser calculada por:

$$P = \frac{\pi d_f(T)^4 E(T)}{64(1+\nu) r_f \cos(\beta_f(T))} (\Delta\theta(T)) \quad (19)$$

Sendo,

$$\cos(\beta_f(T)) = \sqrt{1 - \frac{4\gamma_f(T)^2 r_i^2 (1+\varepsilon_x(T))^2}{d_f^2 \cos^2(\beta_i)}} \quad (20)$$

$$\Delta\theta(T) = \frac{2\gamma_f(T)}{d_f(T)} - \frac{2\gamma_i}{d_i} \quad (21)$$

$$\gamma_f(T) = \frac{\partial u}{\partial y}(T) + \frac{\partial v}{\partial x}(T) \quad (22)$$

$$d_f(T) = d_i(1 + \varepsilon_y(T)) \quad (23)$$

$$r_f(T) = \frac{r_i \cos(\beta_f)(1+\varepsilon_x)}{\cos(\beta_i)} \quad (24)$$

## CAPÍTULO 04

### RESULTADOS

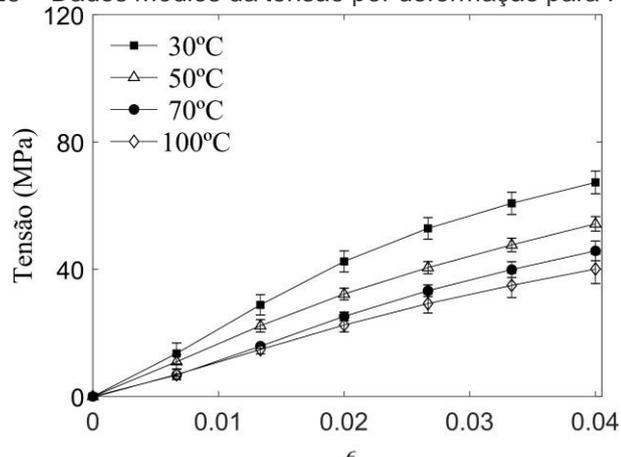
Assim como os métodos experimentais deste trabalho se dividiram em quatro estudos experimentais distintos, os resultados deste trabalho também serão divididos da mesma forma: i) Os monofilamentos de poliamida são submetidos ao ensaio de tração com diferentes temperaturas e velocidade constante; ii) Os monofilamentos de poliamida são submetidos ao ensaio de expansão térmica usando uma nova metodologia; iii) Amostras dos monofilamentos de poliamida são caracterizadas termicamente usando termogravimetria (TGA), calorimetria exploratória diferencial (DSC), Difração de raios X (DRX) e a análise Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR); iv) Os monofilamentos espiralados de poliamida (MEPs) são fabricados e testados.

#### 4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO NO MONOFILAMENTO DE POLIAMIDA NÃO ESPIRALADO

Os resultados experimentais das monofilamentos de poliamida são apresentados nesta seção. Na Figura 26 são mostrados os resultados dos testes de. Cinco amostras foram testadas para cada condição de temperatura (30°C, 50°C, 70°C e 100°C).

Acima da temperatura de transição vítrea (aproximadamente 47°C), os polímeros semicristalinos não derretem, diferentemente dos polímeros cristalinos, mas sofrem uma mudança em sua estrutura de rígida para flexível (Lewin, 2006). Suas cadeias poliméricas da fase amorfa adquirem mobilidade, isto é, adquirem possibilidade de conformação. Essa mudança implica uma alteração drástica em quase todas as suas propriedades. Portanto, como esperado, as amostras apresentaram relaxamento quando foram realizados testes de tração acima da temperatura de transição vítrea; a tensão foi menor para a mesma deformação em temperaturas mais altas.

Figura 26 – Dados médios da tensão por deformação para Poliamida



O módulo de elasticidade medido experimentalmente é apresentado na Tabelas 3. O módulo de elasticidade obtido para as amostras a 30°C foi de  $2,14 \pm 0,03$  GPa e, foram abaixo dos valores da literatura, que se encontram entre 3,08-3,33 GPa para poliamida 6 e 3-3,6 GPa para poliamida 6,6 em temperatura ambiente (Wypych, 2016). Este fato se deve a presença de outros compostos não especificados pelo fabricante. Para a monofilamento estudada houve uma diminuição de 23,6% do módulo a 50°C, 42,81% a 70°C e 52,09% a 100°C.

Tabela 3 – Dados experimentais Poliamida 1.  
Taxa de deformação 8mm / min.

Temperatura	Módulo de Young (GPa)
30 °C	$2,14 \pm 0,03$
50 °C	$1,64 \pm 0,02$
70 °C	$1,27 \pm 0,01$
100 °C	$1,12 \pm 0,02$

Fonte: O autor

Analisando o comportamento dos valores experimentais da Tabela 3 e com o auxílio de um programa de pós processamento pode-se ajustar uma curva no formato da Equação (25) aos dados experimentais:

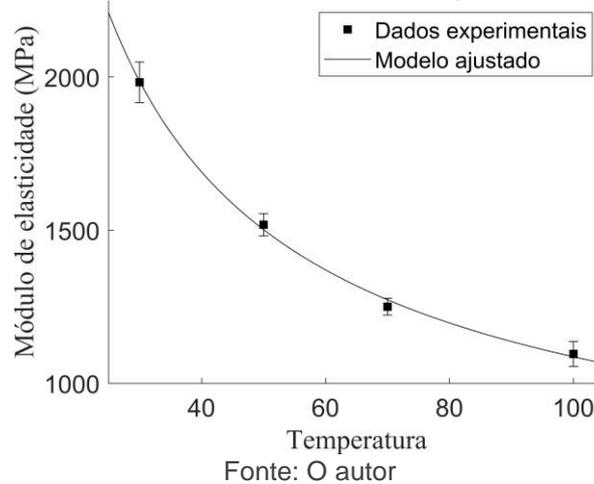
$$E(T) = E_0 * T^n + c \quad (25)$$

Os coeficientes apresentados na Equação (26) possuem uma correlação de aproximadamente 1 com os dados experimentais. Esta equação possui validade no domínio de temperaturas testada, entre 30° e 100°. Na Figura 27 os valores

experimentais e o modelo ajustado do decaimento do módulo de elasticidade em relação a temperatura podem ser observados.

$$E(T) = 20500 * T^{-0,7716} + 499,7 \quad (26)$$

Figura 27 – Dados experimentais de Módulo de Elasticidade para a Poliamida e modelo ajustado.



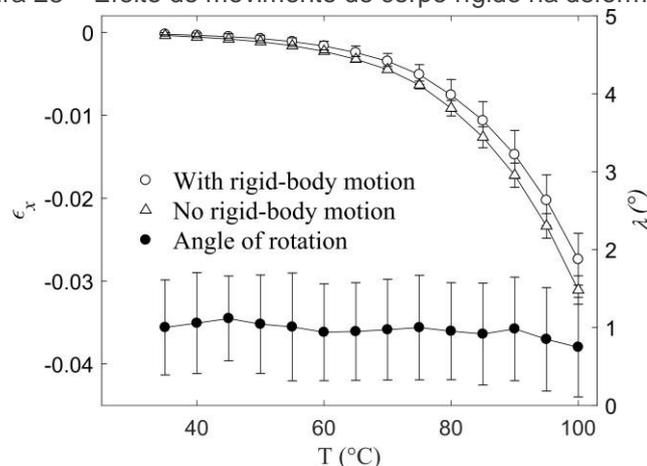
## 4.2 EXPANSÃO TÉRMICA NO MONOFILAMENTO DE POLIAMIDA NÃO ESPIRALADO

Antes de realizar a análise de deformação térmica em amostras de monofilamentos de poliamida, mostrou-se conveniente investigar a influência de movimentos de corpos rígidos. Como mencionado anteriormente, as amostras de monofilamentos sofrem deformações, bem como a movimentos de rotação e translação quando a temperatura é aumentada. A Figura 28 ilustra os valores médios da deformação axial e seus desvios padrão em função da temperatura com e sem remoção de movimentos do corpo rígido. Como pode ser visto nos resultados, a amostra de monofilamento de poliamida se contrai quando aquecida e, portanto, um aumento de temperatura produz uma deformação térmica negativa. Esse comportamento já foi observado na literatura (Choy *et al.*, 1981, Choy *et al.*, 1985).

O ângulo de rotação  $\lambda$  das amostras de monofilamento também é mostrado na Figura 28. Segundo a análise de movimento de corpos rígidos usando o método de Correlação de Imagens Digitais, o ângulo de rotação permaneceu praticamente inalterado durante toda a deformação térmica (contração). Os pequenos valores de rotação podem ser atribuídos ao diâmetro do canal cilíndrico do aparelho que é

ligeiramente maior que o diâmetro das amostras de monofilamento de poliamida. A diferença entre os dois diâmetros promove movimentos longitudinais livres; por outro lado, também pode ser gerada rotação indesejada. Claramente, a estimativa da deformação pode ser influenciada por essa rotação. Embora a diferença entre deformações térmicas seja da ordem dos valores de desvio padrão, na presente investigação, são considerados os valores de deformação térmica com correção para movimentos de corpos rígidos.

Figura 28 – Efeito do movimento de corpo rígido na deformação.



Fonte: O autor

#### 4.2.1 TESTES CICLOS

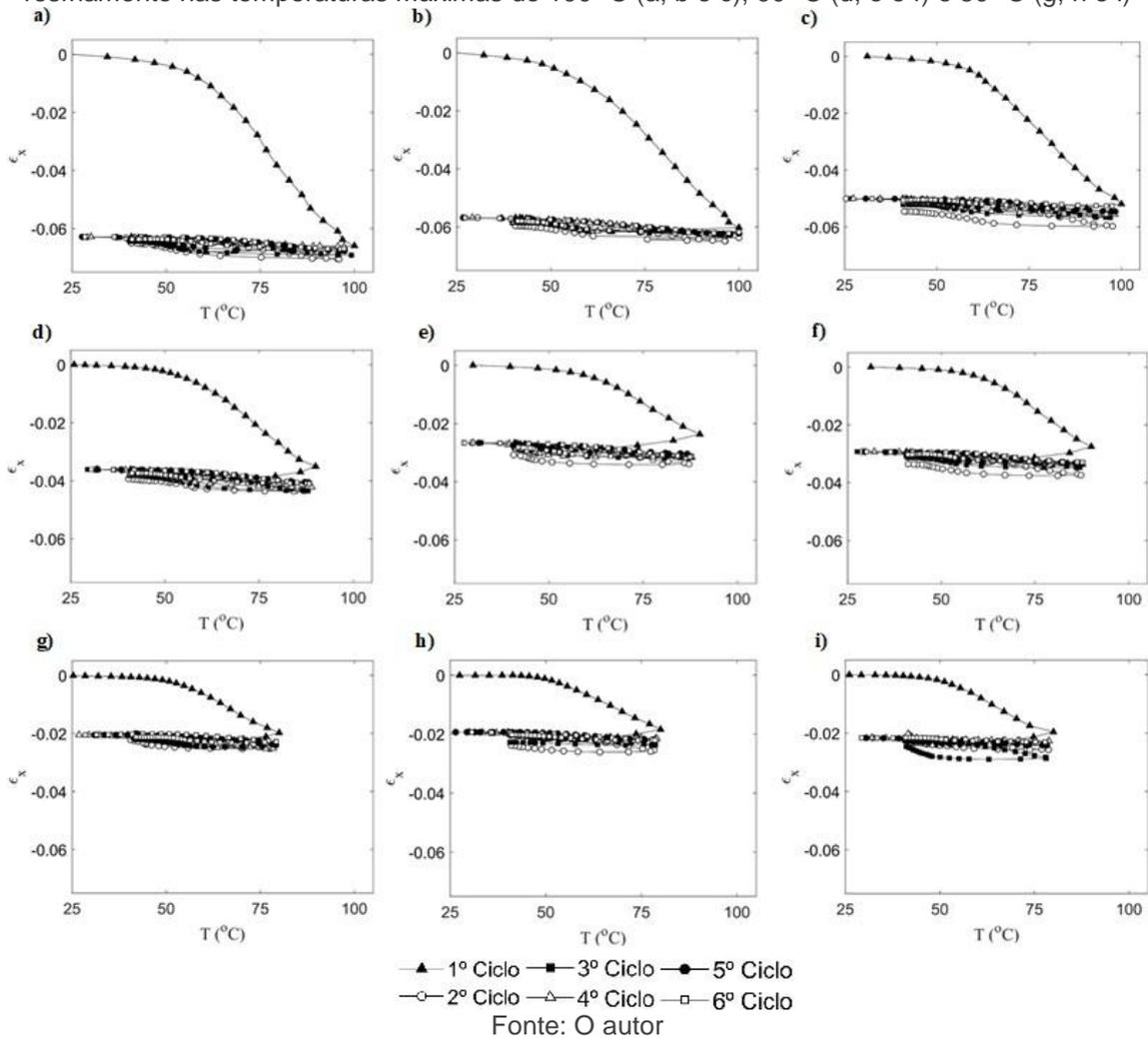
Os próximos resultados estão relacionados aos testes realizados na câmara térmica, que foram analisadas pelo método DIC. Os primeiros dados estão relacionados aos testes de aquecimento e resfriamento. Três espécimes de cada monofilamento foram submetidos a seis ciclos consecutivos de aquecimento-resfriamento para cada temperatura máxima. Foram testadas três temperaturas máximas diferentes, 80°C, 90°C e 100°C. Este procedimento foi realizado com um tipo de monofilamento e apresentou uma boa concordância entre eles.

O monofilamento estudado apresentou expansão térmica assimétrica devido à microestrutura dos polímeros trefilados. Considerando as propriedades transversalmente anisotrópicas do monofilamento, as propriedades geométricas dos monofilamentos estudados e as limitações da metodologia de medição, apenas a deformação axial foi medida com essa metodologia. As limitações são devidas ao tamanho do padrão produzido no monofilamento e ao diâmetro escolhido. Neste

trabalho, a deformação axial do monofilamento é denominada deformação longitudinal. As Figuras 29(a), 29(b) e 29(c) mostram a deformação axial em função da temperatura aplicada de uma amostra de monofilamento de poliamida no primeiro conjunto de testes. Nesse caso, a amostra foi submetida a seis ciclos consecutivos de aquecimento-resfriamento, a uma temperatura máxima de 100°C. Além disso, três amostras foram testadas com mais duas temperaturas máximas diferentes de 90°C e 80°C, seu comportamento pode ser observado nas Figuras 29(d), 29(e) e 29(f) e Figuras 29(g), 29(h) e 29(i), respectivamente. Deve-se mencionar que todas as curvas de deformação devido ao aumento da temperatura mostraram uma resposta semelhante. Também foi observada uma tendência da deformação para estabilizar após o terceiro ciclo térmico.

O primeiro ciclo representa a história térmica do processo de fabricação, ou seja, a deformação residual resultante do processo de fabricação, na qual os monofilamentos foram submetidos. Na produção de monofilamentos poliméricos, seu sistema semicristalino é comumente submetido a uma força de tração a qual alinha as cadeias das moléculas da poliamida. Essa carga axial forma uma rede estável e induz anisotropia transversal na estrutura. Nos ciclos térmicos deste trabalho, nem toda a deformação residual foi recuperada, uma vez que a temperatura máxima testada (100°C) ficou abaixo da temperatura de fusão ( $T_m$ ) do material.

Figura 29 – Deformação longitudinal média das amostras durante seis ciclos de aquecimento-resfriamento nas temperaturas máximas de 100 °C (a, b e c), 90 °C (d, e e f) e 80 °C (g, h e i)



Considerando o processo de aquecimento ou resfriamento, duas inclinações distintas das curvas de deformação térmica são observadas em todos os resultados da Figura 29. A transição entre essas inclinações está relacionada à zona de transição vítrea. Acima dessa transição, a poliamida ganha mobilidade, isto é, partes de cadeias que anteriormente não tinham capacidade de se mover, sofrem alterações estruturais de rígidas para flexíveis e, portanto, há uma alteração na capacidade térmica do material. Esse fenômeno já foi observado na literatura (Choy *et al.*, 1985, Choy *et al.*, 1981). A pequena diferença entre as curvas de deformação térmica das amostras pode ser atribuída à quantidade de água presente em cada amostra testada, uma vez que alguns testes foram realizados em dias diferentes. Segundo Choy *et al.* (1985), a água atua como plastificante e sua absorção pode gerar uma variação de até 80°C na temperatura de transição vítrea da poliamida.

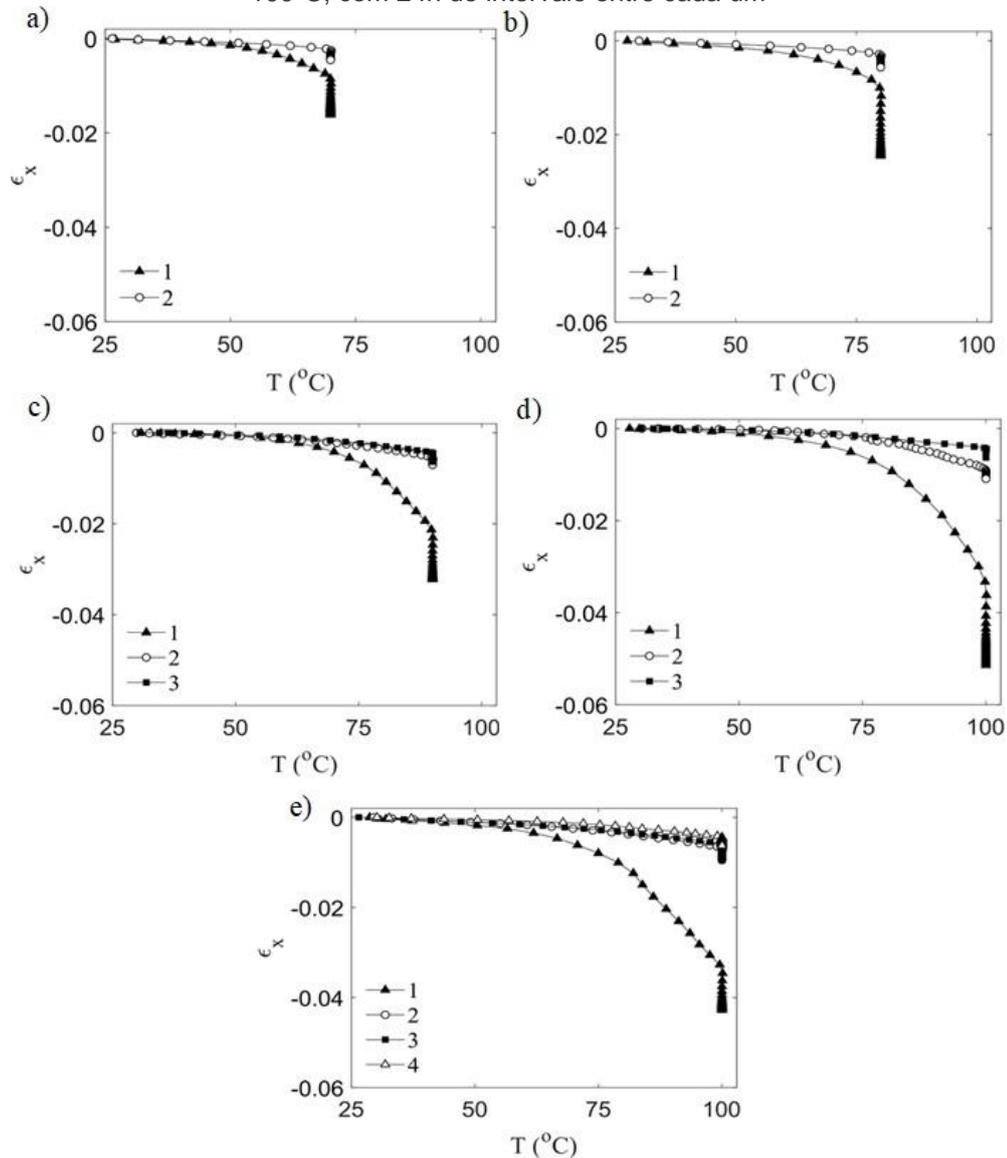
Sendo 87°C o valor de Tg de poliamida livre de água e 0°C, quando este é embebido em 6,4% de água (Choy *et al.*, 1985, Mark, 2014). O efeito da absorção de água da poliamida é natural e ocorre quando o material é exposto ao meio ambiente. As moléculas de água absorvidas interagem fortemente com os grupos amida da poliamida através de ligações de hidrogênio. Estas substituem, as fortes interações existentes entre as cadeias da poliamida, podendo diminuir algumas propriedades mecânicas.

#### 4.2.2 TESTES TEMPERATURA CONSTANTE

Os resultados médios dos testes nos quais a temperatura foi aumentada e mantida constante durante 200 segundos, especificamente o segundo conjunto de testes (o procedimento experimental é descrito na seção 2.3), são mostrados na Figura 30. As amostras foram testadas sob quatro temperaturas máximas (70°C, 80°C, 90°C e 100°C). Dois aquecimentos foram conduzidos para cada amostra para as temperaturas dos experimentos de 70°C e 80°C, respectivamente Figura 30(a) e 30(b). Foram feitos três aquecimentos para as temperaturas máximas de 90°C e 100°C, Figura 30(c) e 30(d) respectivamente. Cada experimento foi replicado três vezes para cada conjunto de variáveis de temperatura.

As respostas de deformação térmica das amostras de poliamida utilizando no segundo conjunto de testes foram obtidas considerando o perfil de temperatura ilustrado na Figura 30, em que a temperatura foi aumentada e depois mantida constante durante 200 segundos. Deve-se notar que o comportamento exibido por todas as amostras foi semelhante. O intervalo de tempo de recuperação aplicado de 500 segundos pode ser considerado adequado quando comparado aos resultados com 24 horas, isto é, as Figuras 30(d) e 30(e) mostram respostas semelhantes. Esses resultados mostram que os monofilamentos mantêm a contração térmica após um longo período.

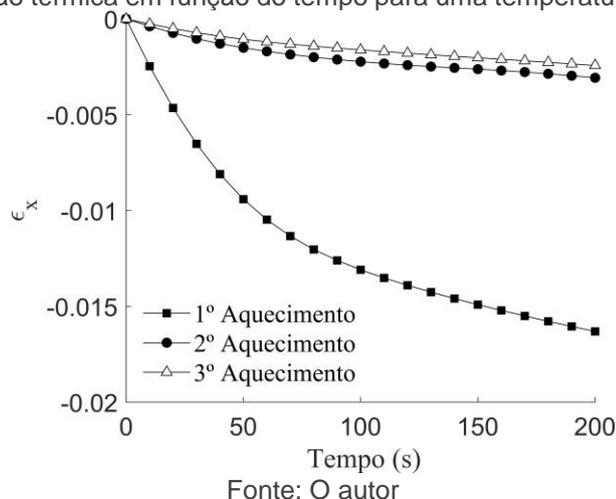
Figura 30 – Deformação axial média de amostras de poliamida usando o segundo método (a) 70°C, (b) 80°C, (c) 90°C, (d) 100°C com intervalo de 500s entre ciclos; e (e) quatro ciclos com intervalo de 100°C, com 24h de intervalo entre cada um



Fonte: O autor

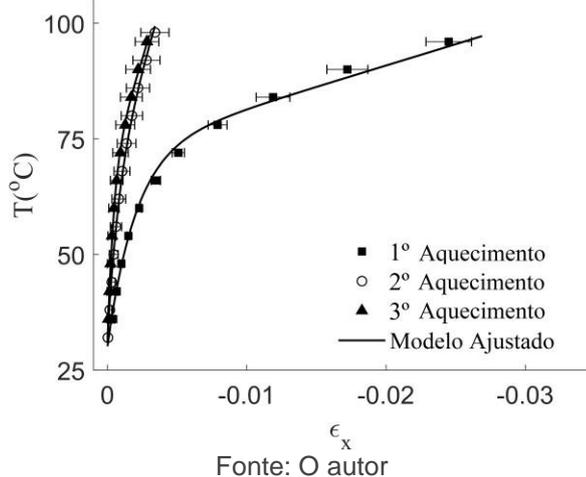
Novamente, é possível observar a partir dos resultados na Figura 30 que há uma tendência de a deformação térmica estabilizar após o terceiro ciclo de aquecimento. Quando a temperatura se torna constante, a deformação térmica tem um comportamento diferente. Como exemplo, a Figura 31 ilustra a deformação térmica de uma amostra de poliamida em função do tempo para uma temperatura constante de 100°C. Esses dados foram extraídos da Figura 30(d), considerando apenas a faixa de condição isotérmica. Como pode ser visto nesta figura, a deformação térmica tende a estabilizar com os ciclos.

Figura 31 – Deformação térmica em função do tempo para uma temperatura constante de 100 °C.



A Figura 32 ilustra a temperatura em função da deformação térmica para três processos consecutivos de aquecimento com temperatura máxima de 100°C. O valor médio e o desvio padrão da deformação térmica foram avaliados a partir de três testes. O modelo proposto Equações (1) e (2) foi ajustado aos dados experimentais para estimar  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $T_t$  com um nível de confiança de 95%. Esses parâmetros que foram determinados usando um método de mínimos quadrados não lineares estão resumidos em Tabela 4. Pode ser observada uma boa concordância entre os dados experimentais e o modelo proposto.

Figura 32 – Dados experimentais com modelo proposto para experimentos a 100 °C.



A partir dos resultados observados na Tabela 4, o coeficiente de expansão térmica muda de um valor negativo modesto ( $\alpha_1$ ) para um valor negativo grande ( $\alpha_2$ ). Essa transição ocorre em torno da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da monofilamento (Haines *et al.*, 2014). Claramente, ambos os valores têm uma

tendência de estabilização após o terceiro processo de aquecimento. Para fins de comparação, o coeficiente de expansão térmica  $\alpha_1$  é definido até 80°C para amostras secas de poliamida, como  $8,3 \cdot 10^{-5} \text{°C}^{-1}$  até  $9,3 \cdot 10^{-5} \text{°C}^{-1}$  (Wypych, 2016). Além disso, a temperatura de transição vítrea pode variar substancialmente de 40°C a 70°C.

De fato, as propriedades termomecânicas das poliamidas são altamente influenciadas pela temperatura da amostra, condições ambientais, sua forma, quantidade de água nas amostras, natureza química das macromoléculas, massa molecular, grau de cristalinidade, presença ou ausência de plastificante, umidade, orientação e outras propriedades (Choy *et al.*, 1981) Por exemplo, conforme relatado por Choy *et al.* (1985) a temperatura de transição vítrea de uma amostra de poliamida saturada com água é 80°C mais baixa em comparação com a seca.

Tabela 4 – Valores dos coeficientes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $T_t$  dos experimentos de 100 °C

Ciclo	$\alpha_1 (10^{-5} \text{°C}^{-1})$	$\alpha_2 (10^{-3} \text{°C}^{-1})$	$T_t (\text{°C})$
1º	$-4.76 \pm 0.09$	$-1.08 \pm 0.06$	$42.41 \pm 2$
2º	$-2.36 \pm 0.09$	$-0.10 \pm 0.05$	$37.71 \pm 2$
3º	$-1.58 \pm 0.08$	$-0.10 \pm 0.03$	$41.11 \pm 2$

Fonte: O autor

Na Tabela 4 pode-se observar que os valores do coeficiente  $\alpha_1$  foram  $10^{-2}$  superiores aos valores de  $\alpha_2$ , caracterizando um comportamento diferente após a temperatura de transição (Yang *et al.*, 2016, Karami *et al.*, 2017). E, como esperado, foi observada a tendência de estabilização desses valores, conforme ilustrado na Figura 30, onde é mostrada a saturação da deformação das amostras. De acordo com a metodologia e sua limitação, foi observada uma pequena diminuição dos coeficientes comparando o terceiro aquecimento com o segundo. Após o primeiro ciclo, o valor obtido para os coeficientes  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  apresentou tendência à estabilização.

A Tabela 4 também mostra a relação entre a temperatura de transição, obtida pela seção de aquecimento dos testes, e o respectivo ciclo de aquecimento. Como as características dos materiais estudados são altamente dependentes do tempo e da temperatura, a mudança nos coeficientes de contração, enquanto em um aquecimento linear, ilustra uma temperatura de transição dos materiais. Essa transição pode ser associada à transição vítrea do monofilamento, quando o calor atinge todas as cadeias do material, não apenas sua superfície. Na temperatura de transição vítrea, as cadeias adjacentes do polímero adquirem movimento e, acima

dele, as propriedades termomecânicas dos polímeros sofrem uma grande mudança. O valor dessa temperatura de transição dos polímeros é influenciado pela natureza química das macromoléculas, a massa molecular, o grau de cristalinidade, presença ou ausência de plastificante, temperatura, umidade, orientação e outras propriedades (Choy *et al.*, 1981).

### **4.3 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE CARACTERIZAÇÃO DO MONOFILAMENTO DE POLIAMIDA NÃO ESPIRALADO**

A microestrutura do material polimérico e suas propriedades, como exemplo a rigidez, podem ser alteradas por tratamentos térmicos e mecânicos. Logo, faz-se necessário identificar a temperatura inicial de degradação e as temperaturas das transições térmicas do polímero, como temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ) e temperatura de cristalização ( $T_c$ ). Mais informações sobre os resultados das caracterizações do monofilamento precursor se encontram no Anexo B.

Os resultados da análise por DSC das amostras demonstram que o pico de fusão cristalina do monofilamento indicam a presença de dois tipos de cristais, referente a forma  $\gamma$  que funde a temperaturas menores ( $T_{m1}$ ), e outra referente a forma cristalina  $\alpha$  que funde a temperaturas maiores ( $T_{m2}$ ) (Liu *et al.*, 1999). Durante o resfriamento do polímero, foi observado um evento exotérmico referente à cristalização da poliamida. A temperatura de cristalização do material medida foi de 164°C. Outra informação importante extraída da curva de aquecimento é a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), para qual foi observada como sendo 47°C para o material. As amostras analisadas pelo método DSC foram processadas para atender aos pré-requisitos do teste. Este processo envolveu a fusão dos monofilamentos de poliamidas, a amostra foi derretida e sua geometria convertida para a utilizada na máquina, o que pode impactar nos valores de transição vítrea.

Nas análises termogravimétricas foi observado para as duas amostras uma perda de massa inicial de aproximadamente 4% referente a água absorvida pelo monofilamento. A presença de água na estrutura da poliamida pode atuar como plastificante, o que por sua vez pode alterar algumas propriedades do polímero (Aziz *et al.*, 2017). O valor da temperatura inicial de degradação para o polímero foi aproximadamente em 398°C.

A estrutura cristalina do monofilamento de poliamida foi investigada pelo DRX. O polímero foi identificado como sendo semicristalino. O material apresentou picos referentes as poliamida-6 e poliamida-66. O desconhecimento preciso do processo que gerou esses monofilamentos de poliamida, tais como temperatura e velocidade de com que os monofilamentos foram obtidos, e ainda que aditivos foram adicionados ao processo inviabilizam relacionar todos os planos cristalinos. O grau de cristalinidade das amostras foi calculado por deconvolução Gaussiana como sendo 60%.

#### 4.4 COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS ATUADORES POLIMÉRICOS ESPIRALADOS

Nesta seção os dados referentes aos testes envolvendo o MEP são analisados. Foram fabricados corpos de prova com três diferentes tensões de produção, 6 MPa, 9 MPa e 12 MPa, para tal análise. O comprimento inicial  $l_0$  das monofilamentos não foi variado, sendo selecionado como 50mm para melhor identificação do centro de inflexão da rotação do atuador (Mendes *et al.*, 2017).

Os valores das deformações axiais e radiais são mostrados nas Figuras 33 e 34. Foi observado pouca variação entre os ciclos de cada corpo de prova, comprovando assim a eficácia do tratamento e treinamento térmicos realizados antes dos corpos de prova serem testados. Assim, nas Figuras 33 e 34 são mostradas as médias de cada corpo de prova divididos em tensão de fabricação (6MPa, 9MPa e 12MPa) e porcentagem da deformação inicial imposta (10%, 15% e 20%).

Os valores de deformação axiais,  $\epsilon_x$ , apresentaram um aumento conforme a temperatura aumentou em todos os corpos de prova, este fato difere dos valores obtidos nos testes de expansão térmica (Seção 4.2.) devido ao fato que durante o aquecimento, os corpos de prova homocíclicos, sofrem um desenrolamento no arame de suas espiras em razão de suas propriedades térmicas e geométricas. Assim, segundo esperado, os valores de deformação radial,  $\epsilon_y$ , foram negativos, comprovando o desenrolamento com diminuição da seção transversal do arame da espira.

Na análise do comportamento dos MEPs ao serem submetidos a um aquecimento linear (seção 2.6.) um modelo foi gerado de acordo com os dados experimentais. Os valores de um modelo de comportamento da deformação,  $\epsilon(T)$ , de

acordo com os valores experimentais, com o auxílio de um programa de pós processamento, foram obtidos na forma da Equação (27):

$$\epsilon(T) = k * T^m \quad (27)$$

onde  $k$  é a constante de variação da deformação dos corpos de prova para essa velocidade de aquecimento e  $m$  é uma constante sem significado físico.

A curva obtida está representada de vermelho nas Figuras 33 e 34 e os coeficientes, que possuem uma correlação de aproximadamente 1, são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Figura 33 – Curva média de deformação axial,  $\epsilon_x$ , dos arames das espiras dos corpos de prova e Modelo ajustado

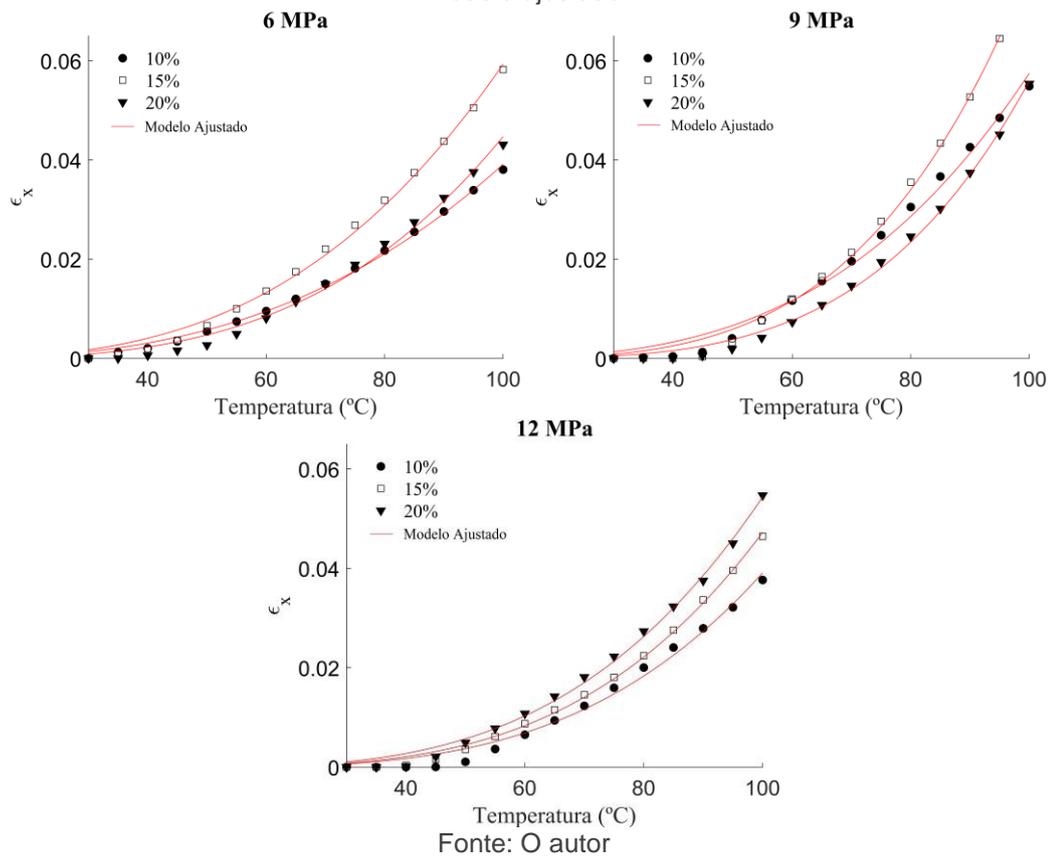


Figura 34 – Curva média de deformação radial,  $\epsilon_y$ , dos arames das espiras dos corpos de prova e Modelo ajustado

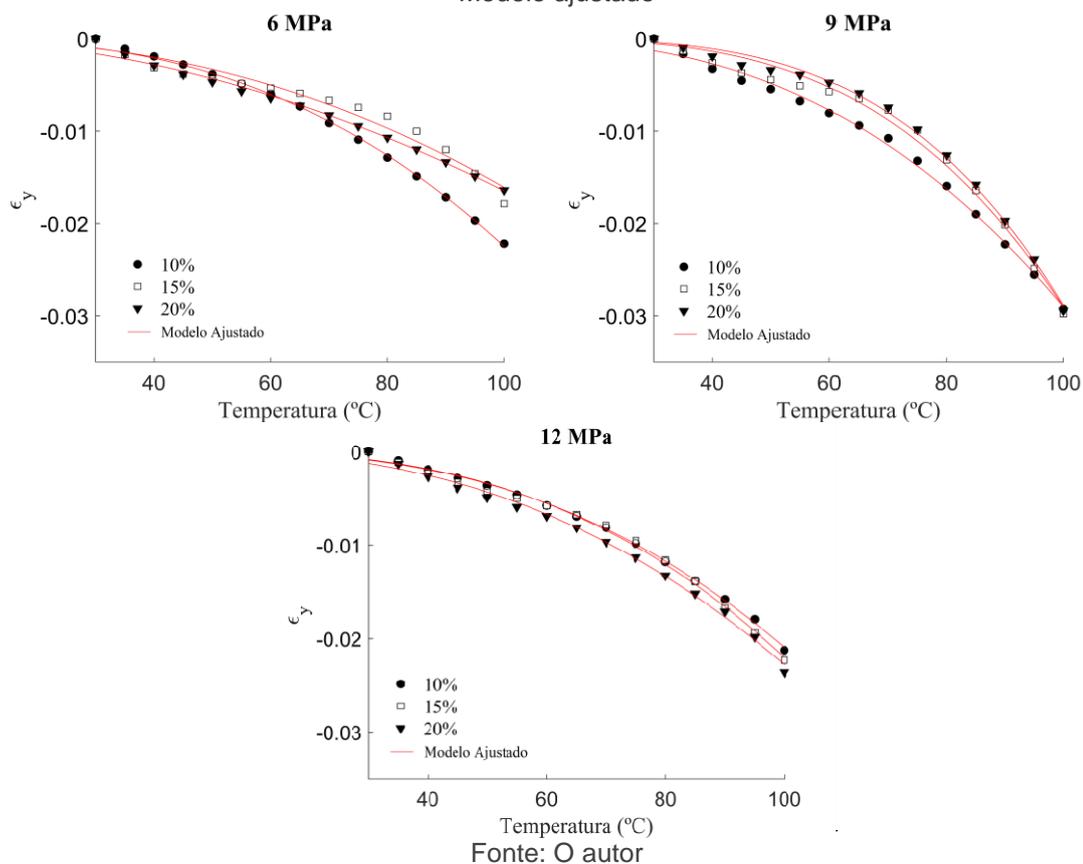


Tabela 5 – Tabela com coeficientes dos modelos para a deformação axial

Corpo de Prova	k	m
6 Mpa 10%	$1,12 \cdot 10^{-7}$	2,77
6 Mpa 15%	$0,81 \cdot 10^{-7}$	2,93
6 Mpa 20%	$0,14 \cdot 10^{-7}$	3,25
9 Mpa 10%	$3,27 \cdot 10^{-8}$	3,12
9 Mpa 15%	$0,24 \cdot 10^{-8}$	3,75
9 Mpa 20%	$0,09 \cdot 10^{-8}$	3,89
12 Mpa 10%	$6,37 \cdot 10^{-9}$	3,39
12 Mpa 15%	$7,62 \cdot 10^{-9}$	3,39
12 Mpa 20%	$1,68 \cdot 10^{-8}$	3,25

Fonte: O autor

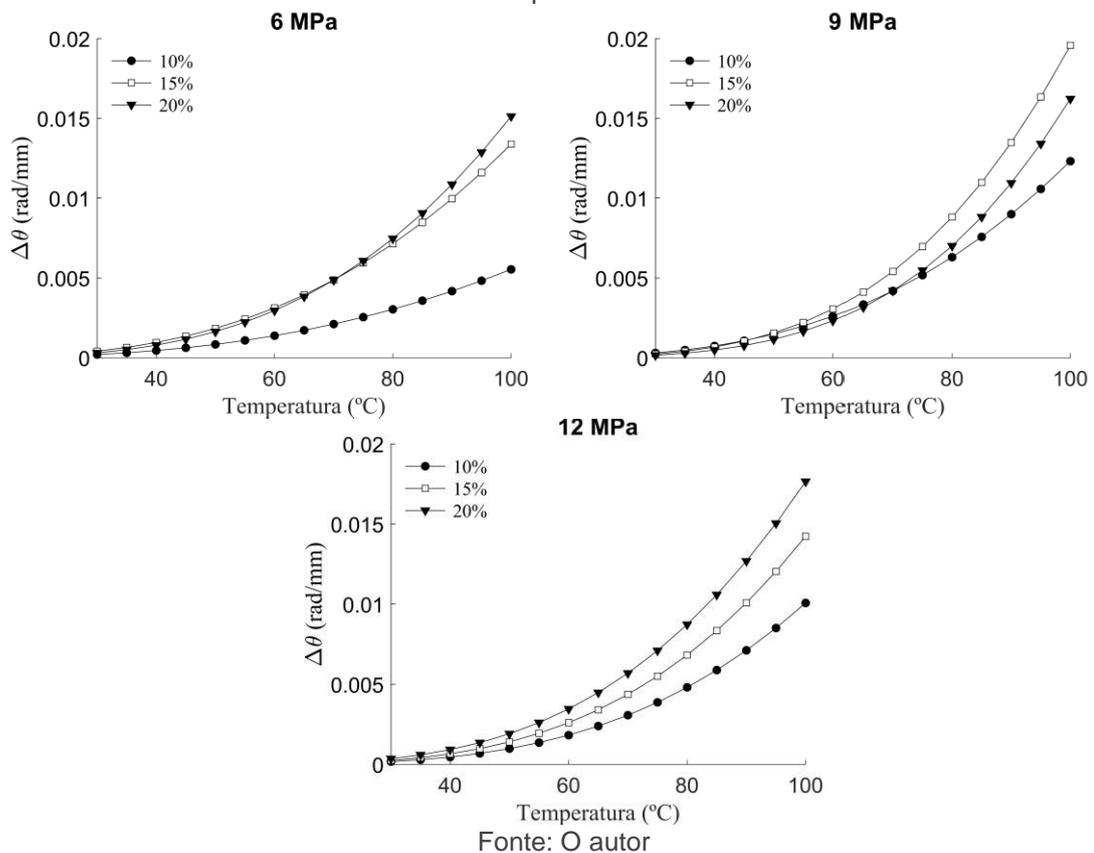
Tabela 6 – Tabela com coeficientes dos modelos para a deformação radial

Corpo de Prova	k	m
6 Mpa 10%	$-1,52 \cdot 10^{-7}$	2,59
6 Mpa 15%	$-4,22 \cdot 10^{-7}$	2,29
6 Mpa 20%	$-2,30 \cdot 10^{-7}$	1,93
9 Mpa 10%	$-1,92 \cdot 10^{-7}$	2,59
9 Mpa 15%	$-5,95 \cdot 10^{-9}$	3,34
9 Mpa 20%	$-1,90 \cdot 10^{-9}$	3,59
12 Mpa 10%	$-1,29 \cdot 10^{-7}$	2,60
12 Mpa 15%	$-8,92 \cdot 10^{-8}$	2,70
12 Mpa 20%	$-3,67 \cdot 10^{-7}$	2,40

Fonte: O autor

Os valores de desenrolamento do ângulo de torção por unidade de comprimento,  $\Delta\theta$ , foram calculados segundo as equações apresentadas no Capítulo 4, Equações (21), (22) e (23). Na Figura 35 os valores de  $\Delta\theta$  estão apresentados. Os valores não indicam grande variação em relação à tensão de fabricação, porém o desenrolamento dos corpos de prova de 9MPa obtive a maior média para as deformações de 10% e 15%. Em todas as tensões de fabricação, os corpos de prova com 20% de deformação obtiveram desenrolamento máximo aproximado de 0,015 rad/mm.

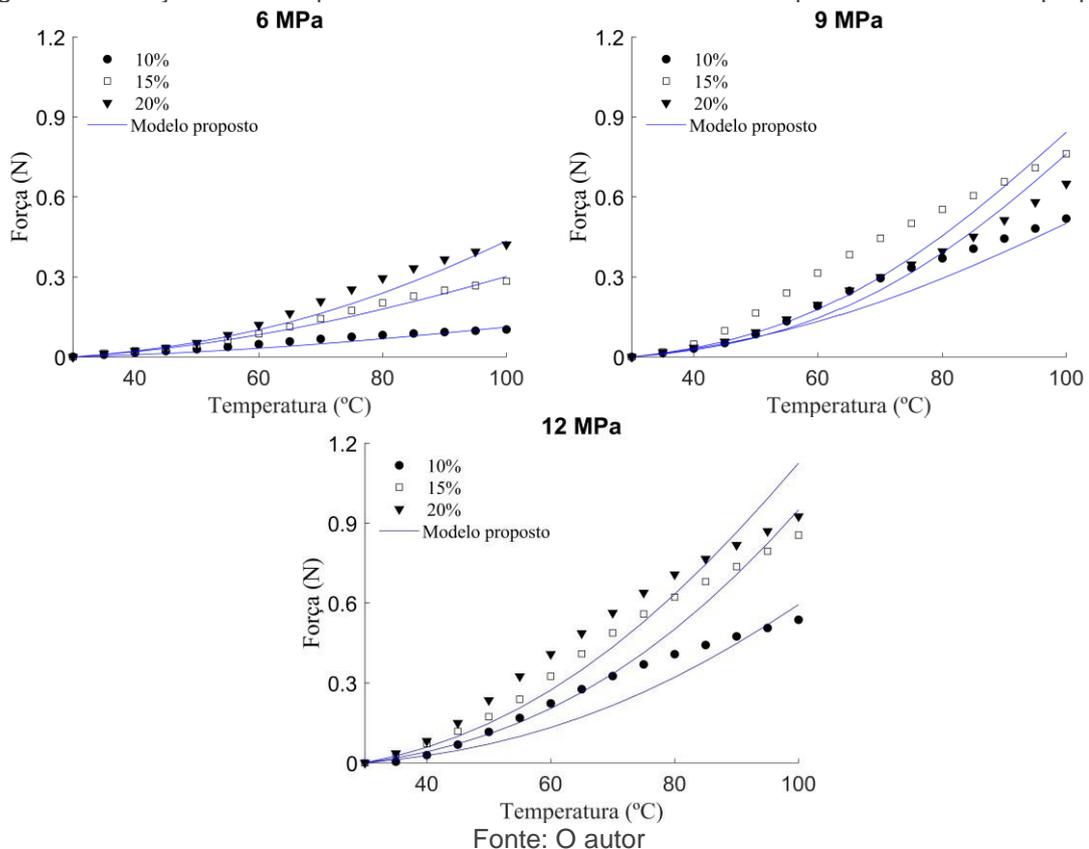
Figura 35 – Desenrolamento do ângulo de torção por unidade de comprimento,  $\Delta\theta$ , dos corpos de prova



Os valores da força foram calculados utilizando a Equação 19 e os valores de deformação axial e radial definidos pelos modelos das Tabela 5 e 6. Nas Figuras 36 podem ser observados os valores experimentais e os valores calculados pelo modelo. Cada valor experimental representa 27 espiras analisadas. Apesar da tendência de aumento da força com o aumento de temperatura ser comprovado há uma diferença entre os valores entre os valores experimentais da força e os valores calculados com a Equação (19).

A diferença entre os valores experimentais e os valores calculados pelo modelo se deve ao fato que nos testes de tração a temperatura se manteve constante e o monofilamento não estava espiralado (seção 4.1). Já nos testes com os MEPs a temperatura foi aumentada numa taxa constante até a temperatura de 100°C e os corpos de prova se encontravam na forma torcida e espiralada. Essa variação é fundamentada com o fato que o valor do módulo de elasticidade de polímeros, principalmente, precisa levar em conta o fator geométrico do material e a condição de aquecimento. Além disso, para o cálculo do módulo de elasticidade na seção 4.1. foram analisadas as variações para pequenas deformações. Durante a produção dos MEPs são induzidas grandes deformações para transformar o monofilamento não espiralado nos corpos de prova dos MEPs. Devido às diferenças na fabricação, podemos observar comportamentos diferentes para os valores do módulo de elasticidade dos MEPs fabricados com 6MPa, 9MPa e 12MPa.

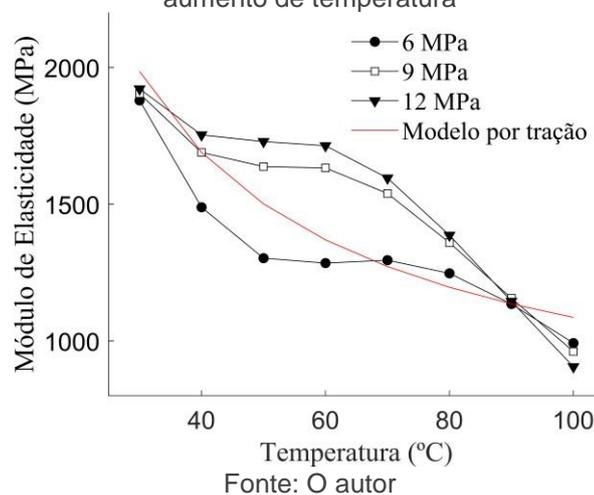
Figura 36 – Força medida experimentalmente com o aumento da temperatura e o modelo proposto



Na Figura 37 podemos observar as diferenças dos módulos de elasticidade calculados a partir dos dados experimentais dos MEPs utilizando os valores medidos para a força e o modelo proposto do módulo de elasticidade a partir dos ensaios de

tração no monofilamento de poliamida sem torção ou enrolamento (Seção 4.1). Cada valor experimental calculado representa o valor médio de 81 de espiras. Os valores para as espiras fabricadas com 12MPa possuem um decaimento menos acentuado devido a característica dos corpos de prova possuírem maior torção do monofilamento e assim apresentarem menor mobilidade das cadeias de poliamida. Podemos observar um decaimento menos pronunciado dos módulos de elasticidade nos MEPS, em relação aos ensaios isotérmicos, e um aumento no declínio do valor analisado após a temperatura de transição vítrea do material (~47°C).

Figura 37 – Modelo proposto a partir dos ensaios de tração isotérmica proposto na Seção 4.1. (Equação (26)) e valores experimentais para o valor do módulo de elasticidade do MEP em relação ao aumento de temperatura



## CAPÍTULO 05

### CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal a investigação de uma nova categoria de atuadores termomecânicos fabricados de monofilamentos de poliamida (MEP) com 0,8mm de diâmetro. O trabalho se dividiu em quatro partes, a primeira sendo a avaliação do módulo de elasticidade do monofilamento de poliamida durante testes isotérmicos. A segunda, a proposta de uma nova metodologia de medição para a avaliação do coeficiente de expansão térmica para monofilamentos de poliamida. A terceira consistiu na validação de características do material por meio dos métodos convencionais de DSC, TGA, Difração de raios X e FTIR. Com esse estudo do material foram realizados posteriormente os testes com os MEPs para avaliação de seu comportamento e proposição de um modelo fenomenológico associando o atuador às molas helicoidais de grande índice.

O primeiro objetivo da caracterização foi avaliar as propriedades de tração dos monofilamentos de poliamida durante testes isotérmicos. Os dados obtidos para os testes de tração isotérmica e o módulo de Young para as amostras são inferiores aos valores apresentados pela literatura. Este fato se deve a presença de outros compostos não especificados pelo fabricante. O valor obtido para as monofilamentos à 30°C foi de  $(2,14 \pm 0,03)$  GPa. Observou-se uma diminuição no módulo de elasticidade com o aumento da temperatura de 23,6% a 50°C, 42,81% a 70°C e 52,09% a 100°C.

Na segunda fase da caracterização, uma nova metodologia foi proposta e utilizada para analisar o comportamento termomecânico de dois tipos diferentes de monofilamentos de poliamida submetidos a três condições diferentes. Os dados obtidos foram consistentes com as previsões de comportamento térmico dos monofilamentos de poliamida. Os primeiros testes sublinharam a tendência de estabilização da contração térmica neste material. Os seguintes testes ilustraram como as propriedades da temperatura mudam com um aquecimento linear, diferentes taxas de aquecimento e diferentes temperaturas máximas. Portanto, todos os experimentos enfatizam a saturação térmica do monofilamento após vários ciclos de aquecimento.

Na terceira etapa foram utilizados métodos convencionais de caracterização do material utilizado através dos testes de Análise termogravimétrica (TGA), Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), Difração de raios X e FTIR. Nestes testes, foram obtidos os perfis de degradação das amostras, as temperaturas de transições do material ( $T_g$ ,  $T_m$  e  $T_c$ ), cristalinidade e a análise das estruturas dos materiais, que foram fundamentais na compreensão da expansão térmica e outras propriedades termomecânicas.

Nos testes da quarta e última etapa, os MEPs foram fabricados com três diferentes tensões nominais, 6MPa, 9MPa e 12MPa. Os campos de deslocamento dos corpos foram obtidos através do método DIC e foram utilizados para fornecer os desenrolamentos das espiras ( $\Delta\theta$ ) e a variação do ângulo ( $\beta$ ) das mesmas em relação ao aumento linear da temperatura com sucesso. Os valores encontrados para a força com o modelo proposto e os valores experimentais da força apresentaram boa concordância. Entretanto foi analisado que o perfil do módulo de elasticidade gerado a partir dos ensaios tração isotérmica no monofilamento não espiralado (Seção 4.1) possui comportamento diferente do encontrado para o módulo de elasticidade dos MEPs. Os ensaios com os MEPs foram realizados com o aquecimento constante até 100°C. Assim, a diferença entre o modelo proposto e os dados experimentais pode ser explicada pelas diferenças no aquecimento e no formato do corpo de prova testado.

## REFERÊNCIAS

- Aziz, S., Naficy, S., Foroughi, J., Brown, H. R., & Spinks, G. M. (2015). Characterisation of torsional actuation in highly twisted yarns and fibres. *Polymer testing*, 46, 88-97.
- Aziz, S., Naficy, S., Foroughi, J., Brown, H. R., & Spinks, G. M. (2017). Thermomechanical effects in the torsional actuation of twisted nylon 6 fiber. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(47), 45529.
- Aziz, S., Naficy, S., Foroughi, J., Brown, H. R., & Spinks, G. M. (2016). Controlled and scalable torsional actuation of twisted nylon 6 fiber. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 54(13), 1278-1286.
- Baughman, R. H. (1996). Conducting polymer artificial muscles. *Synthetic metals*, 78(3), 339-353.
- Bing, P., Hui-min, X., Tao, H., & Asundi, A. (2009). Measurement of coefficient of thermal expansion of films using digital image correlation method. *Polymer Testing*, 28(1), 75- 83.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction* (Vol. 9). New York: Wiley.
- Canevarolo Jr, S. V. (2002). *Ciência dos polímeros*. Artiliber editora, São Paulo, 110-115.
- Chen, S., Cao, Y., Sarparast, M., Yuan, H., Dong, L., Tan, X., & Cao, C. (2020). Soft crawling robots: design, actuation, and locomotion. *Advanced Materials Technologies*, 5(2), 1900837.
- Cherubini, A., Moretti, G., Vertechy, R., & Fontana, M. (2015). Experimental characterization of thermally-activated artificial muscles based on coiled nylon fishing lines. *Aip Advances*, 5(6), 067158.
- Cho, K. H., Song, M. G., Jung, H., Park, J., Moon, H., Koo, J. C., ... & Choi, H. R. (2016, April). A Robotic Finger Driven by Twisted and Coiled Polymer Actuator. In *Spie Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* (Pp. 97981j-97981j). International Society for Optics and Photonics.
- Cho, K. H., Kim, Y., Yang, S. Y., Kim, K., Park, J. H., Rodrigue, H., ... & Choi, H. R. (2019). Artificial musculoskeletal actuation module driven by twisted and coiled soft actuators. *Smart Materials and Structures*, 28(12), 125010.
- Chou, C. P., & Hannaford, B. (1996). Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 12(1), 90-102.
- Choy, C. L., Chen, F. C., & Young, K. (1981). Negative thermal expansion in oriented crystalline polymers. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 19(2), 335- 352.
- Choy, C. L., Leung, W. P., & Ong, E. L. (1985). Thermal expansivity of oriented nylon-6 and nylon-6, 6. *Polymer*, 26(6), 884-888.
- Daerden, F., & Lefeber, D. (2002). Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation. *European journal of mechanical and environmental engineering*, 47(1), 11- 21.
- De Strycker, M., Schueremans, L., Van Paepegem, W., & Debruyne, D. (2010). Measuring the thermal expansion coefficient of tubular steel specimens with digital image correlation techniques. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(10), 978-986.

Deopura, B. L., Alagirusamy, R., Joshi, M., & Gupta, B. (Eds.). (2008). Polyesters and polyamides. Elsevier.

Fan, J., & Li, G. (2017). High performance and tunable artificial muscle based on two-way shape memory polymer. *RSC advances*, 7(2), 1127-1136.

Fornes, T. D., & Paul, D. R. (2003). Crystallization Behavior of Nylon 6 Nanocomposites. *Polymer*, 44(14), 3945-3961.

Haines, C. S., Lima, M. D., Li, N., Spinks, G. M., Foroughi, J., Madden, J. D., ... & Baughman, R. H. (2014). Artificial muscles from fishing line and sewing thread. *science*, 343(6173), 868-872.

Hayashi, R., Masuya, K., Takagi, K., Irisawa, T., Fujino, R., Yamauchi, T., ... & Tahara, K. (2019). Rotational angle trajectory tracking of a twisted polymeric fiber actuator by the combination of a model-based feed-forward and estimated temperature feedback. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3), 2561-2567.

Hearle, J. W., & Morton, W. E. (2008). Physical properties of textile fibres. Elsevier.

Herrera, M., Matuschek, G., & Kettrup, A. (2001). Main products and kinetics of the thermal degradation of polyamides. *Chemosphere*, 42(5-7), 601-607.

Huang, Y. W., Lee, W. S., Chuang, Y. F., Cao, W., Yang, F., & Lee, S. (2019). Time-dependent deformation of artificial muscles based on Nylon 6. *Materials Science and Engineering: C*, 98, 445-451.

Kim, J. H., Jang, K. L., Ahn, K., Yoon, T., Lee, T. I., & Kim, T. S. (2019). Thermal expansion behavior of thin films expanding freely on water surface. *Scientific reports*, 9(1), 1-7.

Kagan, V. A., & Jia, N. (2000). Tensile Properties of Semi-Crystalline Thermoplastics-Performance Comparison under Alternative Testing Standard (No. 2000-01-1319). SAE Technical Paper.

Karami, F., & Tadesse, Y. (2017). "Modeling of Twisted and Coiled Polymer (Tcp) Muscle Based on Phenomenological Approach". *Smart Materials and Structures*, 26(12), 125010.

Kianzad, S., Pandit, M., Bahi, A., Ravandi, A. R., Ko, F., Spinks, G. M., & Madden, J. D. (2015, April). Nylon Coil Actuator Operating Temperature Range and Stiffness. In *Spie Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* (Pp. 94301x-94301x). International Society for Optics and Photonics.

Kim, J. H., Jang, K. L., Ahn, K., Yoon, T., Lee, T. I., & Kim, T. S. (2019). Thermal Expansion Behavior of Thin Films Expanding Freely on Water Surface. *Scientific Reports*, 9.

Kim, S. H., Lima, M. D., Kozlov, M. E., Haines, C. S., Spinks, G. M., Aziz, S., ... & Qian, D. (2015). Harvesting Temperature Fluctuations as Electrical Energy Using Torsional and Tensile Polymer Muscles. *Energy & Environmental Science*, 8(11), 3336-3344.

Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in biotechnology*, 31(5), 287-294.

Kobayashi, Y., & Keller, A. (1970). The temperature coefficient of the c lattice parameter of polyethylene; an example of thermal shrinkage along the chain direction. *Polymer*, 11(2), 114-117.

Lamuta, C., Messelot, S., & Tawfick, S. (2018). Theory of the tensile actuation of fiber reinforced coiled muscles. *Smart Materials and Structures*, 27(5), 055018..

Leng, J., Lan, X., Liu, Y., & Du, S. (2011). Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications. *Progress in Materials Science*, 56(7), 1077-1135.

Lewin, M. (2006). *Handbook of fiber chemistry*. Crc press.

Lima, M. D., Li, N., De Andrade, M. J., Fang, S., Oh, J., Spinks, G. M., ... & Kim, S. J. (2012). Electrically, Chemically, And Photonically Powered Torsional and Tensile Actuation of Hybrid Carbon Nanotube Yarn Muscles. *Science*,338(6109), 928-932

Liu, L., Qi, Z., & Zhu, X. (1999). Studies on nylon 6/clay nanocomposites by melt-intercalation process. *Journal of Applied Polymer Science*, 71(7), 1133-1138.

Liu, Z., Gao, Q., Chen, J., Deng, J., Lin, K., & Xing, X. (2018). Negative thermal expansion in molecular materials. *Chemical Communications*, 54(41), 5164-5176.

Love, A. E. H. (2013). *A treatise on the mathematical theory of elasticity*. Cambridge university press.

Mark, H. F. (2014). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Concise*. John Wiley & Sons.

Masuya, K., Ono, S., Takagi, K., & Tahara, K. (2017). Modeling framework for macroscopic dynamics of twisted and coiled polymer actuator driven by joule heating focusing on energy and convective heat transfer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 267, 443-454.

McIntyre, J. E. (Ed.). (2005). *Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin*. Taylor & Francis US.

Men, Y., Rieger, J., & Homeyer, J. (2004). Synchrotron ultrasmall-angle X-ray scattering studies on tensile deformation of poly (1-butene). *Macromolecules*, 37(25), 9481-9488.

Mendes, S. S., & Nunes, L. C. S. (2017). Experimental approach to investigate the constrained recovery behavior of coiled monofilament polymer fibers. *Smart Materials and Structures*, 26(11), 115031.

Mendes, S. S.; Melo, A. R. A.; Moreira, C. S.; L. C. S. Nunes, "Investigação Do Comportamento Térmico De Monofilamentos De Poliamida Usando Correlação De Imagens", Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2018, Salvador. Anais Do Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, 2018. V.X.

Mirvakili, S. M., Ravandi, A. R., Hunter, I. W., Haines, C. S., Li, N., Foroughi, J., ... & Madden, J. D. (2014, March). Simple and Strong: Twisted Silver Painted Nylon Artificial Muscle Actuated by Joule Heating. In *Spie Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* (Pp. 90560i-90560i). International Society for Optics and Photonics

Moretti, G., Cherubini, A., Vertechy, R., & Fontana, M. (2015, April). Experimental Characterization of a New Class of Polymeric-Wire Coiled Transducers. In *Spie Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* (Pp. 94320p-94320p). International Society for Optics and Photonics.

Muniandy, K. (2019). Digital image correlation for strain measurement in plastic film blowing process. *Materials Science and Technology*, 35(9), 1016-1027.

Murín, J., Minár, M., Melek, P., Goga, V., Kutiš, V., & Paulech, J. (2019, July). Non-linear thermoelastic analysis of the nylon actuator. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2131, No. 1, p. 020030). AIP Publishing LLC.

Ohm, C., Brehmer, M., & Zentel, R. (2010). Liquid crystalline elastomers as actuators and sensors. *Advanced materials*, 22(31), 3366-3387.

Pan, C. H. (2002). A simple method for determining linear thermal expansion coefficients of thin films. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12(5), 548.

Peeters, A., Van Alsenoy, C., Bartha, F., Bogar, F., Zhang, M. L., & Van Doren, V. E. (2002). Ab initio calculation of the Young's modulus of  $\alpha$ -polyamides. *International journal of quantum chemistry*, 87(5), 303-310.

Pelrine, R., Kornbluh, R. D., Pei, Q., Stanford, S., Oh, S., Eckerle, J., ... & Meijer, K. (2002, July). Dielectric elastomer artificial muscle actuators: toward biomimetic motion. In *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive polymer actuators and devices (EAPAD)* (Vol. 4695, pp. 126-137). International Society for Optics and Photonics.

Peraro, J. S. (2000, January). Limitations of Test Methods for Plastics. ASTM.

Reimschuessel, H. K. (1977). Nylon 6. Chemistry and mechanisms. *Journal of Polymer Science: Macromolecular Reviews*, 12(1), 65-139.

Schreier, H., Orteu, J. J., & Sutton, M. A. (2009). Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Springer US.

Shafer, M. W., Feigenbaum, H. P., Pugh, D., & Fisher, M. (2016, September). First steps in modeling thermal actuation of twisted polymer actuators using virgin material properties. In *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* (Vol. 50497, p. V002T06A017). American Society of Mechanical Engineers.

Shanak, H., Ehses, K. H., Götz, W., Leibenguth, P., & Pelster, R. (2009). X-ray diffraction investigations of  $\alpha$ -polyamide 6 films: orientation and structural changes upon uni-and biaxial drawing. *Journal of materials science*, 44(2), 655-663.

Sharafi, S. (2015). Multiscale Modeling of Smart Materials under Static and Dynamic Thermo-mechanical Loading.

Swartz, A. M., Ruiz, D. R. H., Feigenbaum, H. P., Shafer, M. W., & Browder, C. (2018). Experimental characterization and model predictions for twisted polymer actuators in free torsion. *Smart Materials and Structures*, 27(11), 114002.

Tahara, K., Hayashi, R., Masuya, K., Takagi, K., Irisawa, T., Yamauchi, T., & Tanaka, E. (2019). Rotational angle control of a twisted polymeric fiber actuator by an estimated temperature feedback. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3), 2447-2454.

Velez, M., & Gong, Y. (2019). Measuring the coefficient of thermal expansion of free-standing enamel films. *International Journal of Applied Glass Science*, 10(1), 3-6.

Wahl, A. M. (1944). Mechanical springs. Penton Publishing Company.

Wang, Y. G., & Tong, W. (2013). A High Resolution Dic Technique for Measuring Small Thermal Expansion of Film Specimens. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(1), 30- 33.

Wasilkoski, C. M. (2006). Comportamento mecânico dos materiais poliméricos.

Wu, L., de Andrade, M. J., Rome, R. S., Haines, C., Lima, M. D., Baughman, R. H., & Tadesse, Y. (2015, April). Nylon-muscle-actuated robotic finger. In *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2015* (Vol. 9431, p. 94310I). International Society for Optics and Photonics.

Wypych, G. (2016). *Handbook of polymers*. Elsevier.

Yang, Q., & Li, G. (2016). A top-down multi-scale modeling for actuation response of polymeric artificial muscles. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 92, 237- 259.

Yang, Q., & Li, G. (2016). Temperature and rate dependent thermomechanical modeling of shape memory polymers with physics-based phase evolution law. *International Journal of Plasticity*, 80, 168-186.

Yip, M. C., & Niemeyer, G. (2015, May). High-performance robotic muscles from conductive nylon sewing thread. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 2313-2318). IEEE.

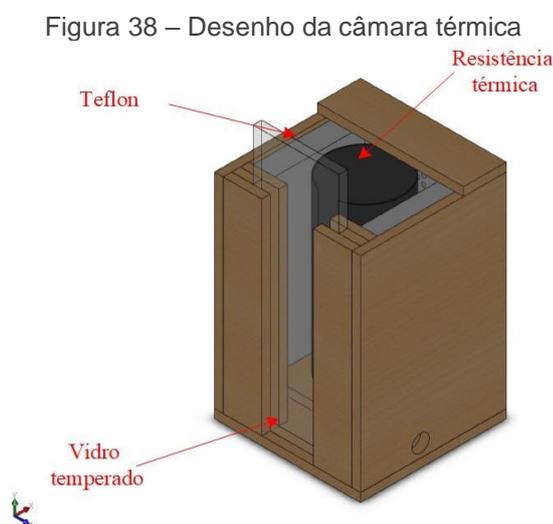
Zheng, J., Siegel, R. W., & Toney, C. G. (2003). Polymer Crystalline Structure and Morphology Changes in Nylon-6/Zno Nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 41(10), 1033-1050.

## ANEXO A

### A1- CÂMARA TÉRMICA

Para a realização dos testes com temperatura controlada, foi fabricado em laboratório um aparato que permitiu o desenvolvimento de todos os testes presentes nesta tese. A câmara térmica de testes, exemplificada na Figura 38, foi fabricada de madeira balsa e revestida internamente de teflon para preservar a madeira em relação ao contato direto com a resistência térmica durante os testes. A resistência foi posicionada em formato cilíndrico para que os corpos de prova fossem aquecidos de forma linear e controlada. A parte frontal, conforme já mencionado, foi fabricada com vidro temperado móvel, possibilitando, assim, a utilização do método de Correlação de Imagens Digital.

Os termopares foram mantidos móveis para poderem ser adequados conforme o tamanho do corpo de prova e sua disposição. Durante os testes estes foram posicionados de forma a mensurar a temperatura média do ar próximo ao corpo de prova avaliado.



Fonte: Os autores

### A2- CONTROLE DE TEMPERATURA

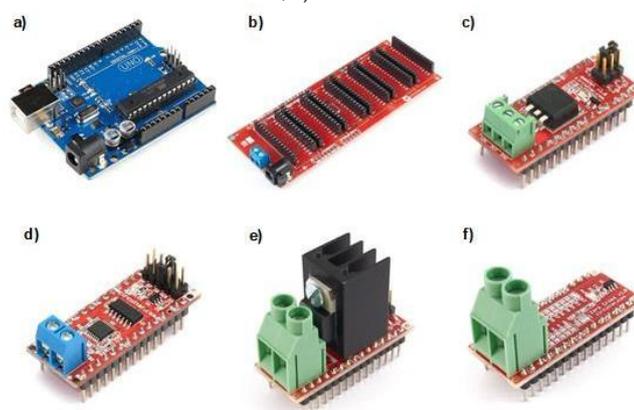
Para a plataforma de prototipagem foi utilizado a placa Arduino UNO (Figura 39(a)). Devido a necessidade de mais espaço de acoplamento dos nanoshields, a placa foi ligada a uma Base Board L (Figura 39(b)). A Base Board L funciona como a

placa mãe do sistema Nanoshields e permite a montagem de até 6 módulos de uma maneira simples e prática, além de permitir o uso de qualquer Nanoshield juntamente com o Arduino UNO. Com a Base Board L, todas as conexões lógicas e de alimentação são implementadas internamente, não sendo necessário o uso de fios, jumpers ou protoboard para a construção dos seus projetos (Circuitar).

Já os Nanoshields utilizados são um sistema de eletrônica modular, os utilizados neste projeto foram adquiridos pela loja online Circuitar. A utilização de nanoshields traz a vantagem de eliminar o excesso de fios no projeto e minimizar tarefas como solda e fixação de componentes. Foram selecionados dois nanoshields termopar para a conexão dos termopares (Figura 39(c)), um nanoshield Mosfet (Figura 39(d)) para o controle dos equipamentos de corrente contínua e um nanoshield Triac (Figura 39(e)) e Zero cross (Figura 39 (f)) para o fornecimento de energia para a resistência utilizada.

No projeto, os termopares funcionaram como base de controle, a cada leitura da temperatura da câmara feita pelos termopares, o programa feito avaliava a necessidade de maior temperatura ou o início do resfriamento. O funcionamento do fornecimento de energia da resistência, coolers e peltiers foi baseado no funcionamento de um Dimmer, onde taxas progressivas ou regressivas de energia eram fornecidas aos equipamentos. O valor e taxa de cada componente foi avaliado de acordo com o teste a ser realizado na câmara térmica, possuindo assim, um código adaptável desenvolvido para qualquer necessidade.

Figura 39 – a) Arduino Uno, b) Base Board L, c) Nanoshield Termopar, d) Nanoshield Mosfet, e) Nanoshield Triac e, f) Nanoshield Zero Cross.

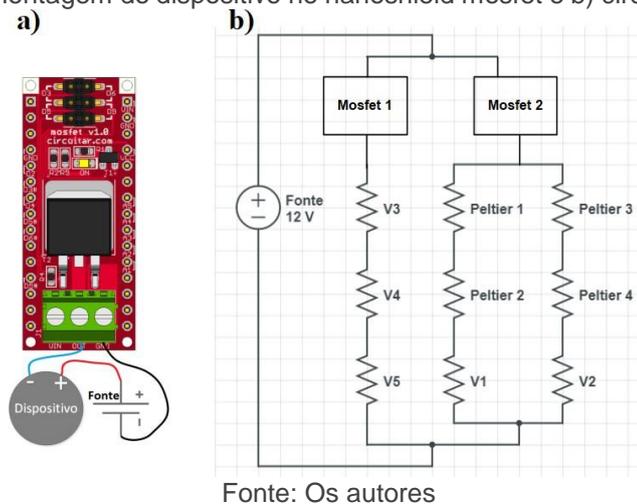


Fonte: Os autores

### A3- CIRCUITOS

O circuito utilizado para o aparato de resfriamento pode ser observado na Figura 40. Na Figura 40(a) é ilustrado como o nanoshield mosfet foi acoplado ao dispositivo. Na Figura 40(b) pode-se observar o circuito completo do sistema de resfriamento com o esquema de como ele foi ligado a placa Arduino.

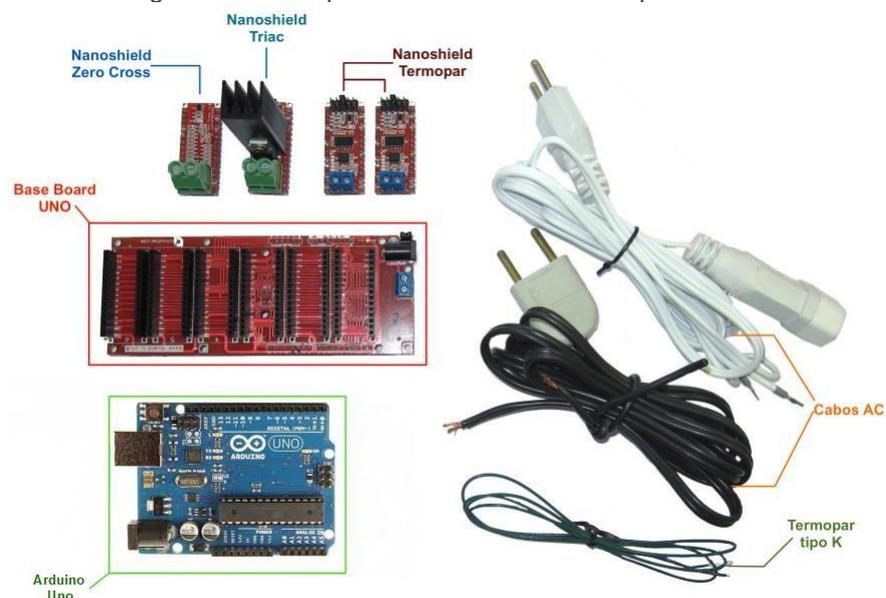
Figura 40 – a) Montagem do dispositivo no nanoshield mosfet e b) circuito do dispositivo



Fonte: Os autores

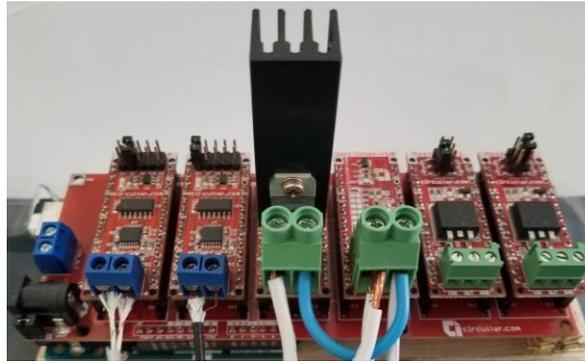
Os componentes utilizados na parte do aquecimento podem ser observados na Figura 41. Na Figura 42 pode-se observar todos os componentes, tanto da parte do resfriamento, tanto do aquecimento, acoplados na placa Arduino utilizada.

Figura 41 – Componentes do sistema de aquecimento.



Fonte: Os autores

Figura 42 – Placa Arduino utilizada com todos os nanoshields acoplados.



Fonte: Os autores

## A4- ANÁLISE DO AQUECIMENTO

Durante o desenvolvimento do aparato térmico diversos testes foram realizados para calibração da câmara e o desenvolvimento de um código que permitiria um aquecimento linear. No aparato, a resistência térmica é responsável pelo aquecimento e, conforme já mencionado, a medição dos termopares regula o aquecimento de acordo com a taxa de aquecimento desejada. A resistência é acoplada ao aparato em formato de “U”, conforme Figura 43. Esta disposição permite um aquecimento horizontal uniforme no centro, onde o corpo de prova é acoplado.

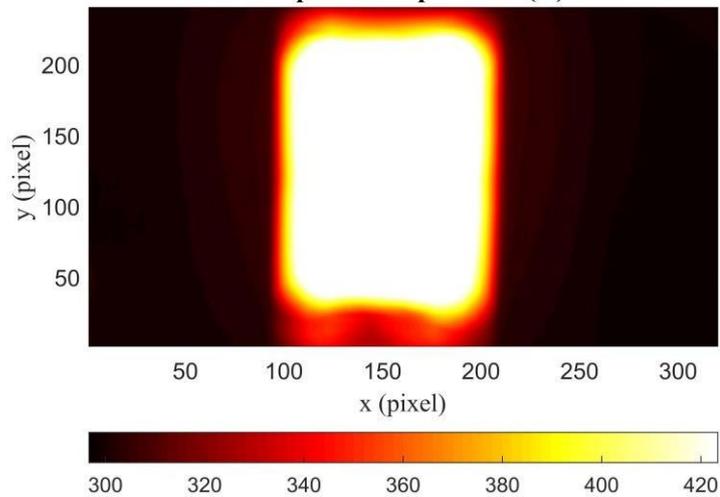
Foi utilizada uma câmera térmica para medir a distribuição de temperatura da superfície da resistência e do ar dentro da câmara térmica. A câmera térmica utilizada para a medição dos campos de temperatura foi o modelo A325G da Flir com uma lente 1196725, com distância focal de 9.7 mm, junto com o programa Flir Thermacam Researcher 2.9 Pro para aquisição dos dados. Algumas especificações da câmera utilizada são encontradas na Tabela 7. Na Figura 43 pode ser observado o campo de temperatura da superfície da resistência quando a região do corpo de prova se encontrava a 100°C de acordo com a medição dos termopares. Neste caso a superfície se encontra em temperatura superior a medida na região do corpo (420K).

Tabela 7 – Especificações da câmera térmica Flir A 325G

<b>Campo de visão / distância mínima ao objeto (Built in)</b>	25° x 18.8° / 0.4m
<b>Campo de visão/ distância mínima ao objeto (com a lente)</b>	45° x 33.8° / 0.2m
<b>Tipo de detector</b>	Microbolômetro
<b>Faixa espectral</b>	7.5-13µm
<b>Resolução</b>	320 x 240 pixels
<b>Faixa de medição de temperaturas</b>	0-350°C
<b>Sensibilidade</b>	<0.07°C à 30°C
<b>Precisão (em % da leitura)</b>	±2°C ou ±2%
<b>Frequência máxima de captura de imagens</b>	9Hz

Fonte: Os autores

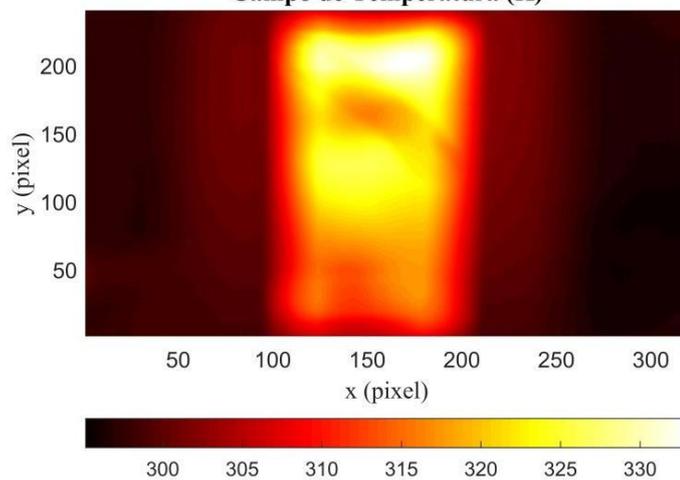
Figura 43 – Distribuição de temperatura na superfície da resistência  
**Campo de Temperatura (K)**



Fonte: Os autores

Já a Figura 44 ilustra o campo de distribuição de temperatura da superfície ao redor da resistência térmica. Devido à disposição em U e vertical da resistência, o campo de temperaturas em que os corpos de prova foram submetidos varia verticalmente conforme pode ser observado na Figura 45. Neste caso, os termopares estavam em contato com a superfície da resistência, ou seja, a superfície se encontrava a 100°C, porém a região de acoplamento estava a uma temperatura inferior. Esta análise possibilitou a melhor disposição dos termopares em relação às amostras analisadas. Conforme já mencionado, nos testes, os termopares aferiram os valores de temperatura na região onde o corpo de prova se encontrava, medindo assim, um valor médio de temperatura, não considerando o valor de temperatura na superfície da resistência térmica.

Figura 44 – Distribuição de temperatura do ar ao redor da resistência  
**Campo de Temperatura (K)**



Fonte: Os autores

## ANEXO B

### 1. DSC

As curvas de calorimetria estão apresentadas na Figuras 45 e 46. A curva de aquecimento exibida é referente à segunda corrida de aquecimento, eliminando assim a história térmica do material. A microestrutura do material polimérico e suas propriedades, como exemplo a rigidez, podem ser alteradas por tratamentos térmicos e mecânicos. Logo, faz-se necessário identificar a temperatura inicial de degradação e as temperaturas das transições térmicas do polímero, como temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ) e temperatura de cristalização ( $T_c$ ).

Na curva de aquecimento foi observado a temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ) e o calor de fusão ( $\Delta H_f$ ) para os dois polímeros. O pico de fusão cristalina da poliamida indica a presença de dois tipos de cristais, referente a forma  $\gamma$  que funde a temperaturas menores ( $T_{m1}$ ), e outra referente a forma cristalina  $\alpha$  que funde a temperaturas maiores ( $T_{m2}$ ).

Outra informação importante extraída da curva de aquecimento é a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), sendo 48°C. A partir dessa temperatura as cadeias de polímero adquirem mobilidade e tempo para responder às solicitações mecânicas; o oposto ocorre a temperaturas menores, onde os polímeros estão no estado vítreo, sem mobilidade (Canevarolo, 2006).

Este resultado para a transição vítrea da amostra está próximo dos valores de temperatura de transição ( $T_t$ ) medidos com a metodologia proposta na seção (2.4). A diferença entre eles se deve à forma e à quantidade de água das amostras testadas. As amostras analisadas pelo método DSC foram processadas para atender aos pré-requisitos do teste. Este processo envolveu a fusão dos monofilamentos de poliamidas. Além disso, como essas amostras foram analisadas em diferentes telas, a quantidade de água absorvida foi diferente em cada análise. E, como afirmado anteriormente, quanto maior a quantidade de água nas poliamidas, menores os valores de transição vítrea da amostra (Wypych, 2016; Choy *et al.*, 1985; Choy *et al.*, 1981; Reimschuessel, *et al.*, 1977).

Durante o resfriamento do polímero, é observado um evento exotérmico referente à cristalização da poliamida. A poliamida cristaliza em 164°C. Esse valor implica no tratamento dado ao monofilamento durante a torsão. Principalmente

quando se deseja minimizar o efeito de recuperação elástica ou ainda favorecer as propriedades mecânicas submetendo a poliamida a um recozimento, aquecendo-o a uma temperatura acima da temperatura de Tg e abaixo da Tm.

A Figura 45 refere-se à segunda curva de aquecimento das amostras, o que fornece características do polímero, desconsiderando sua história térmica. Os perfis dos picos de fusão cristalina são distintos, o que influencia nas propriedades físicas e mecânicas dos polímeros, posto que o grau de cristalinidade acentua propriedades como rigidez, estabilidade dimensional, temperatura de fusão e temperatura de transição vítrea. Em contrapartida, diminuem propriedades como resistência ao impacto e alongação na ruptura. A poliamida devido a sua estrutura química apresenta fortes interações intermoleculares, ligação hidrogênio, que são mais intensas na região cristalina, na qual as cadeias poliméricas estão mais organizadas (Fornes, 2003; Canevarolo, 2002).

Figura 45 – Curvas de DSC dos corpos de prova de poliamida.

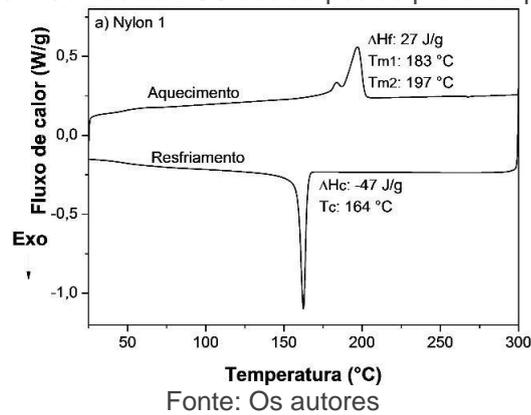
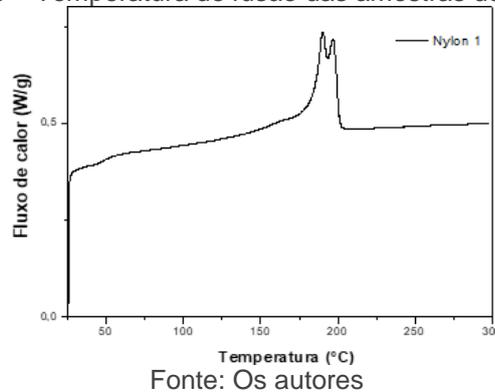


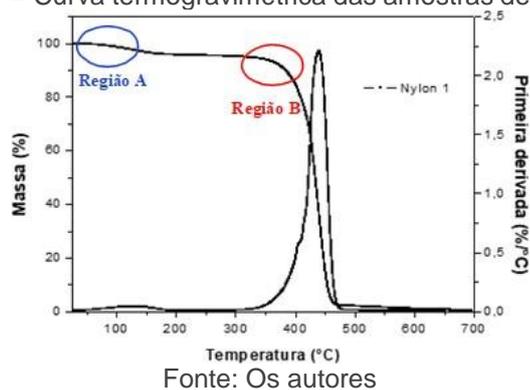
Figura 46 – Temperatura de fusão das amostras de poliamida



## 2. TGA

A Figura 48 mostra o perfil de degradação para a poliamida. É observado para as duas amostras uma perda de massa inicial (Região A) de aproximadamente 4% referente a água absorvida pela poliamida. A presença de água na estrutura da poliamida pode atuar como plastificante, o que por sua vez pode alterar algumas propriedades do polímero (Aziz *et al.*, 2017). Os valores da temperatura inicial de degradação ( $T_{\text{onset}}$ , Região B) é de aproximadamente em 398°C, conforme indicado na Figura 47. A temperatura de transição vítrea está destacada em azul na Figura 47. Nessa faixa de temperatura, as cadeias poliméricas da fase amorfa ganham mobilidade. O valor de  $T_g$  é um valor médio de faixa de temperatura.

Figura 47 – Curva termogravimétrica das amostras de poliamida



## 3. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

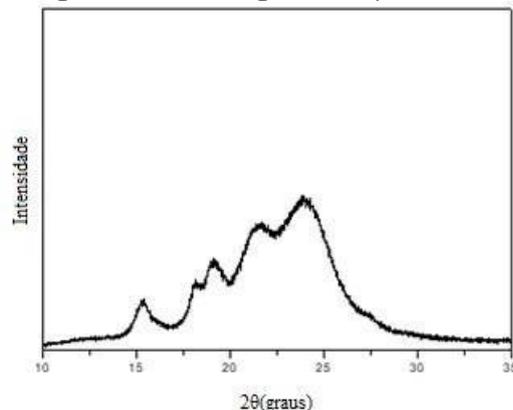
A estrutura cristalina da Poliamida 1 foi investigada pelo DRX. Observando a Figura 48 abaixo é possível afirmar que o polímero é semicristalino. A poliamida-6 pode cristalizar nas formas  $\alpha$  e  $\gamma$ , sendo este último com picos identificados em  $2\theta$  igual 20° e 24°, e aquele com  $2\theta = 21^\circ$  (Wang *et al.*, 2007; Fornes & Paul, 2003). Papadopoulo e colaboradores (2016) analisaram a poliamida-66 e apontaram como pico cristalino característico  $2\theta$  igual a 20 e 24°. O material apresenta picos referentes ao poliamida-6 e poliamida-66.

O polimorfismo presente na poliamida está relacionado tanto ao tratamento térmico dado à poliamida e com a velocidade com que foi fiado, por exemplo o poliamida-6 que forma cristais do tipo  $\alpha$  quando a cristalização ocorre a altas

temperaturas e cristais do tipo  $\gamma$  em temperaturas menores (Deopura *et al.*, 2008; Zheng *et al.*, 2003). Esses parâmetros influenciam diretamente nas propriedades estruturais do material, ou seja, na cristalização do polímero, e, por conseguinte na propriedade mecânica. Os pesquisadores Men e Rieger (2004) realizaram um estudo no qual amostras copolímero PA6/66 seca e saturada com água foram analisadas no DRX sob uma temperatura determinada. Então, foi observado que houve uma transição na fase  $\alpha$  cristalina para pseudo-hexagonal nas amostras e verificou que a água favorece uma estrutura cristalina mais perfeita. Um outro estudo realizado pelo grupo de Shanak e colaboradores (2009) investigou as diferenças estruturais causada no filme de poliamida-6 monoaxial e biaxial comparado ao filme sem sofrer estiramento. Além de ter sido observado o aumento da cristalinidade para os dois processos, observou-se também o favorecimento da fase  $\alpha$ . Esses estudos corroboram o fato que a estrutura da poliamida está correlacionada ao seu processo de obtenção.

O desconhecimento preciso do processo que gerou essa monofilamento de poliamida, tais como temperatura e velocidade de com que as monofilamentos foram obtidas, e ainda que aditivos foram adicionados ao processo inviabilizam relacionar todos os planos cristalinos apresentados na Figura 48.

Figura 48 – Difratoograma da poliamida.



Fonte: Os autores

O grau de cristalinidade foi calculado como 60%, segundo a fórmula abaixo:

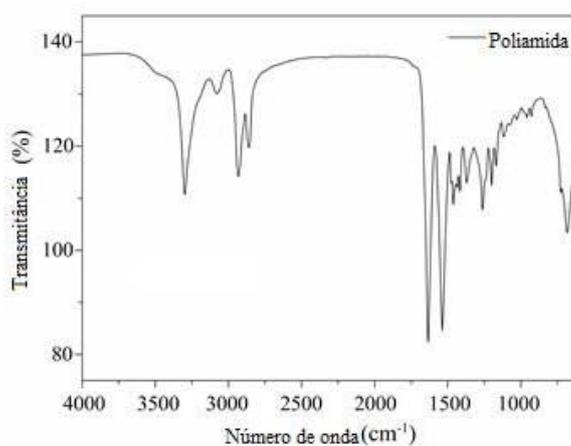
$$X_c = \frac{A_c}{(A_c + A_a)} \times 100 \quad (37)$$

Onde,  $A_c$  refere-se à área correspondente a fração cristalina do polímero e  $A_a$  à fração amorfa.

#### 4. ESPECTRÔMETRO DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

De acordo com a Figura 49, o espectro de infravermelho por transformada de Fourier mostrou as bandas estruturais da poliamida, tal como 3299, 3075, 1634 e 1537  $\text{cm}^{-1}$  referente às ligações N-H, C=O, C-N, CO-N-H<sub>1,2,3</sub>.

Figura 49 – FTIR da poliamida



Fonte: Os autores

Agência Brasileira ISBN  
ISBN: 978-65-84610-66-8