

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**ACIONAMENTO INTELIGENTE DE VÁLVULA  
OFFSHORE POR LIGA COM MEMÓRIA DE  
FORMA**

Fernando Cesar de Abreu Matos

Humberto Oberosler Terço Dias

**Rio de Janeiro  
Junho de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**ACIONAMENTO INTELIGENTE DE VÁLVULA  
OFFSHORE POR LIGA COM MEMÓRIA DE  
FORMA**

Fernando Cesar de Abreu Matos

Humberto Oberosler Terço Dias

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior do  
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Prof.<sup>a</sup> Co-orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

**Rio de Janeiro  
Junho de 2018**

## CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

M433 Matos, Fernando Cesar de Abreu  
Acionamento inteligente de válvula offshore por liga com  
memória de forma / Fernando Cesar de Abreu Matos, Humberto  
Oberosler Terço Dias.—2018.  
xvi, 92f. + apêndice : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 90-92

Orientador : Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Coorientadora : Luciana Loureiro da Silva Monteiro

1. Engenharia mecânica. 2. Indústria offshore de petróleo. 3.  
Indústria offshore de gás. 4. Ligas com memória de forma. I. Dias,  
Humberto Oberosler Terço. II. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de  
(Orient.). III. Monteiro, Luciana Loureiro da Silva (Coorient.). IV.  
Título.

CDD 621

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares pelo suporte e compreensão ao longo dessa trajetória que, mesmo com todos os desafios, nos motivaram e deram condições para continuarmos firmes e não desviarmos do nosso objetivo maior.

Dedicamos também aos nossos amigos que compartilharam desses desafios conosco, tornando mais amigáveis todos os obstáculos e aos mestres que sempre nos motivaram buscar e cultivar o conhecimento.

Fernando Cesar de Abreu Matos

Humberto Oberosler Terço Dias

## AGRADECIMENTOS

Aos nossos familiares que nos deram as condições emocionais e financeiras para chegarmos até aqui. Os momentos de dificuldade foram numerosos e sempre que precisávamos nossos pais, irmãos, tios, primos estavam do nosso lado para nos apoiar e dar forças para seguirmos em frente.

Agradecemos aos nossos orientadores Ricardo Aguiar e Luciana Loureiro por toda a paciência e dedicação ao nosso trabalho. Agradecemos pelos esclarecimentos, direcionamentos, broncas e pela amizade que possibilitou a realização de todo esse trabalho.

Aos mestres do corpo docente da Engenharia Mecânica por todo o conhecimento transmitido, em especial aos professores Hector Costa, Luis Felipe, Mateus Campolina, Tatiane Chuvas e Christian Nolte pelas orientações em Iniciações Científicas e ajudas no Projeto de Extensão.

À Equipe Venturi Aerodesign que foi nossa segunda casa por mais da metade da faculdade e nos proporcionou alguns dos momentos mais desafiadores e incríveis de nossas vidas.

Agradecemos aos amigos do Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico de Materiais (LACTM), Brenno Duarte, Gabriel Averbug, Arthur Adeodato, Rodrigo de Almeida, Jorge Neto e Armando Azevedo pelas incontáveis ajudas e conversas construtivas.

Fernando Cesar de Abreu Matos

Humberto Oberosler Terço Dias

## RESUMO

A utilização das ligas com memória de forma (do inglês Shape Memory Alloy - *SMA*) tem crescido nos últimos anos, visando o desenvolvimento de atuadores e sensores inteligentes. Este interesse advém do fato desses materiais apresentarem características adaptativas únicas, modificando sua forma e propriedades físicas a partir da imposição de carregamentos termomecânicos. O trabalho ora proposto visa o estudo experimental de uma atuação, combinando um fio de *SMA* com 0,5 mm de diâmetro com uma mola helicoidal convencional de aço, com o objetivo de desenvolver um mecanismo atuador de uma válvula conceitual de *Gas Lift*, utilizada na indústria *offshore*. Foram verificadas as influências de diferentes temperaturas na transformação de fase martensítica do fio, além do estudo da ação de molas com diferentes valores de rigidez. Por fim, elaboramos uma proposta conceitual de uma válvula *Gas Lift*, associada a um sistema convencional fio *SMA*-mola, abordando as possibilidades e as dificuldades de implementação da tecnologia.

Palavras-chave: Liga com Memória de Forma, Válvula, Atuador, Indústria de Óleo e Gás.

## ABSTRACT

The use of the shape-memory alloys has grown in recent years aiming at the development of intelligent actuators and sensors. This interest stems from the fact that these materials present unique adaptive characteristics, modifying their shape and physical properties from the imposition of thermomechanical loads. The proposed work is aimed at the experimental study of the actuation, combining a wire of SMA with 0.5 mm in diameter with a conventional coil steel spring, aiming to develop a mechanism actuator for Gas Lift concept valve, used in the offshore industry. The influence of different levels of temperatures in the transformation of the martensitic phase of the wire was verified. In addition, the action of springs with different values of stiffness was studied as well. Lastly, conceptual approach of a Gas Lift valve was made using a regular SMA wire-spring system, addressing the possibilities and difficulties of implementing the technology.

**Key-words:** *Shape Memory Alloys, Gas Lift, Actuator, Offshore.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Demanda de petróleo em diferentes regiões ao longo do tempo. Fonte: IEA (2017)	1
<b>Figura 2:</b> Divisão percentual dos métodos de elevação artificial do petróleo na produção da Petrobras em 2009. Elaboração própria. (FILHO, 2011).	7
<b>Figura 3:</b> Ilustração SSSV (MARTIN, 2002).	9
<b>Figura 4:</b> Ilustração SSSV com sistema hidráulico (MARTIN, 2002).	10
<b>Figura 5:</b> Válvula <i>Choke</i> (GE Oil & Gas).	11
<b>Figura 6:</b> Válvula de esfera (Offshore Technologies).	12
<b>Figura 7:</b> Válvula gaveta (Offshore Technologies).	13
<b>Figura 8:</b> Mecanismo de elevação do óleo por gás (LUFKIN, 2011).	14
<b>Figura 9:</b> Poços de produção de óleo e gás utilizando gás natural durante processo de elevação artificial (NAKASHIMA, 2004).	15
<b>Figura 10:</b> Válvula de <i>Gas Lift</i> Contínuo com nitrogênio (a esquerda) e com mola (a direita) (LUFKIN, 2011).	17
<b>Figura 11:</b> Sistema GLC (a esquerda) e GLI (a direita) (Flowserve).	19
<b>Figura 12:</b> Etapas da transformação de fase fonte (AGUIAR <i>et al.</i> , 2011 - Modificado).	20
<b>Figura 13:</b> Gráfico tensão x deformação x temperatura (LAGOUDAS, 2008).	20
<b>Figura 14:</b> Curva tensão-deformação superelástico/pseudoelástico e efeito de memória de forma (RAO <i>et al.</i> , 2015).	22
<b>Figura 15:</b> Pinça laparoscópica convencional com mecanismo angular de agarrar (a). O mecanismo de agarrar onde a força de pinça ( $F_{pinça}$ ) é aplicada por cirurgiões, e a força do atuador ( $F_{atuador}$ ) é obtida no eixo central. Como resultado, a força de aperto ( $F_{pega}$ ) é alcançada dentro do grampo (b) (KOÇ <i>et al.</i> , 2016).	23
<b>Figura 16:</b> Modelo numérico da configuração experimental em um programa de simulação dinâmica de múltiplos corpos (ADAMS). (KOÇ <i>et al.</i> , 2016).	23
<b>Figura 17:</b> Configuração experimental com o atuador inteligente projetado para controlar a força de aperto (KOÇ <i>et al.</i> , 2016).	24
<b>Figura 18:</b> Modelo CAD de garra com fio de SMA e mola de torção (CHAITANYA e DHANALAKSHMI, 2014).	25

<b>Figura 19:</b> Esquema experimental (CHAITANYA e DHANALAKSHMI, 2014).....	26
<b>Figura 20:</b> (a) Estrutura da articulação do cotovelo humano; (b) o modelo mecânico de articulação humana bio-inspirado proposto, dois fios de SMA, dois acopladores e um jogo de mola de torção como músculos, ossos e tendões antagonizáveis, respectivamente; (c) o design integrado no modelo CAD e (d) o protótipo do atuador SMA diferencial compatível (GUOA <i>et al.</i> , 2015).....	27
<b>Figura 21:</b> Modelo em CAD e (b) banco de teste experimental (GUOA <i>et al.</i> , 2015). .....	28
<b>Figura 22:</b> Armação a laser com sistema de refrigeração microfluídica integrado. (1) Fluxo; (2) fluxo Fora; (3) barra laser individual; (4) TEM local; e (5) SMA passivo (WADDELL <i>et al.</i> , 2015).....	29
<b>Figura 23:</b> Válvula SMA Protótipo. (1) base de acetato; (2) mola de aço inoxidável; (3) NiTi fio do atuador (WADDELL <i>et al.</i> , 2015). .....	29
<b>Figura 24:</b> Esquema do atuador antes da atuação (a). Seções transversais do atuador (b). Imagem mostrando SMA embutida na matriz PDMS (c). Esquema do atuador durante atuação (d) (WANG <i>et al.</i> , 2016). .....	30
<b>Figura 25:</b> Aparato experimental para análise do atuador de SMA (SILVA <i>et al.</i> , 2013).....	31
<b>Figura 26:</b> Esquema de teste experimenta (SILVA <i>et al.</i> , 2013). .....	32
<b>Figura 27:</b> Esquemática de mecanismo de molas SMA em sistema BOP (SONG <i>et al.</i> , 2010).....	34
<b>Figura 28:</b> Desenho do aparato experimental. Software utilizado: SolidWorks 2016.....	35
<b>Figura 29:</b> Bancada de teste para atuador fio-mola.....	36
<b>Figura 30:</b> Câmera termográfica Flir A320.....	37
<b>Figura 31:</b> Procedimento de teste (SILVA <i>et al.</i> , 2013 - Modificado).....	38
<b>Figura 32:</b> Ciclos de corrente elétrica. ....	40
<b>Figura 33:</b> Célula de carga. ....	42
<b>Figura 34:</b> Sensor de deslocamento.....	43
<b>Figura 35:</b> Partes da Câmera Termográfica (Fluke).....	44
<b>Figura 36:</b> Exemplo de Termografia (Flir).....	44
<b>Figura 37:</b> Conjunto câmera termográfica Flir A320 e lente. ....	45
<b>Figura 38:</b> Fonte de alimentação elétrica. ....	46
<b>Figura 39:</b> Hardware de aquisição de dados Spider 8. ....	46

<b>Figura 40:</b> Gráfico Deformação x Temperatura sob tensão constante de 172Mpa (Dynalloy Inc).....	48
<b>Figura 41:</b> D.S.C. do fio FLEXINOL®. ....	49
<b>Figura 42:</b> Máquina de ensaios de tração da fabricante Instron. ....	50
<b>Figura 43:</b> Tensão x Deformação - Fio SMA Ø0,5mm. ....	51
<b>Figura 44:</b> Ensaio de tração das molas. ....	52
<b>Figura 45:</b> Molas utilizadas no estudo.....	53
<b>Figura 46:</b> Resultado Geral - Mola 01.....	55
<b>Figura 47:</b> Resultado Geral - Mola 02.....	55
<b>Figura 48:</b> Resultado Geral - Mola 03.....	56
<b>Figura 49:</b> Corrente, Deslocamento e Força em detalhe – 3 A. ....	57
<b>Figura 50:</b> Força x Deslocamento - Mola 01.....	58
<b>Figura 51:</b> Força x Deslocamento - Mola 02.....	59
<b>Figura 52:</b> Força x Deslocamento - Mola 03.....	60
<b>Figura 53:</b> Deslocamento x Ciclo – 1 A. ....	61
<b>Figura 54:</b> Deslocamento x Ciclos – 2 A. ....	62
<b>Figura 55:</b> Deslocamento x Ciclos – 3 A. ....	62
<b>Figura 56:</b> Deslocamento Médio x Corrente – Mola 01.....	63
<b>Figura 57:</b> Deslocamento x Ciclo – 1 A. ....	64
<b>Figura 58:</b> Deslocamento x Ciclo – 2 A. ....	64
<b>Figura 59:</b> Deslocamento x Ciclo – 3 A. ....	65
<b>Figura 60:</b> Deslocamento Médio x Corrente – Mola 02.....	66
<b>Figura 61:</b> Deslocamento x Ciclo – 1 A. ....	67
<b>Figura 62:</b> Deslocamento x Ciclo – 2 A. ....	67
<b>Figura 63:</b> Deslocamento x Ciclo – 3 A.....	68
<b>Figura 64:</b> Deslocamento Médio x Corrente - Mola 03. ....	69
<b>Figura 65:</b> Deslocamento médio x Corrente - Molas 01, 02 e 03. ....	70

<b>Figura 66:</b> Força x Ciclo – 1 A.....	71
<b>Figura 67:</b> Força x Ciclo – 2 A.....	72
<b>Figura 68:</b> Força x Ciclo – 3 A.....	72
<b>Figura 69:</b> Força Média x Corrente – Mola 01.....	73
<b>Figura 70:</b> Força x Ciclos – 1 A. ....	74
<b>Figura 71:</b> Força x Ciclos – 2 A. ....	74
<b>Figura 72:</b> Força x Ciclos – 3 A. ....	75
<b>Figura 73:</b> Força Média x Corrente - Mola 02. ....	75
<b>Figura 74:</b> Força x Ciclos – 1 A. ....	76
<b>Figura 75:</b> Força x Ciclos – 2 A. ....	77
<b>Figura 76:</b> Força x Ciclos – 3 A. ....	77
<b>Figura 77:</b> Força Média x Corrente - Mola 03. ....	78
<b>Figura 78:</b> Força Média x Corrente - Molas 01, 02 e 03. ....	79
<b>Figura 79:</b> Fio em temperatura ambiente – 0 A.....	80
<b>Figura 80:</b> Fio à 124°C – 2 A. ....	80
<b>Figura 81:</b> Temperatura e Corrente x Tempo - Mola 01. ....	81
<b>Figura 82:</b> Temperatura e Força x Tempo - Mola 01. ....	82
<b>Figura 83:</b> Temperatura e Força x Tempo - Mola 01.....	83
<b>Figura 84:</b> Desenho de válvula <i>Gas Lift</i> (Google Images).....	85
<b>Figura 85:</b> Desenho de válvula atuada com fios de <i>SMA</i> (SolidWorks 2016). ....	85
<b>Figura A1:</b> Correntes de 1 A, 1.1 A, 1.2 A e 1.3 A - Mola 02 .....	92
<b>Figura A2:</b> Deslocamento em detalhe.....	92

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Especificações do fio utilizado (Dynalloy Inc). .....	47
<b>Tabela 2:</b> Parâmetros do ensaio D.S.C. do fio de SMA (SILVEIRA e CHERMONT, 2017). 49	49
<b>Tabela 3:</b> Rigidez das molas utilizadas no estudo. ....	52

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  – Austenita

$C$  – Índice da mola

$D$  – Diâmetro da espira

$d$  – Diâmetro do fio da mola

$F$  – Força de cisalhamento

$k$  – Rigidez da mola

$M$  – Martensita

$R$  – Fase R

$M^d$  – Martensita não-maclada

$M^t$  – Martensita maclada

$M_s$  – Início da transição da martensita não-maclada

$M_f$  – Final da transição para a martensita não-maclada

$T_{Af}$  – Temperatura final de transformação para a fase austenítica

$T_{As}$  – Temperatura inicial de transformação para a fase austenítica

$T_{Mf}$  – Temperatura final de transformação para a fase martensítica

$T_{Ms}$  – Temperatura inicial de transformação para a fase martensítica

$T_{Rs}$  – Temperatura inicial de transformação da fase R

$T_{Rf}$  – Temperatura final de transformação da fase R

$\delta$  – Deslocamento

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_f$  – Tensão final da transformação de  $M^t$  para  $M^d$

$\sigma_s$  – Tensão inicial da transformação de  $M^t$  para  $M^d$

$\sigma_f^{AM}$  – Tensão final da transformação  $A \rightarrow M$

$\sigma_s^{AM}$  – Tensão inicial da transformação  $A \rightarrow M$

$\sigma_f^{MA}$  – Tensão final da transformação  $M \rightarrow A$

$\sigma_s^{MA}$  – Tensão inicial da transformação  $M \rightarrow A$

$\sigma_{ult}$  – Tensão última de ruptura

$\varepsilon$  – Deformação total

$\varepsilon_E$  – Deformação elástica

$\varepsilon_P$  – Deformação plástica

## SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 – Motivação .....	2
1.2 – Justificativa .....	2
1.3 – Objetivos .....	3
1.4 – Organização do Trabalho .....	3
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica .....	5
2.1 – A Indústria do Petróleo e sua História.....	5
2.2 – Exploração .....	5
Capítulo 3 - Fundamentação Teórica.....	8
3.1 – Válvulas <i>Offshore</i> .....	8
3.1.1 – <i>Subsurface Safety Valve (SSSV)</i> .....	8
3.1.2 – Válvula <i>Choke</i> .....	10
3.1.3 – Válvula Esfera .....	12
3.1.4 – Válvula Gaveta .....	13
3.1.5 – Válvulas de <i>Gas Lift</i> .....	14
3.1.5.1 – Válvula de <i>Gas Lift</i> Contínua (GLC) .....	17
3.1.5.2 – Válvula de <i>Gas Lift</i> Intermitente (GLI) .....	18
3.2 – Ligas de Memória de Forma.....	19
3.2.1 – Efeito de Memória de Forma.....	20
3.2.2 – Efeito Pseudoelástico.....	21
3.3 – Atuadores com <i>SMA</i> .....	22
3.4 – Ligas de Memória de Forma na Indústria <i>Offshore</i> .....	32
Capítulo 4 – Experimento.....	35
4.1 – Aparato Experimental.....	35

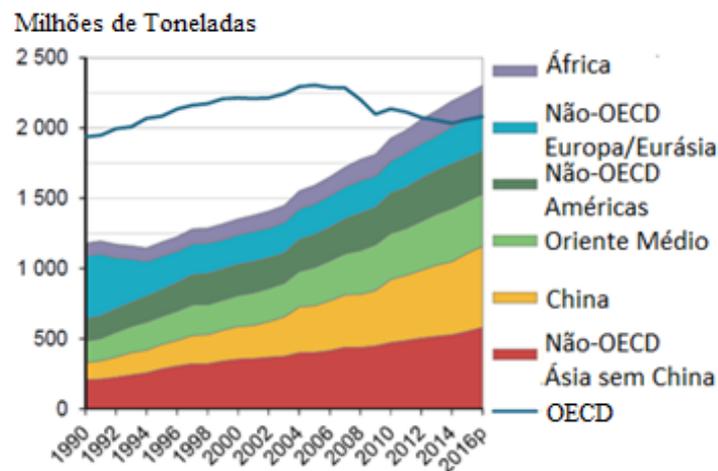
4.2 – Metodologia Experimental .....	37
4.2.1 – Metodologia.....	37
4.2.2 – Preparação do Aparato Experimental .....	39
4.2.3 – Carregamentos Térmicos .....	40
4.3 – Equipamentos Utilizados.....	41
4.3.1 – Transdutor de Força.....	41
4.3.2 – Transdutor Linear de Posição .....	42
4.3.3 – Câmera Termográfica .....	43
4.3.4 – Fonte de Alimentação Elétrica .....	45
4.3.5 – Sistema de Aquisição de Dados.....	46
4.3.6 – Software de Aquisição de Dados.....	47
4.4 – Fio.....	47
4.4.1 – Especificações do Fabricante.....	47
4.4.2 - Calorimetria Diferencial de Varredura.....	48
4.4.3 – Ensaio de Tração .....	50
4.5 – As Molas.....	51
Capítulo 5 - Resultados .....	54
5.1 – Corrente x Deslocamento x Força em Função do Tempo .....	54
5.2 – Força x Deslocamento .....	57
5.3 – Deslocamento x Ciclo.....	61
5.3.1 – Mola 01.....	61
5.3.2 – Mola 02.....	63
5.3.3 – Mola 03.....	66
5.4 – Força x Ciclo .....	70
5.4.1 – Mola 01.....	71
5.4.2 – Mola 02.....	73

5.4.3 – Mola 03.....	76
5.5 – Temperatura.....	79
Capítulo 6 - Proposta Conceitual de Atuação de Válvula <i>Gas Lift</i> com <i>SMA</i> .....	84
Capítulo 7 - Conclusão .....	87
7.1 – Conclusões do Projeto .....	87
7.2 – Sugestões para trabalhos futuros .....	88
Capítulo 8 - Bibliografia.....	90
Apêndice A.....	93

## Capítulo 1 - Introdução

O crescimento da demanda de energia, sobretudo oriundas do petróleo, acompanha o desenvolvimento das economias globais, tornando-se um componente essencial. Além do aspecto energético, derivados do petróleo são largamente utilizados nas indústrias, desde a produção de plásticos até gomas de mascar, propiciando investimentos bilionários tanto na produção, quanto no seu refino.

De acordo com o levantamento da IEA (*International Energy Agency*) de 2017, a produção de óleo global no ano de 2016 foi de aproximadamente 93.7 milhões de barris por dia, um aumento de 2,9% comparado ao ano anterior. Desde o início da década de 90 até os dias atuais, a demanda global para produtos do petróleo quase que dobrou, como mostra a Figura 1.



**Figura 1:** Demanda de petróleo em diferentes regiões ao longo do tempo. Fonte: IEA (2017)

A crescente demanda de produtos associados à indústria de óleo e gás fomenta o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem seus avanços. Um dos fatores que contribui no aumento da complexidade dos projetos é a descoberta de reservas em águas cada vez mais profundas. Os severos ambientes a que os equipamentos são submetidos conduz os centros de pesquisa e variados setores da engenharia industrial a desenvolverem tecnologias cada vez mais inovadoras a fim de garantir a exploração do óleo de maneira eficaz e segura, sempre

associada à viabilidade econômica. A utilização de materiais inteligentes vem de encontro com a necessidade do desenvolvimento inovador de novos sistemas de atuação para válvulas e outros dispositivos utilizados na indústria óleo e gás.

## 1.1 – Motivação

Desde sempre a humanidade foi movida por grandes desafios. A vontade de inventar, de empreender, de promover melhorias contínuas sempre esteve no imaginário das pessoas. Ao longo do tempo presenciamos por diversas vezes a conclusão de que certas tecnologias, hoje mais do que comuns no nosso dia a dia, eram impossíveis de existirem.

Atuadores de Ligas de Memória de Forma, do inglês *Shape Memory Alloys (SMA)* podem ser uma viável solução para simplificar sistemas e torna-los mais confiáveis. Vale salientar que as soluções com *SMA* podem representar também o corte de custos tanto de instalação quanto de manutenção e diminuição da massa do projeto, esse último sendo vital em muitas indústrias, tais como a aeroespacial.

A *SMA* possui características únicas, podendo sofrer deformação reversível e, a partir de carregamentos térmicos, sua microestrutura pode sofrer transformações de fase, restaurando sua configuração original. Sendo utilizada para muitos fins, tais como na medicina, na aeronáutica, dentre outros, possui uma excelente relação força x massa, possibilitando o projeto de atuadores automáticos para toda a indústria.

## 1.2 – Justificativa

A Indústria *Offshore* possui profunda importância no nosso dia a dia. O petróleo e seus derivados são indispensáveis nas indústrias e completamente fundamentais como combustível para transporte. Os equipamentos desenvolvidos para atuação *offshore* possuem grande responsabilidade quando considerado que falhas e acidentes em alto mar podem causar desde prejuízos financeiros a perda de vidas humanas e meio ambiente.

Vale salientar que grande parte dos equipamentos utilizados nesse ramo atuam, às vezes, a milhares de metros abaixo do nível do mar, expostos a altas temperaturas e ambientes abrasivos e corrosivos. Dentro de uma planta de exploração, desde a cabeça do poço até a plataforma, válvulas de segurança são empregadas e cada uma delas possuem funções e atuações específicas, além de possuírem diferentes tecnologias e métodos para vedar ou controlar o fluxo de fluidos.

Diante desse contexto, verifica-se a necessidade de desenvolver novas soluções na atuação de válvulas *offshore*, propondo simplificações de projeto e redução de custos através do uso de ligas com memória de forma.

### 1.3 – Objetivos

Neste trabalho é analisada a utilização de um sistema de atuação composto por fio de SMA-mola convencional helicoidal de aço, como atuadores no acionamento de válvulas *offshore*. Serão verificados diferentes parâmetros de atuação do fio, em diferentes patamares de temperatura e corrente. Além disso, molas com diferentes valores de rigidez  $k$  serão estudadas no sistema.

### 1.4 – Organização do Trabalho

O Capítulo 1 apresenta um panorama da indústria do petróleo e sua influência no nosso dia a dia, a motivação e os objetivos do trabalho. O segundo capítulo mostra um pouco da história da indústria do petróleo e alguns processos referentes à exploração do petróleo. O Capítulo 3 apresenta as válvulas mais utilizadas na indústria *offshore* e seus respectivos modos de acionamento. É abordada o princípio de funcionamento dos materiais inteligentes, onde se baseia o desempenho dos fios de memória de forma em alguns tipos de atuadores inteligentes que utilizam esses materiais para seu acionamento. No quarto capítulo é apresentada toda a metodologia experimental e os equipamentos utilizados. No Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais utilizando um fio com memória de forma e

diferentes molas convencionais de aço pré-carregadas. O sexto capítulo apresenta uma proposta de atuação do sistema fio-mola numa válvula *Gas Lift*, sendo seguido pelo sétimo capítulo, onde é apresentada a conclusão do estudo.

## Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

### 2.1 – A Indústria do Petróleo e sua História

A Indústria *Offshore* teve o seu início na última década do século XIX, em Summerland, Califórnia. Obviamente, suas instalações eram bastante simples, consistindo basicamente de prolongamentos dos sistemas *onshore*. Segundo Christie *et al.* (2000) o cais alongava-se por cerca de 76 metros de distância da costa, mas de acordo com Noia (2006) o comprimento do cais era de 370 metros.

O teste real na utilização de plataforma *offshore* de grandes dimensões teve lugar em 1938, na costa marítima próxima à cidade de Cameron, Louisiana, a 1,6 km de distância da costa, numa profundidade de apenas 5 metros de água. No local foi construída uma grande plataforma de madeira para a perfuração de poços, que media 100x55 metros e que foi, posteriormente, utilizada como plataforma de produção de petróleo; denominada Creole. Produziu durante 30 anos e se tornou a primeira plataforma a passar por testes de furacões que assolam a região (AUSTIN *et al.*, 2004).

### 2.2 – Exploração

A indústria Offshore é dividida em três grandes etapas: Prospecção, Perfuração e Elevação.

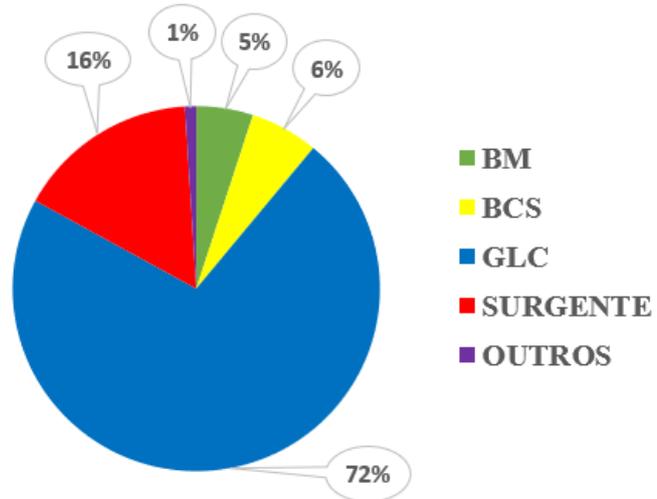
- **Prospecção:** Consiste no estudo e análise das bacias sedimentares pelos geólogos e geofísicos, para indicarem o local mais propício para acumulação do mesmo e verificar qual destas situações possui maior probabilidade de conter hidrocarbonetos. A área sísmica possui fundamental importância na aquisição de informações e descobertas de regiões ricas em hidrocarbonetos. A aquisição desses dados é feita a partir da geração de ondas acústicas, que se propagam pelo meio (água e subsolo) e são refletidas para a superfície, sendo registradas e interpretadas. Esse processo não

garante que a perfuração vai obter êxito, no entanto fornecerá informações técnicas com investimento relativamente baixo em relação à perfuração de um único poço. O método é responsável por mais de 90% dos investimentos da prospecção.

- **Perfuração:** Realizado por uma sonda, tal processo é efetuado por uma broca rotativa existente na extremidade de uma coluna de perfuração na qual consiste basicamente de tubos de paredes espessas e tubos de paredes finas chamados, respectivamente, de comandos e tubos de perfuração. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço de diâmetro inferior ao da broca é inserido no poço. O espaço intermediário entre as paredes do poço e os tubos de revestimento é cimentado a fim de isolar as rochas perfuradas. Assim, o processo é repetido com brocas de diâmetros cada vez menores dando seguimento à operação de perfuração.
- **Elevação:** Consiste, como o nome diz, em elevar o petróleo dos poços à superfície. Existem dois tipos de elevação, a natural e a artificial. A primeira acontece quando a pressão do reservatório é suficientemente elevada para livremente elevar os fluidos à superfície, por isso denominado natural. Poços com essa característica são denominados de poços surgentes. O outro tipo de elevação é quando a elevação natural não ocorre, assim, se faz necessária a elevação do tipo artificial, que consiste em proporcionar energia aos fluidos de forma que consigam chegar à superfície. Os métodos mais comuns de elevação artificial da indústria do petróleo são:

- Gas-Lift Contínuo e Intermitente (GLC e GLI);
- Bombeio Centrífugo Submerso (BCS);
- Bombeio Mecânico com Hastes (BM);
- Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP).

Diferentes parâmetros do projeto de exploração são considerados no intuito de se escolher o método de elevação artificial mais eficiente, tais como o número de poços, profundidade, vazão, razão gás-líquido, dentre outros. A Figura 2 mostra a participação de diferentes métodos de elevação artificial na produção de petróleo da Petrobras, em 2009.



**Figura 2:** Divisão percentual dos métodos de elevação artificial do petróleo na produção da Petrobras em 2009. Elaboração própria. (FILHO, 2011).

## Capítulo 3 - Fundamentação Teórica

### 3.1 – Válvulas *Offshore*

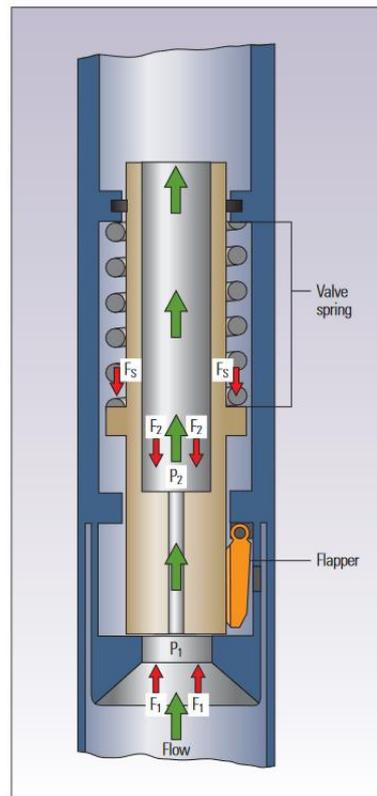
As válvulas, de uma maneira geral, possuem o objetivo de vedar ou controlar a passagem de um fluido. Todavia, vale salientar que cada modelo possui características diferentes, nas quais pode-se citar a vedação total do fluxo, vedação parcial ou então o uso exclusivo para gases ou líquidos.

O ambiente *offshore* obriga que as válvulas possuam características diferenciadas visto que estas estarão expostas a condições agressivas. Todas elas necessitam ser confiáveis e muitas devem ser acionadas automaticamente pelo sistema. Os tópicos a seguir abordarão algumas válvulas *offshore*.

#### 3.1.1 – *Subsurface Safety Valve (SSSV)*

As *Subsurface Safety Valves (SSSV)*, do português válvulas de segurança subterrâneas, fornecem a máxima proteção contra o fluxo descontrolado da produção de poços de petróleo e gás em caso de danos catastróficos aos equipamentos. O uso dessas válvulas é legislado em muitas partes do mundo para proteger as pessoas e o meio ambiente. As válvulas de segurança evoluíram a partir de equipamentos relativamente simples da década de 1940 a complexos sistemas integrados em *offshore* em todo o mundo.

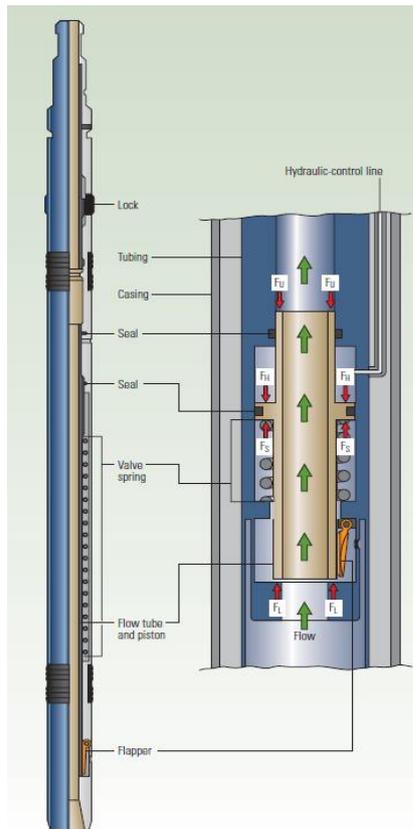
As *SSSVs* são essenciais para o total fechamento autônomo do fluxo de fluidos em casos extremos, onde a cabeça do poço ou as válvulas/sistemas na superfície falham. Essas válvulas protegem todo o local, desde o petróleo e sua reserva, até as pessoas e o meio ambiente.



**Figura 3:** Ilustração SSSV (MARTIN, 2002).

Atualmente, as SSSVs atuam quando identificam alguma variação no fluxo de fluido durante a produção. O fluido é estrangulado dentro da válvula, criando um diferencial de pressão entre saída e entrada da válvula, como pode ser visto na Figura 3. Quando esse diferencial excede um determinado valor crítico, a mola da válvula atua fechando o *flapper* e vedando o fluxo de fluido e protegendo a produção.

Entretanto, existe uma grande limitação: a válvula apenas consegue atuar a partir de certos parâmetros de produção. A partir do fato de que a válvula atua quando existe uma variação de pressão considerável entre a entrada e a saída dessa, só podem ser utilizadas se a produção/fluxo está normal, restrito a um nível abaixo da produção e acima da produção normal.



**Figura 4:** Ilustração SSSV com sistema hidráulico (MARTIN, 2002).

Outras soluções foram propostas a partir da década de 1960, quando a atuação começou a ser feita por um sistema hidráulico e totalmente controlada a partir de uma estação de controle, providenciando uma atuação segura no sistema. O fluido é forçado dentro do sistema, como pode ser visto na Figura 4, comprimindo a mola que, conseqüentemente, fecha o *flapper*. A partir dessa solução, a atuação da válvula não dependerá apenas do escoamento de fluido durante a produção.

### 3.1.2 – Válvula *Choke*

O fluido quando extraído, a partir de características do poço como pressão dos poros, permeabilidade, dentre outros, pode alcançar elevados índices de pressão que seriam prejudiciais para o seu processo de extração. A válvula *Choke* possui a função de estrangular

o fluido e permitir o controle do fluxo e pressão durante o escoamento. Tal válvula é tipicamente utilizada em árvores de natal.

O mecanismo funciona a partir de discos ou cilindros, que possuem orifícios reguladores que, quando combinados, permitem a passagem do fluido, sendo estrangulado, gerando uma perda de carga no escoamento e sua energia é dissipada na forma de calor.

A operação das válvulas *Choke* necessitam ser estudadas e, geralmente, demandam elevados custos com manutenção. Nas aplicações *offshore* estão expostas a altíssimas pressões, velocidades de escoamento e misturas de fluido e areia, que é um componente abrasivo, desgastando as superfícies de contato da válvula. A Figura 5, abaixo, ilustra o sistema de uma válvula *Choke*.



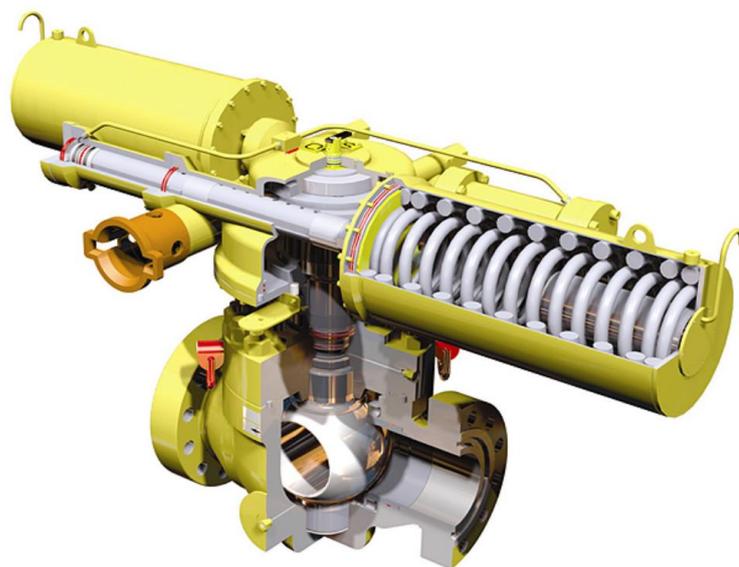
**Figura 5:** Válvula *Choke* (GE Oil & Gas).

### 3.1.3 – Válvula Esfera

As válvulas de esfera são as válvulas mais utilizadas na indústria de petróleo e gás. Dentro da válvula existe uma esfera que desempenha o controle do fluxo. A esfera possui um furo e, quando este está concêntrico com a tubulação, a válvula está totalmente aberta. Para fechar a válvula, gira-se a esfera em 90°. A válvula sempre está totalmente aberta ou totalmente fechada, não há posição intermediária (HANSEN, 2016).

As vantagens dessas válvulas sobre as de gaveta, que serão desenvolvidas na próxima seção, são o menor tamanho e peso, além de melhor vedação. São bastante empregadas e possuem obturadores especiais para funções de controle.

Normalmente a vedação é do tipo metal-metal na interface sede-esfera pois mesmo tendo vedações mais eficientes, este apresenta uma maior vida útil. Os tamanhos mais comuns vão de 3” a 36” (76,2 a 914,4 mm) e podem ser toda soldada, *top-entry* ou *split-body*. As duas primeiras são as mais comuns, a primeira possui trechos de tubulação soldadas ao corpo da válvula e, portanto, em caso de manutenção deverá ser cortada da tubulação, já a segunda possui flanges para fixar à tubulação o que torna a mesma mais pesada (GRECHI *et al.*, 2016). A Figura 6 ilustra o sistema de válvula de esfera.



**Figura 6:** Válvula de esfera (Offshore Technologies).

### 3.1.4 – Válvula Gaveta

A válvula gaveta submarina é usada para controlar o fluxo de fluido do reservatório através da árvore de natal molhada em conjunto com o sistema de tubulação. Um disco redondo ou retangular é movido em uma direção linear por uma haste que faz a válvula abrir ou fechar. Existem dois tipos de válvulas gaveta: padrão e de passagem plena. Quando a gaveta está aberta, esta está inteiramente fora da passagem do fluxo para a válvula do tipo padrão, enquanto o fluxo passa por um orifício no portão através do tipo de passagem plena.

A válvula gaveta geralmente é projetada para abrir ou fechar completamente, pois a gaveta e a vedação tendem a se erodir rapidamente ao restringir o fluxo e tenderá a gerar turbulências se a gaveta estiver em uma posição parcialmente aberta. Isto é particularmente importante, na indústria de petróleo e gás, uma vez que a pressão do fluido no reservatório é alta e a presença de elementos abrasivos podem ocasionar o desgaste do sistema. A Figura 7 ilustra o sistema de uma válvula Gaveta.



**Figura 7:** Válvula gaveta (Offshore Technologies).

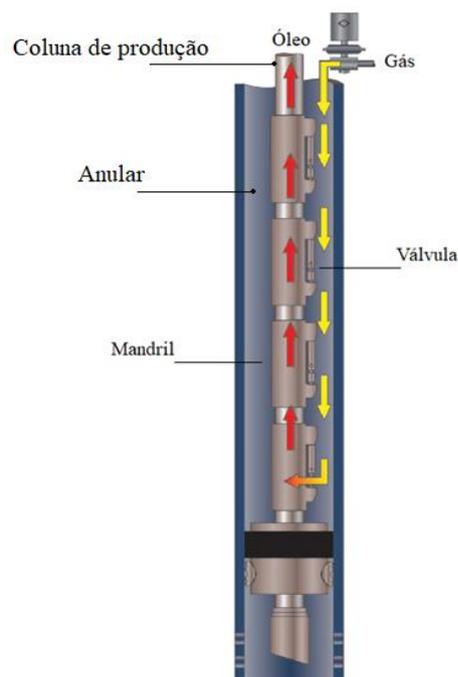
### 3.1.5 – Válvulas de *Gas Lift*

Como descrito na seção 2.2, existem dois tipos de elevação no sistema de *Gas Lift*: o Contínuo e o Intermitente, sendo indicadas de acordo com as condições de trabalho do poço.

As válvulas de *Gas Lift* são, essencialmente, válvulas de pressão que possuem função de interface entre a coluna de produção, onde passa o fluido do reservatório, e o revestimento, também chamado de anular.

A principal diferença entre o *Gas Lift* Intermitente e Contínuo é o período de atuação dessas em função da produção de óleo. O GLC atua injetando gás a todo o momento, sem ser fechada, enquanto o GLI injeta gás a alta pressão em certos períodos, podendo ser fechada, deslocando golfadas de fluido.

As principais funções das válvulas são facilitar a operação de descarga do poço e controlar o fluxo de gás do anular para o interior da coluna de produção. Um esquema de funcionamento das válvulas em uma coluna de produção pode ser visto na Figura 8, abaixo.

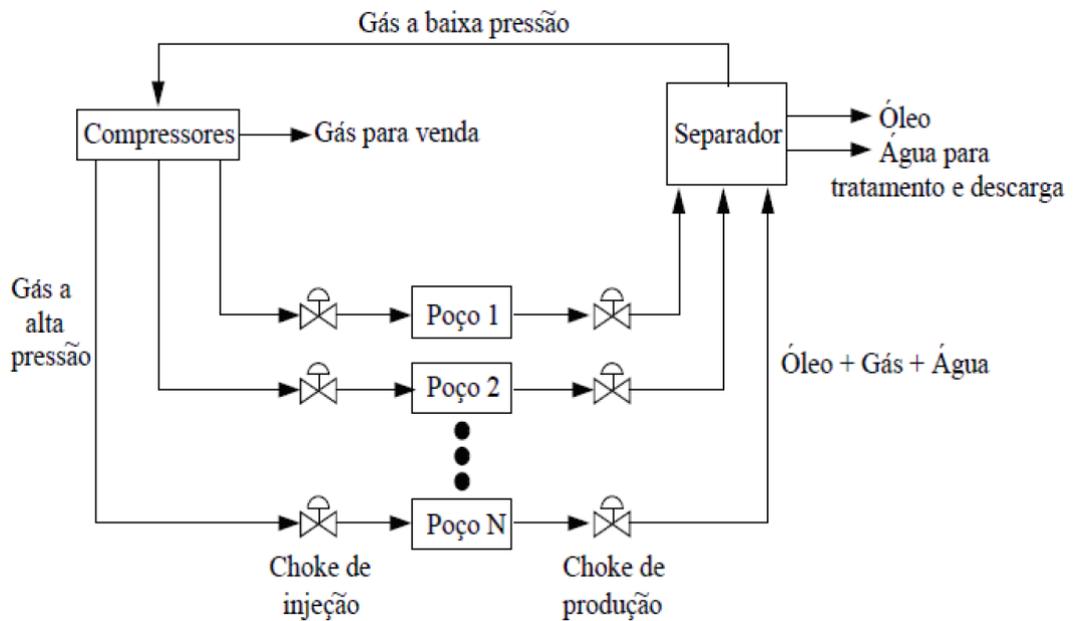


**Figura 8:** Mecanismo de elevação do óleo por gás (LUFKIN, 2011).

As válvulas *Gas Lift* podem ser controladas ou operadas por diferença de pressão, mecanicamente ou por velocidade e densidade. Além disso, podem operar apenas como descarga, com o objetivo de reiniciar a operação e geralmente se encontram fechadas durante a produção, e como operadoras, injetando gás constantemente na linha de produção, aumentando a vazão de óleo produzido.

Simplificadamente, a injeção de gases na linha de produção acarreta na diminuição da densidade média dos fluidos produzidos, formando uma mistura mais leve e, conseqüentemente, com maior potencial para escoar até a superfície, reduzindo a pressão requerida para deslocá-lo.

O gás natural, produzido durante a extração de óleo, também pode ser utilizado no processo de *Gas Lift*. O gás é separado da mistura gás, óleo e água, sendo uma parte direcionado diretamente para fins comerciais e outra parte é levada para compressores e injetada nas tubulações de produção por meio das válvulas de *Gas Lift*. A Figura 9 ilustra o sistema de elevação artificial utilizando gás natural em mais de um poço.



**Figura 9:** Poços de produção de óleo e gás utilizando gás natural durante processo de elevação artificial (NAKASHIMA, 2004)

O *API Manual* (*American Petroleum Institute*, 1994) apresenta algumas vantagens do *Gas Lift*, entre elas:

- O custo inicial dos equipamentos é geralmente mais baixo;
- É mais flexível que qualquer outro tipo de elevação;
- A taxa de produção pode ser controlada da superfície;
- A produção de areia não afeta os equipamentos;
- Pode ser usado em poços desviados;
- Maior vida útil dos equipamentos em relação aos outros tipos de elevação;
- Menor custo de operação;
- Equipamentos de fácil instalação, troca e manutenção;
- Linhas de gás podem ser usadas para injetar produtos químicos no poço.

No mesmo *API Manual* cita-se as desvantagens desse processo:

- Necessidade de gás disponível. Gases como ar e nitrogênio também podem ser usados, mas geralmente são mais caros e mais difíceis de trabalhar;
- O gás corrosivo presente em um poço pode se espalhar para todos os outros poços quando for injetado;
- Necessidade de revestimento em bom estado;
- Elevado volume de gás manuseado a altas pressões, aumentando o risco operacional;
- Maior tempo para recolocar o poço em produção;
- Alta contrapressão sobre a formação no caso de *Gas Lift* Contínuo.

### 3.1.5.1 – Válvula de *Gas Lift* Contínua (GLC)

A válvula de *Gas Lift* Contínua possui como principal característica a injeção contínua de gás na coluna de produção. A inclusão do gás na coluna faz com que a densidade média do sistema diminua, facilitando o escoamento do fluido. O gás é injetado de forma controlada e contínua e o *Choke* é o responsável por fazer o controle da injeção de gás na superfície. Por requerer injeção contínua de gás na coluna de produção, proporcional à vazão de líquidos que vem do reservatório, o GLC necessita de uma válvula com orifício relativamente pequeno.

O GLC não possui partes móveis e se comporta como se fosse uma placa de orifício que admite o gás do anular. Como o GLC pressupõe uma injeção contínua de gás, este tipo de válvula não prevê qualquer tipo de mecanismo regulador de fluxo ou fechamento. A Figura 10 ilustra dois sistemas distintos de uma válvula GLC.



**Figura 10:** Válvula de *Gas Lift* Contínuo com nitrogênio (a esquerda) e com mola (a direita) (LUFKIN, 2011).

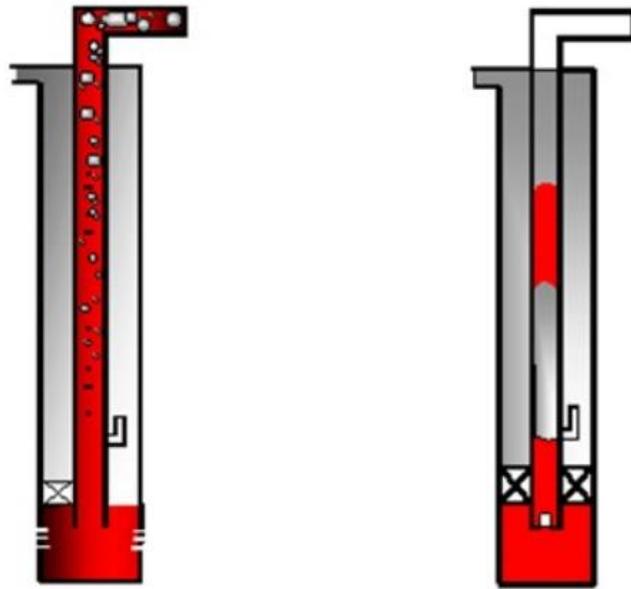
### 3.1.5.2 – Válvula de *Gas Lift* Intermitente (GLI)

As válvulas GLI, diferentemente das GLC possuem partes móveis que atuam acionadas pelo diferencial de pressão proveniente do anular e possibilitando o posterior fechamento da válvula. Para que a válvula atue é necessário que a pressão do anular atinja um valor pré-estabelecido, de acordo com a pressão do nitrogênio no interior da câmara e de acordo com a tensão da mola. Ambos esses elementos fazem com que a válvula permaneça normalmente fechada.

Thomas (2004) diz que o GLI requer uma elevada vazão periódica de gás para imprimir grande velocidade ascendente à golfada, para isso precisa de válvulas com maior orifício e abertura rápida. O gás penetra na coluna de produção por essas válvulas, localizadas próximas ao fundo do poço, elevando todo o líquido acumulado acima desta. O ciclo de intermitência são as fases ocorridas para elevação de uma golfada de fluido até a superfície e o tempo de ciclo é o tempo entre duas aberturas consecutivas da válvula operadora, podendo variar desde alguns minutos até algumas horas. O tempo de ciclo é dividido em três períodos:

- Período de Alimentação: o controlador de injeção de gás (intermitor de ciclo) e a válvula estão fechados. O fluido que está chegando do reservatório se acumula na coluna de produção acima da válvula operadora.
- Período de Injeção: o intermitor de ciclo e a válvula operadora estão abertos O gás injetado entra na coluna de produção através da válvula operadora e desloca todo o fluxo que havia se acumulado acima dessa em forma de golfada de líquido.
- Período de Redução de Pressão: o intermitor de ciclo fecha, cessando a injeção de gás para o anular, enquanto a válvula operadora permanece aberta até que a redução da pressão no anular ocasione o seu fechamento. O gás injetado para produzir a golfada anterior está sendo produzido no separador, diminuindo assim a pressão no interior da coluna e tornando possível o acúmulo de uma nova golfada.

A Figura 11 ilustra a diferença de operação entre o sistema GLC (a esquerda) e o GLI (a direita).

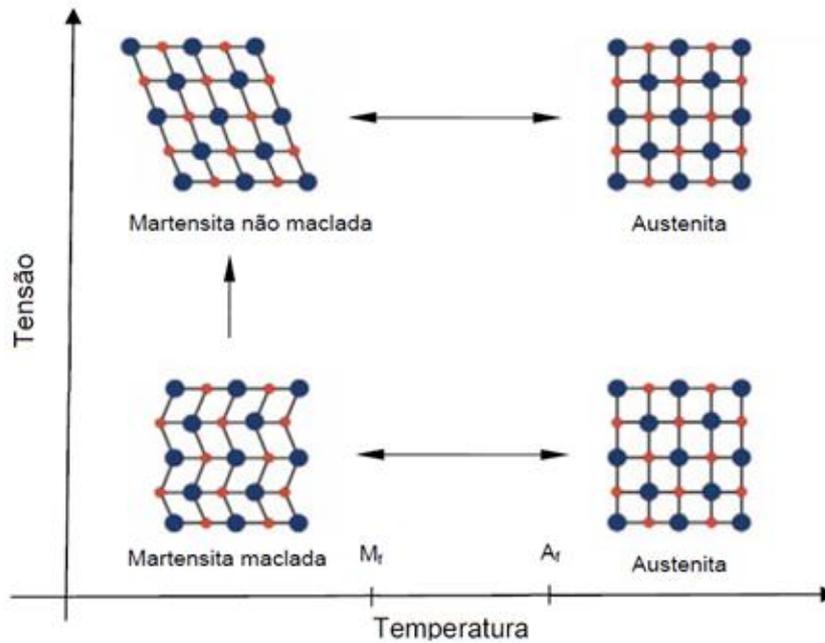


**Figura 11:** Sistema GLC (a esquerda) e GLI (a direita) (Flowsolve).

### 3.2 – Ligas de Memória de Forma

O termo “liga com memória de forma” é aplicado ao grupo de materiais metálicos que demonstram a habilidade de recuperar sua forma original mesmo após sofrerem deformações relativamente grandes, como imposição de um campo de temperatura e/ou de tensões, através de transformações de fase induzidas no material. Dentre as *SMA*s, vale destacar as ligas baseadas em níquel-titânio (Ni-Ti) e as ligas a base de cobre, tais como Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni. As ligas a base de Ni-Ti são as mais utilizadas em aplicações comerciais por combinar as propriedades associadas às ligas com memória de forma com boas propriedades mecânicas (LAGOUDAS, 2008).

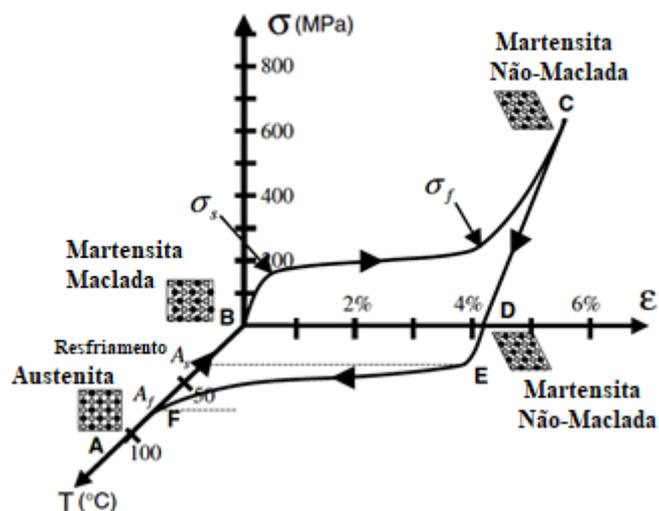
A transformação reversível de fase de austenita para martensita maclada é que caracteriza a base do comportamento de uma *SMA*, como pode ser visto na Figura 12.



**Figura 12:** Etapas da transformação de fase fonte (AGUIAR *et al.*, 2011 - Modificado).

### 3.2.1 – Efeito de Memória de Forma

As ligas com memória de forma possuem o Efeito de Memória da Forma, do inglês *Shape Memory Effect*, a baixas temperaturas, que está exemplificado no gráfico Tensão-Deformação-Temperatura, Figura 13, abaixo.



**Figura 13:** Gráfico tensão x deformação x temperatura (LAGOUDAS, 2008).

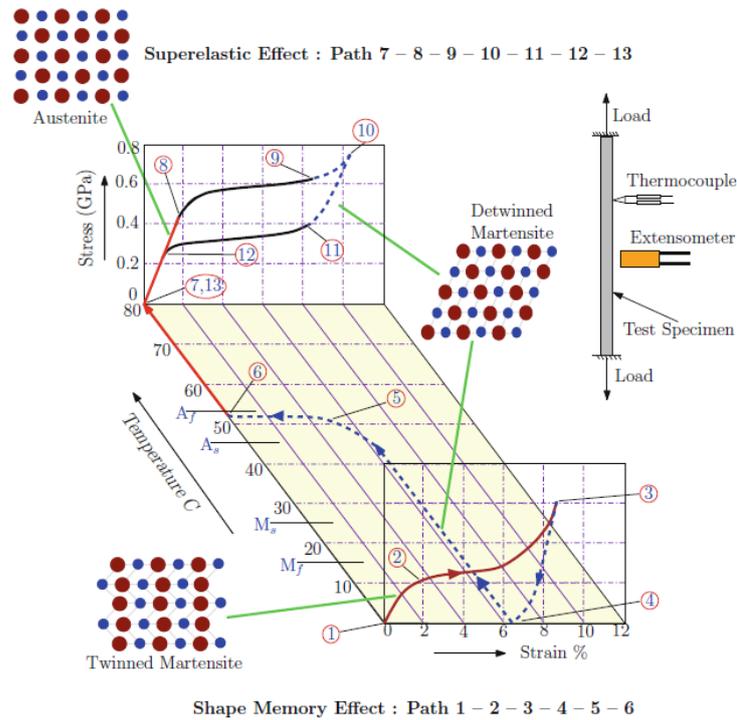
Do ponto B para C é onde ocorre o carregamento mecânico gerando a deformação e como consequência a mudança de configuração da martensita maclada ( $M^t$ ) para martensita não-maclada ( $M^d$ ), os pontos  $M_s$  e  $M_f$  estão localizados nos mesmos pontos representados na Figura 13 por  $\sigma_s$  e  $\sigma_f$ , que são respectivamente as tensões que indicam o intervalo onde a reorientação da martensita ocorre. Quando se retira o carregamento mecânico em C, a SMA possui uma deformação considerável em D e apresenta configuração de martensita não-maclada. Do ponto D, aumenta-se a temperatura até que o material comece a restituição de forma a partir do ponto E ( $T_{As}$ ), que caracteriza o início da transformação de fase austenítica (A) até o ponto F ( $T_{Af}$ ), onde constitui-se o final da transformação. Após o aquecimento em A e a transformação total da fase martensítica, é cessada a fonte de calor, resfriando o material até B, caracterizando o fechamento do ciclo.

### 3.2.2 – Efeito Pseudoelástico

O comportamento pseudoelástico pode ser obtido ao se aplicar um carregamento mecânico isotérmico com temperatura acima de  $T_{Af}$  na liga com memória de forma na fase austenítica. O carregamento mecânico trativo induz a transformação de fase de austenita para martensita não-maclada (induzida por tensão), com isto o material apresenta uma deformação que pode ser recuperada ao se remover o carregamento mecânico, voltando à fase austenítica. Na Figura 14 é possível perceber a semelhança com o EMF. O gráfico representa o chamado laço de histerese do material. A área delimitada pela histerese expressa a energia absorvida durante o processo. A deformação produzida pela aplicação de tensão é recuperada com o descarregamento (KRISHNAN *et al*, 1974).

As deformações pseudoelásticas podem chegar a deformações reversíveis de até 10% em certas ligas, sendo 8% um valor típico para as ligas Ni-Ti. Ao comparar estas deformações recuperáveis das SMAs à deformação recuperável típica dos materiais convencionais de engenharia, que corresponde à deformação elástica destes materiais, pode-se ter uma ideia de como é único o comportamento das SMA (WAYMAN *et al*, 1990).

A Figura 14 ilustra a curva tensão-deformação superelástica/pseudoelástica e memória de forma.



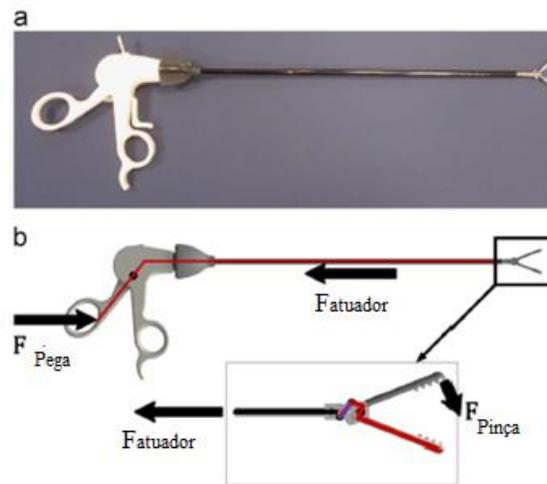
**Figura 14:** Curva tensão-deformação superelástico/pseudoelástico e efeito de memória de forma (RAO *et al.*, 2015)

### 3.3 – Atuadores com SMA

Koç *et al.* (2016) desenvolveram um mecanismo que atuasse como pinça laparoscópica, utensílio utilizado na medicina em cirurgias onde é necessária a movimentação ou manipulação de algum tecido. A força impressa na pinça deve ser suficiente para segurar com firmeza o tecido em questão, contudo, a força deve ser controlada a fim de evitar danos desnecessários ao tecido de interesse.

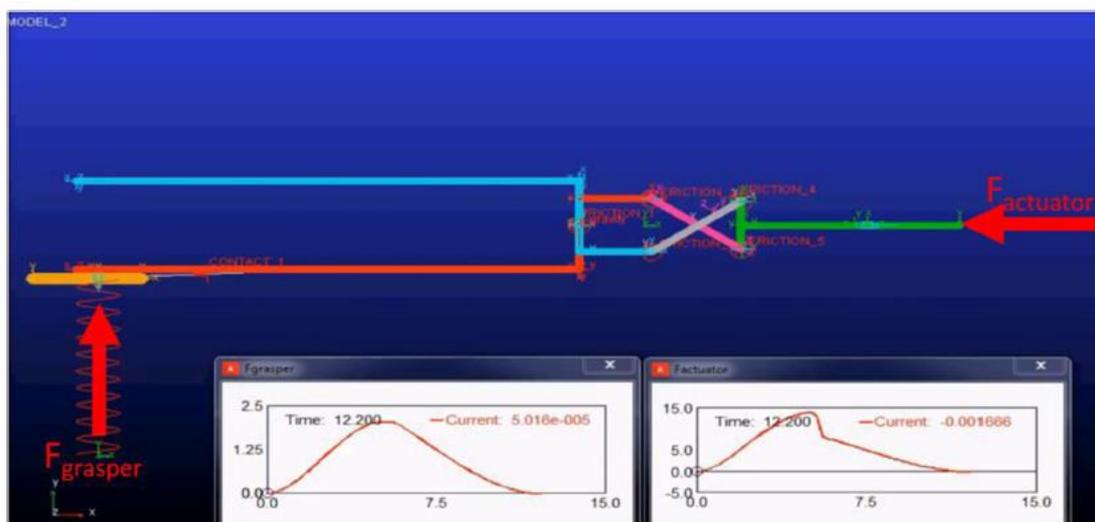
Pinças laparoscópicas convencionais têm três partes: alça, eixo central e mandíbula (mandíbula geralmente angular). É importante enfatizar que a força de aperto é transmitida através do eixo que funciona como atuador. Considerando os aspectos mecânicos do instrumento de agarrar, o atuador desempenha um papel fundamental no controle da força da mandíbula.

A Figura 15 demonstra o mecanismo proposto.



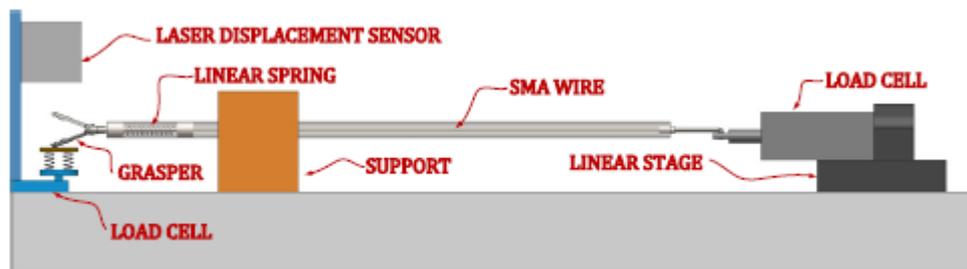
**Figura 15:** Pinça laparoscópica convencional com mecanismo angular de agarrar (a). O mecanismo de agarrar onde a força de pinça ( $F_{pinça}$ ) é aplicada por cirurgiões, e a força do atuador ( $F_{atuador}$ ) é obtida no eixo central. Como resultado, a força de aperto ( $F_{pega}$ ) é alcançada dentro do grampo (b) (KOÇ *et al.*, 2016).

Na Figura 16 é possível entender como funciona o mecanismo que permite o fechamento da pinça laparoscópica convencional. A força do atuador é aplicada no eixo central do modelo. Como resultado, a força de aperto é conseguida na ponta do aperto que provoca contração na caixa de mola dependendo da força para todas as posições angulares da pinça.



**Figura 16:** Modelo numérico da configuração experimental em um programa de simulação dinâmica de múltiplos corpos (ADAMS). (KOÇ *et al.*, 2016).

Os autores então propuseram uma pinça inteligente que atua com o auxílio de uma mola de aço e um fio de *SMA* que substitui a função do eixo no equipamento convencional, como pode ser visto na Figura 17. As leis obtidas para controle foram a *proportional-integral-derivative (PID)* e *sliding mode controller (SMC)* com diferentes controles de ganho de força para que não se danifique o tecido. A ativação do fio *SMA* é obtida com a tensão de acionamento, obtida a partir do circuito de acionamento do *SMA*. O fio de *SMA* gera a força do atuador, resultando em uma força de aperto que é medida por uma célula de carga colocada embaixo da garra. O valor da força de aperto medida retorna ao programa definido pelo usuário, que resulta em uma geração de entrada de controle pelos controladores (*PID*, *SMC*) dependendo do erro entre a força de aperto desejada e medida (KOÇ *et al.*, 2016).



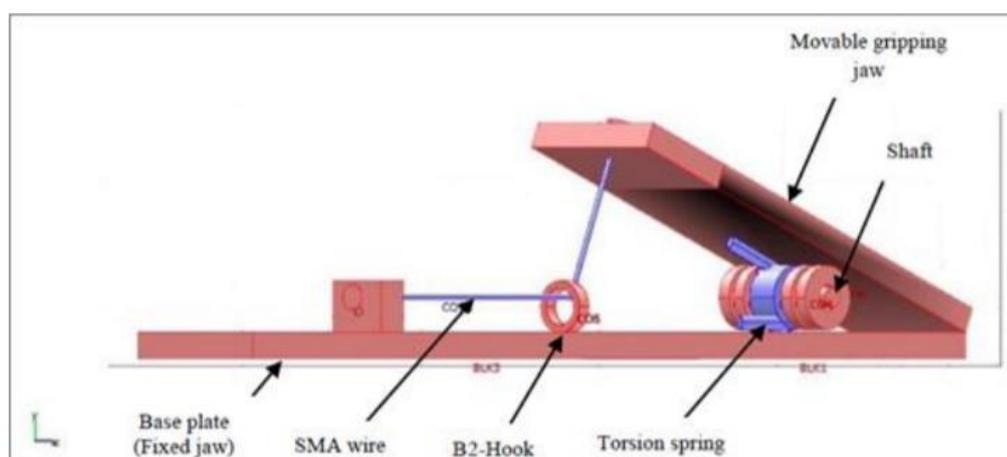
**Figura 17:** Configuração experimental com o atuador inteligente projetado para controlar a força de aperto (KOÇ *et al.*, 2016).

Chaitanya e Dhanalakshmi (2014) também propuseram um atuador onde fio de *SMA* e mola funcionam em conjunto para o funcionamento de uma espécie de garra. Esse, diferentemente de Koç *et al* (2016) já possui aplicações mais amplas haja vista todos os mecanismos envolvidos em automação industrial, montagem de peças, movimentação de embalagens, etc. Nesse mecanismo a mola em questão é de torção e faz com que a garra fique normalmente aberta. O fio de *SMA* que tem uma extremidade presa na parte superior da garra e outra ponta em um suporte fixo, atua no mecanismo de forma a fechá-lo quando atuado, e assim, é estabelecido o modo de funcionamento do atuador.

De acordo com Chaitanya e Dhanalakshmi (2014), atuadores constituídos apenas com uma liga de memória de forma ou com *SMA*s antagonistas se enquadram em apenas dois modos de funcionamento para operações de pega: o modo de fechamento e o modo de abertura.

- O modo de fechamento ou *closing mode* é quando o elemento atuador (*SMA*) é usado para fechar a garra do equipamento, e o elemento de restituição atua contrariamente o movimento da liga, isto é, proporciona energia para a realização de um movimento contrário ao movimento realizado pela liga.
- O modo de abertura ou *opening mode* funciona exatamente ao contrário do anterior. Neste, o elemento de memória de forma é utilizado de forma a abrir e soltar algum objeto, tomando o exemplo de garra. Já o elemento de restituição (uma mola de torção) mantém a garra fechada o que possibilite que esse tipo de configuração seja utilizado como componente que possibilite segurar objetos e mantê-los por mais tempo.

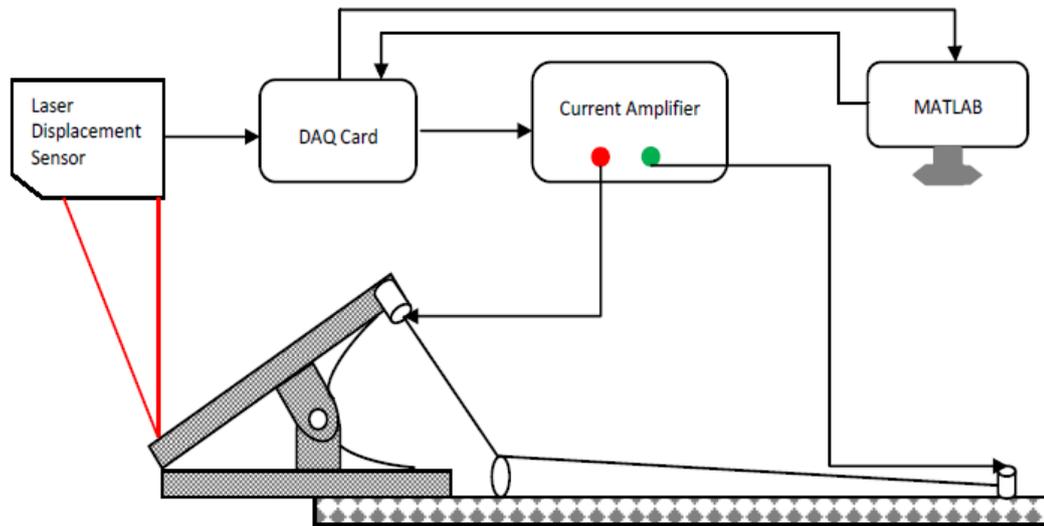
Na Figura 18 é possível observar o mecanismo que consiste em uma base que constitui uma das duas partes da garra, um suporte fixo, o fio de *SMA*, um gancho para guiar o fio, a mola de torção na articulação da garra.



**Figura 18:** Modelo CAD de garra com fio de *SMA* e mola de torção (CHAITANYA e DHANALAKSHMI, 2014)

O princípio da pinça é converter o deslocamento linear do fio de *SMA* atuador para o deslocamento angular do maxilar de aperto. Durante a atuação, o fio de *SMA* é aquecido e puxa a parte móvel da garra, exercendo uma força de compressão na mola de torção. A *SMA* gera uma força oposta à força da mola de aço fazendo com que a mesma acumule energia. A garra retorna para a posição inicial quando o fio é resfriado fazendo com que a mola de torção

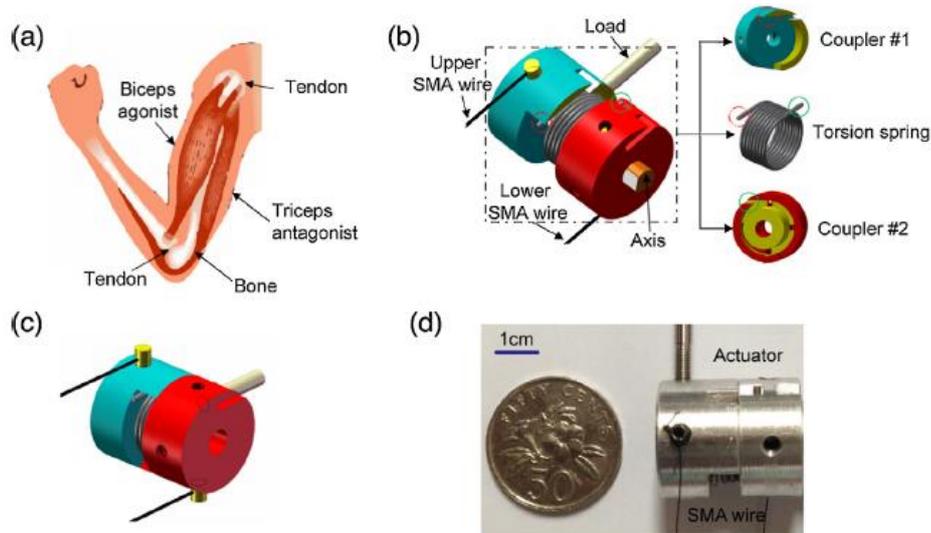
fecha novamente o mecanismo. Um desenho esquemático do aparato experimental pode ser observado na Figura 19.



**Figura 19:** Esquema experimental (CHAITANYA e DHANALAKSHMI, 2014).

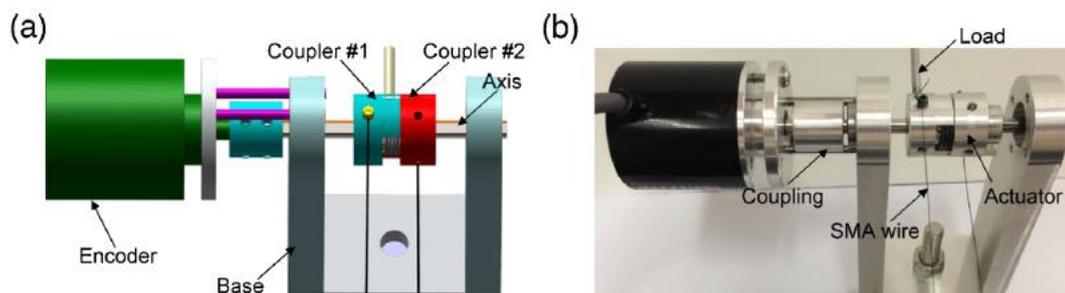
A Figura 20 mostra os componentes de controle do mecanismo que são o sensor de deslocamento da parte superior da garra, um amplificador de corrente que fica conectado ao fio de *SMA*, um sistema de aquisição de dados e a interface do usuário em MatLab que controla o comportamento do fio.

Já Guoa *et al.* (2015) aplicam o uso de um atuador inteligente em um protótipo que imita o cotovelo humano. O protótipo apresenta duas peças cilíndricas acoplada que possuem uma mola de torção internamente posicionada. Dos fios de *SMA* se conectam um em cada parte acoplada. Os fios antagônicos têm por objetivo tentar reproduzir o papel dos músculos do braço humano. A força de contração ativa produzida pelo fio *SMA* pode ser transmitida de um acoplador para o outro pela mola de torção. Neste projeto, selecionamos uma mola de torção macia. Sua rigidez é menor do que a dos fios *SMA*. A mola de torção tem duas funções: uma é armazenar a energia e fornecer a força de recuperação para o fio *SMA*; o outro é reduzir a rigidez total do atuador. A Figura 20 mostra uma comparação entre a articulação humana e o atuador e as partes do mecanismo.



**Figura 20:** (a) Estrutura da articulação do cotovelo humano; (b) o modelo mecânico de articulação humana bio-inspirado proposto, dois fios de *SMA*, dois acopladores e um jogo de mola de torção como músculos, ossos e tendões antagonizáveis, respectivamente; (c) o design integrado no modelo CAD e (d) o protótipo do atuador *SMA* diferencial compatível (GUOA *et al.*, 2015).

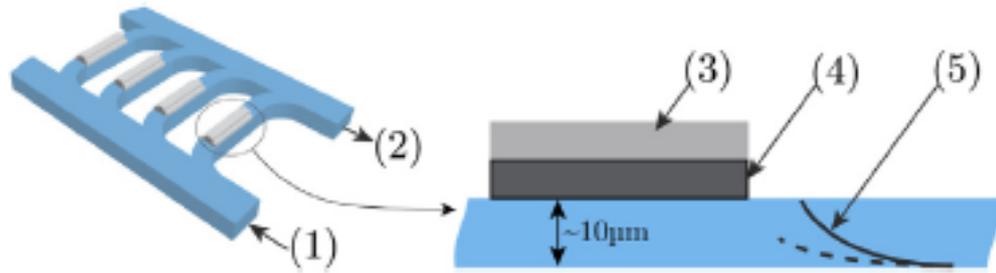
Um banco de teste experimental foi projetado para avaliar o desempenho desse atuador *SMA* diferencial e é apresentado na Figura 21. O atuador é montado em uma base, apoiado em dois rolamentos dos dois lados. O acoplador # 1 é fixado no eixo por um pequeno parafuso (não mostrado nesta imagem), enquanto o acoplador # 2 pode girar livremente em torno do eixo. Um codificador está conectado ao eixo por acoplamento. O ângulo de rotação do eixo pode ser medido pelo codificador. Isso significa que a posição da carga e do acoplador # 1 pode ser inserida. O processo de trabalho deste atuador é descrito como segue: quando o fio *SMA* superior é ativado por aquecimento, o acoplador # 1 gira devido à força de contração ativa do fio *SMA*, a carga segue a rotação do acoplador nº 1, de modo que a torção A mola começa a torcer e transmite a força ativa do acoplador nº 1 ao acoplador nº 2, o fio *SMA* inferior será esticado para restringir a rotação, por contraste, quando o fio *SMA* mais baixo for aquecido para se contrair, a força ativa é transmitida na direção oposta. Com base neste princípio, podemos aquecer o fio de *SMA* antagonista e esfriar o oposto para aumentar a velocidade de resposta desse atuador.



**Figura 21:** Modelo em CAD e (b) banco de teste experimental (GUOA *et al.*, 2015).

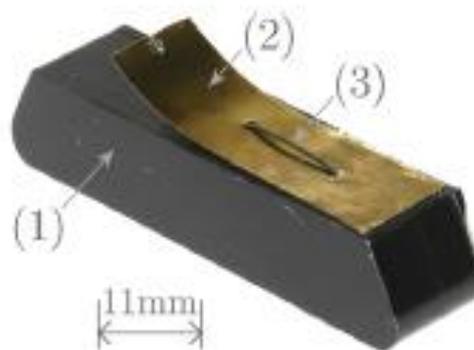
Apesar de existirem muitas aplicações para atuadores inteligentes que utilizam *SMA* na configuração de fios e molas, outras geometrias também são amplamente exploradas. Waddell *et al.* (2015) desenvolveram um micro atuador para sistemas eletrônicos que possibilita funções de maior potência.

Atualmente, os módulos termoeletrônicos locais (TEM) são usados para controlar a temperatura dos arranjos de laser dentro de PICs. Uma melhora significativa é o uso de um refrigerante de micro-canais incorporado ao sistema de chips para realizar a convecção do calor, reduzindo o lado quente do TEM e conseqüentemente a potência requerida pelo TEM. Este sistema é representado na Figura 22. O fluxo entra através de uma única entrada (1), se divide em ramos individuais sob as barras de laser em uma matriz e depois se recombina na saída (2). O coeficiente de transferência de calor no micro-canal sob uma barra laser individual (3) e TEM (4) é controlado usando uma micro-válvula (5) localizada à jusante. Durante um período de aumento da carga de trabalho dos chips, a temperatura do lado quente do TEM seria maior, aumentando o poder exigido pelo TEM para gerar esta temperatura diferencial. Percebendo um aumento na temperatura média do refrigerante, a micro-válvula se abriria para permitir um maior fluxo no canal e esfriar o lado quente TEM, assim aumentando a eficiência do sistema.



**Figura 22:** Armação a laser com sistema de refrigeração microfluídica integrado. (1) Fluxo; (2) fluxo Fora; (3) barra laser individual; (4) TEM local; e (5) SMA passivo (WADDELL *et al.*, 2015).

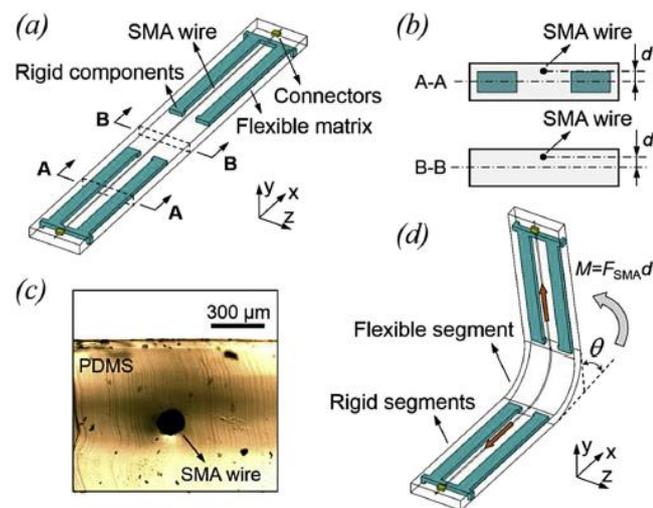
O protótipo da válvula foi desenvolvido a partir de Ni-Ti equiatômico como é o mais amplamente estudado e compreendido das *SMA*s. A Figura 23 mostra a válvula protótipo desenvolvida. A válvula fica em uma base de acetato (1) que encaixa no equipamento de teste de canal em miniatura. O corpo principal da válvula e o responsável pela obstrução quando fechada é uma lâmina de aço inoxidável curvado de 127 µm de espessura (2). Inserido na lâmina de aço um fio atuador de Ni-Ti de 0,4 mm com uma temperatura  $T_{Af}$  de 40 °C.



**Figura 23:** Válvula *SMA* Protótipo. (1) base de acetato; (2) mola de aço inoxidável; (3) NiTi fio do atuador (WADDELL *et al.*, 2015).

A válvula, normalmente fechada, é aberta pela *SMA* quando aquecida. Como o propósito da válvula na aplicação final era modificar o fluxo de refrigerante, não foi necessário selar o canal quando totalmente fechada. Para permitir o fluxo quando totalmente fechada, a válvula foi afinada deixando os dois lados seções livres (WADDELL *et al.*, 2015).

Mais um exemplo de atuadores de *SMA* com elementos flexíveis é o protótipo desenvolvido por Wang *et al.* (2016). Neste trabalho é proposto um mecanismo de dobradiça auto-flexível que é capaz de gerar uma deformação de flexão pura e discreta usando um fio *SMA* em uma matriz flexível com componentes rígidos embutidos. O mecanismo para este atuador baseia-se na atuação do fio de *SMA* pré-tensionado, colocado com uma excentricidade do plano neutro ao longo do comprimento do atuador. A configuração do atuador proposto é mostrada na Figura 24, onde uma matriz macia contém segmentos rígidos e o fio de *SMA*.



**Figura 24:** Esquema do atuador antes da atuação (a). Seções transversais do atuador (b). Imagem mostrando *SMA* embutida na matriz PDMS (c). Esquema do atuador durante atuação (d) (WANG *et al.*, 2016).

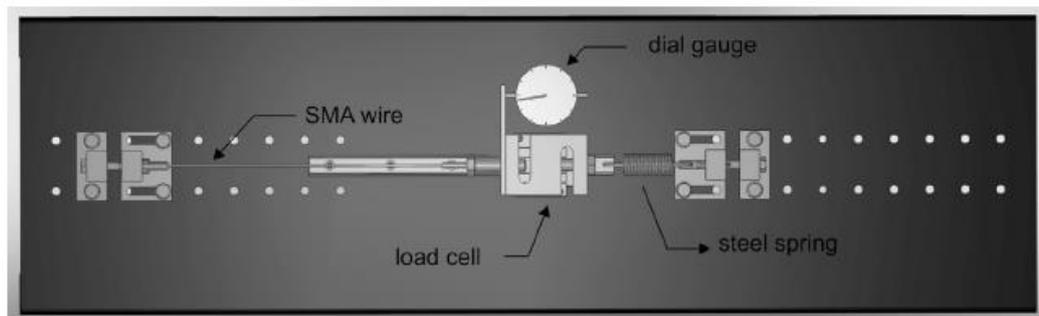
Na Figura 24 (a), um atuador com uma única dobradiça e dois segmentos rígidos é ilustrado e, de modo semelhante, o atuador com dobradiças múltiplas pode ser fabricado por incorporação de múltiplos componentes rígidos em toda a estrutura. Os esquemas das seções transversais do atuador A-A, do segmento rígido e B-B do segmento flexível são mostrados na Figura 24 (b), que mostra a layout dos componentes, incluindo a distância excêntrica do *SMA* ao plano médio geométrico. Aplicando uma corrente elétrica no fio pré-tensionado, sua temperatura aumenta através do Efeito Joule e, quando atinge a temperatura de transição de fase da austenita, o fio *SMA* começará a se contrair na matriz. Curvando a matriz, é fornecido ao mesmo um canal natural que não só pode permitir a contração do fio ao longo do comprimento do atuador, mas também pode manter sua posição constante no plano de seção transversal. Uma imagem na Figura 24 (c) mostra uma polarização de microscópio (BX51-P,

Olympus) mostra o fio *SMA* incorporado na matriz flexível de polidimetilsiloxano (PDMS). Dentro essa Figura, pode-se ver que a posição do fio de *SMA* é mantida na posição projetada (WANG *et al.*, 2016).

Devido ao grande estresse de contração do fio *SMA*, ambas as extremidades do fio *SMA* foram apertadas usando conectores de cobre que também estão incorporados na matriz para evitar o deslizamento entre as duas extremidades do fio de *SMA* e a matriz. Quando contraído dentro da matriz, o plano descentralizado do fio irá produzir um momento de flexão  $M = FSMA \times d$  onde  $FSMA$  é a força de contração gerada pelo fio de *SMA*. Por causa do momento fletor, uma grande deformação será concentrada no segmento flexível pois o segmento rígido de maior rigidez não pode ser dobrado. A configuração do atuador após a atuação com um ângulo de flexão de  $q$ , é mostrado na Figura 24 (d) (WANG *et al.*, 2016).

Depois do fio de *SMA* esfriar abaixo da temperatura de transição da fase austenita, a estrutura começa a recuperar seu formato original devido à força de recuperação elástica da estrutura dobrada.

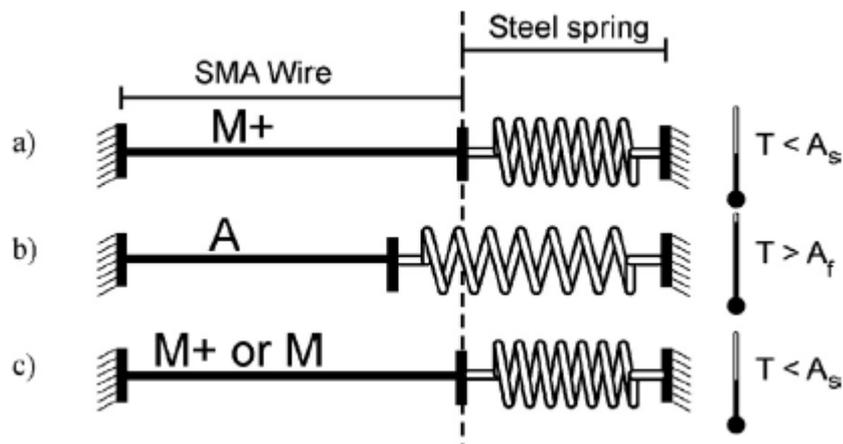
Silva *et al.* (2013) avaliou a influência da taxa de aquecimento na performance de um atuador de *SMA*. Esta investigação também utilizou uma configuração fio de *SMA* e mola de aço para avaliar as taxas de aquecimento, como mostra a Figura 25. Foi utilizado um fio de Nitinol (54.8% Ni e 45.2% Ti) com 1,71 mm de diâmetro e 10,0 cm de comprimento.



**Figura 25:** Aparato experimental para análise do atuador de *SMA* (SILVA *et al.*, 2013).

Na Figura 25, observa-se que entre o fio e a mola encontram-se uma célula de carga para possibilitar a medição da força que está atuando sobre o fio pela mola de aço e um sensor de deslocamento que acusa a deformação do fio de *SMA*. Para a realização do teste, o fio deve

estar no estado martensítico associado à fase não-maclada, isto é, o fio deve estar deformado em um estágio inicial. Quando o fio é atuado, por Efeito Joule, a mola se deformará, estabelecendo um movimento antagônico à recuperação do fio de *SMA*. Assim, o movimento é estabelecido pois ora o fio estará no estado austenítico, recuperando-se até o comprimento inicial, ora resfriará, tornando-se martensítico. Um esquema de funcionamento do mecanismo pode ser visto na Figura 26.



**Figura 26:** Esquema de teste experimental (SILVA *et al.*, 2013).

Para a atuação do sistema foi utilizada uma fonte de corrente contínua para o aquecimento deste por Efeito Joule e para a medição da temperatura, os pesquisadores utilizaram de uma câmera termográfica que possibilitou saber as taxas de aquecimento do fio.

### 3.4 – Ligas de Memória de Forma na Indústria *Offshore*

O desenvolvimento de tecnologias na indústria *offshore* permanece em constante expansão devido ao seu alto potencial de lucratividade. Entretanto, com objetivos cada vez mais desafiadores, como por exemplo a exploração de reservatórios cada vez mais profundos, essas tecnologias estão expostas a condições de trabalho cada vez mais extremas e complexas.

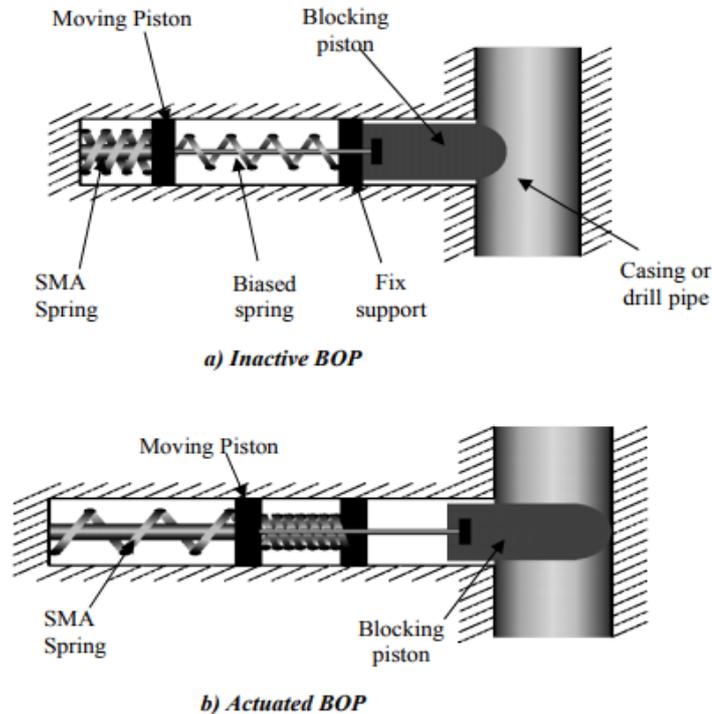
As aplicações com *SMA* podem significar e tem significado boas soluções no campo *offshore*, providenciando ambientes mais seguros e eficientes. As aplicações dessas ligas

possuem as mais diversas finalidades como atuadores, agentes vedantes, reforços estruturais, dentre outros.

A função *Blowout Preventers (BOPs)*, controla o fluido hidráulico pressurizado através de meios eletrohidráulicos puramente hidráulicos, eletrohidráulicos ou multiplexos. As *BOPs* puramente hidráulicas podem não ser confiáveis devido a atrasos de tempo, profundidade e temperatura, problemas mecânicos ou danos. Enquanto os sistemas eletrohidráulicos eliminam o problema do lapso de tempo, eles introduzem componentes de transmissão de sinal volumosos e complexos para o já existente sistema (SONG *et al.*, 2013).

A pressão efetiva criada pelo cilindro *BOP* reduz-se drasticamente na proporção da profundidade subaquática da *BOP*. Isso aumenta indiretamente o número necessário de acumuladores de alta pressão e aumenta a pressão de pré-carga de gás. Como resultado, as *BOPs* tradicionais são sistemas caros, ineficientes e volumosos. Além disso, o atraso introduzido pela linha de controle hidráulico da plataforma pode ser maior que os padrões da API. A *BOP* às vezes pode ficar presa na posição fechada após a ativação (SONG *et al.*, 2008).

Por outro lado, os *SMA*s podem ser usados para produzir uma nova geração de *BOPs*, com componentes econômicos, mais rápidos e compactos, como mostra a Figura 27.



**Figura 27:** Esquemática de mecanismo de molas SMA em sistema BOP (SONG *et al.*, 2010).

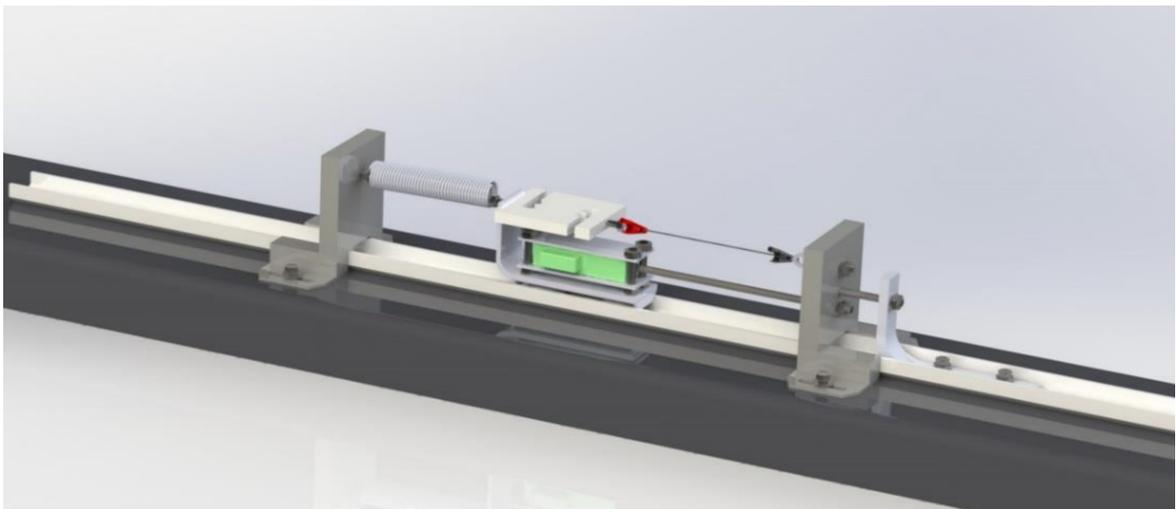
Dois métodos foram encontrados em literatura de patentes e pesquisas que descrevia uma *BOP* dirigida por *SMA*. Em um método encontrado na literatura de patentes, as molas de compressão *SMA* ativadas geram forças para empurrar um pistão de bloqueio para desligar o poço. O segundo método, que ainda está em sua fase de protótipo, utiliza um cabo *SMA* para mover a RAM (possui função de fechar a passagem do fluido pelo tubo) na posição de desligamento para evitar uma explosão. Em ambos os casos, o controle é conseguido ajustando a corrente elétrica fornecida ao *SMA*. Depois que o *SMA* esfria (após a desativação), as molas de polarização reposicionam o sistema em seu estado aberto original. A Figura 27 (a) mostra que quando a *BOP* está inativa, a mola *SMA* é comprimida e o pistão de bloqueio é aberto por uma mola inclinada. Quando o *BOP* é ativado energizando a mola *SMA*, ele superará a força gerada pela mola esticada e moverá o pistão de bloqueio para a direita, fechando assim o poço e evitando uma explosão (SONG *et al.*, 2010).

## Capítulo 4 – Experimento

Este capítulo apresenta toda a metodologia de testes, o funcionamento do aparato experimental e como prepará-lo para os testes. O objetivo do experimento foi avaliar como os parâmetros associados ao atuador se comportariam com as diferentes configurações de fio-mola a fim de alcançar maiores deslocamentos.

### 4.1 – Aparato Experimental

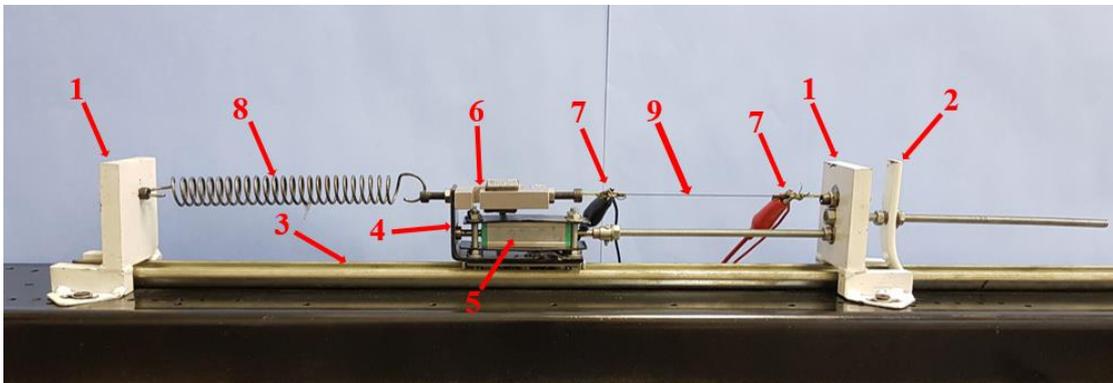
Foi elaborada uma bancada de ensaios experimentais, onde fosse possível a realização de ensaios com precisão e confiabilidade. Essa bancada permite que a deformação do fio seja feita de forma gradual e controlada a fim de não ultrapassar os limites de escoamento do fio de SMA. Além disso, é possível a utilização de molas com diferentes valores de  $k$ , comprimentos e diâmetros variados, possibilitando o estudo de diferentes configurações fio de SMA-mola. Na Figura 28 é possível ver uma modelagem em 3D, feito no *software* SolidWorks 2016. A bancada real, utilizada em laboratório pode ser vista na Figura 29.



**Figura 28:** Desenho do aparato experimental. Software utilizado: SolidWorks 2016.

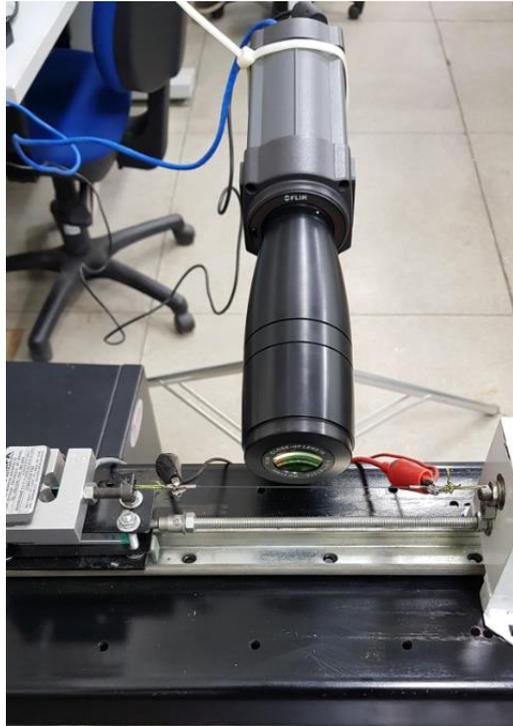
Como ilustrado na Figura 29, o aparato experimental é constituído pelas seguintes partes:

1. Bases laterais móveis;
2. Suporte fixo;
3. Trilho;
4. Suporte móvel(carrinho);
5. Sensor de deslocamento;
6. Célula de Carga;
7. Circuito de CC;
8. Mola Convencional de Aço;
9. Fio de SMA.



**Figura 29:** Bancada de teste para atuador fio-mola.

A Figura 30 mostra a câmera termográfica Flir A320 utilizada durante os ensaios com a finalidade de extrair as informações acerca da temperatura no fio durante o experimento.



**Figura 30:** Câmera termográfica Flir A320.

## 4.2 – Metodologia Experimental

Nas seções subseqüentes serão descritas as etapas que consistem na preparação do aparato experimental para a realização dos testes do atuador fio-mola e um detalhamento sobre as informações que foram analisadas.

### 4.2.1 – Metodologia

É necessário um conjunto de passos para a realização do ensaio. Primeiramente, antes de preparar o experimento propriamente dito, é necessário determinar a carga trativa que será imposta na mola a fim de garantir a maior eficiência. Após a determinação, a mola deve ser deformada, com a fixação do aparato de teste (suporte móvel e bases laterais). A seguir, a preparação segue como mostra a Figura 31.

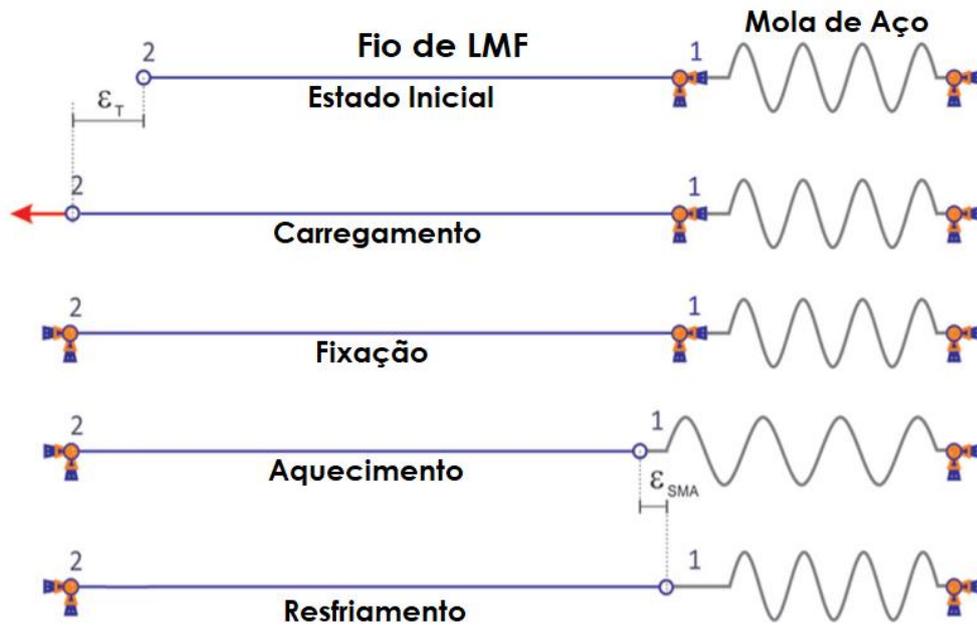


Figura 31: Procedimento de teste (SILVA et al., 2013 - Modificado).

O fio é deformado de forma controlada, o que na Figura 31 é representado pelo deslocamento do ponto 2 quando o ponto 1 é mantido fixo. Essa deformação é feita de forma a induzir a transição da martensita do estado maclado ( $M^t$ ) para não-maclado ( $M^d$ ), e a deformação é mantida fixando o ponto 2. O ponto 1, que na bancada de teste representa a posição do carrinho sobre trilhos, é solto também, permitindo o início da interação fio-mola. Após isso, se estabelecem os ciclos de aquecimento ( $T_{As}$  e  $T_{Af}$ ), e resfriamento até que a liga se apresente na configuração  $M^d$ , passando por  $M^d$  devido à carga assistida provinda da mola. Assim, o atuador fio-mola é estabelecido pois admitirá o comportamento definido pelas duas últimas linhas da Figura 31, ora o ponto 1 deslocando-se para a esquerda devido à transformação austenítica do fio, ora o ponto 1 deslocando-se para a direita pela ação da mola e fio em temperatura ambiente sofrendo a transição martensítica.

#### 4.2.2 – Preparação do Aparato Experimental

A Seção 4.1 apresentou como o experimento deve ser conduzido para efetuar os testes do atuador fio-mola, contudo, a preparação experimental possui algumas particularidades que são essenciais para o funcionamento do experimento, que serão descritas a seguir.

Primeiramente é necessário garantir que o fio não possua nenhuma deformação proveniente de testes anteriores, assim, em um primeiro momento, aquece-se o fio por meio da fonte de corrente contínua até acima de  $T_{Af}$  e esse patamar é mantido por aproximadamente 30 segundos, a fim de garantir deformação inicial zero e atinja a fase austenítica. Após isso, o fio é resfriado voltando a fase martensítica e, então, é iniciada a preparação da bancada.

Depois que o fio atinge seu comprimento inicial (sem deformação), começa-se a posicionar a mola. Para isso, é necessário que se prenda o carrinho através de um pino, sem folga, impedindo que a força proveniente da deformação da mola se propague para o fio que, até esse momento, não possui deformação. Depois do carrinho fixado, o que caracteriza um engaste, é possível deslocar uma extremidade da mola até que se atinja a força desejada.

Com a mola fixada em sua posição ideal, ajusta-se o fio de SMA. Como o carrinho ainda está fixado no trilho, o mesmo também desempenha um papel de engaste para uma das extremidades do fio. A Base Lateral Móvel que possui a outra extremidade do fio é puxada através de uma barra roscada que está apoiada em um Suporte Fixo atrás da Base Lateral Móvel, permitindo que a mesma translade e deforme o fio o tanto quanto se queira. Por precaução, a deformação do fio foi limitada em 8% (8 mm) para evitar deformações plásticas. Atingida a deformação, o fio é aliviado a fim de ocorrer a recuperação  $\epsilon_E$  como mostra a terceira linha da Figura 31.

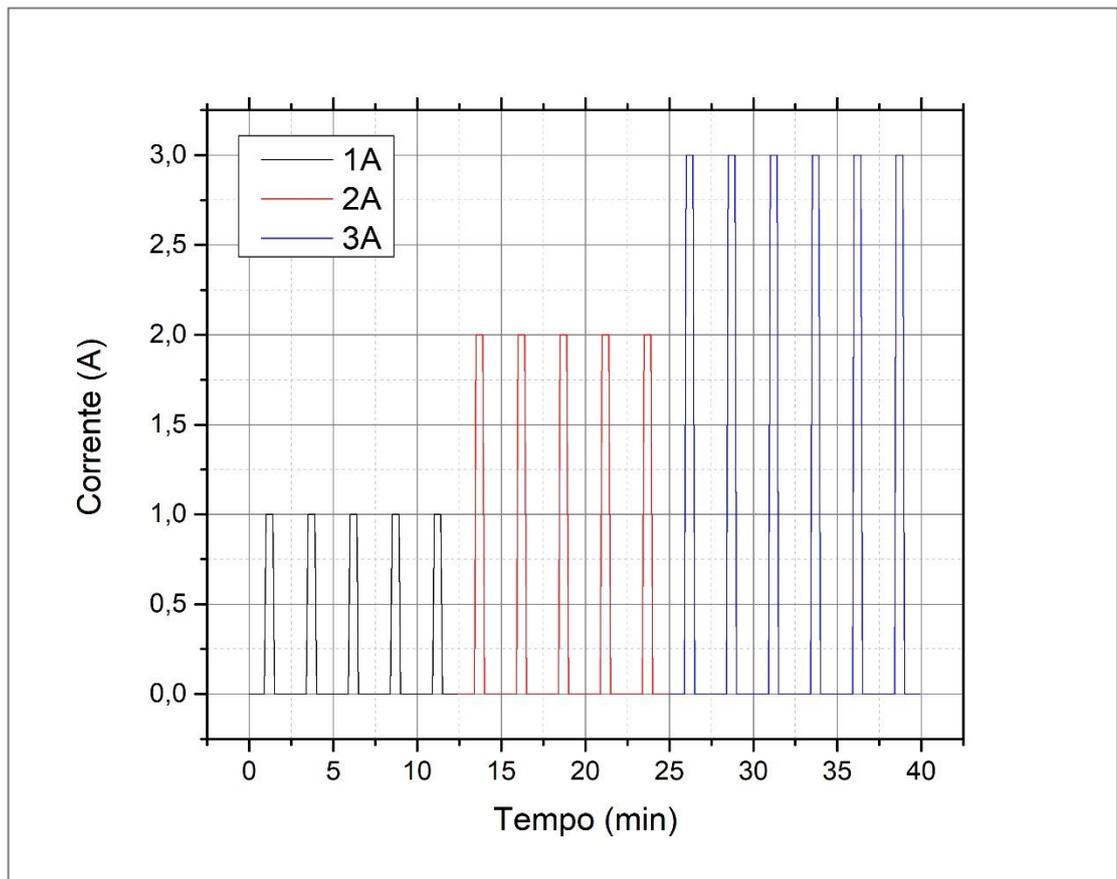
Após esses passos, tanto a mola quanto o fio encontram-se em suas devidas configurações, permitindo assim, a retirada do pino que fixa o carrinho no trilho, deixando-o livre e com baixo atrito. É nesse momento que a mola começa a exercer força no fio de SMA. O cuidado na escolha do deslocamento prévio da extremidade da mola é essencial pois se for feita em excesso a força exercida no fio, após a liberação do carrinho, pode causar

deformações plásticas pois o fio já estará deformado. Por fim, é acionada a fonte de Corrente Contínua para efetuar os ciclos térmicos e permitir as transformações de fase do fio de SMA.

#### 4.2.3 – Carregamentos Térmicos

Após a preparação descrita na subseção 4.2.2 dá-se início ao teste propriamente dito. Foram escolhidas três intensidades de corrente elétrica para a análise, 1A, 2A e 3A.

Para cada intensidade de corrente foram programados 5 ciclos, totalizando 15 ciclos térmicos por mola testada. Abaixo segue a Figura 32 que exemplifica os ciclos efetuados.



**Figura 32:** Ciclos de corrente elétrica.

Como pode ser observado na Figura 32, os ciclos possuem a duração de 2,5 minutos, sendo 1 minuto sem corrente, 30 segundos na intensidade de corrente determinada e mais 1

minuto para o resfriamento. Para dois ciclos em sequência o tempo de resfriamento passa a ser 2 minutos, ou seja, entre cada aporte térmico foi determinado um tempo de 2 minutos para que a temperatura do fio voltasse à temperatura ambiente.

O Capítulo 5 apresenta os gráficos gerados a partir do momento do acionamento da fonte de CC.

### 4.3 – Equipamentos Utilizados

Foram utilizados sensores com a finalidade de se extrair informações sobre a carga, deslocamento e a temperatura no fio de *SMA* durante os ensaios experimentais. Tais sensores serão detalhados nas seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3. Além disso, foi utilizado uma fonte de alimentação elétrica, um *hardware* de aquisição de dados.

#### 4.3.1 – Transdutor de Força

O transdutor de força, ou célula de carga, possui como finalidade medir a aplicação de uma força em um sistema, transformando essa informação em um sinal elétrico, podendo ser convertido em medida de força após a calibração do instrumento. Sua aplicação é muito abrangente, sendo utilizado em balanças comerciais e em pesagens em geral, muito presente em processos de automatização e controle de processos industriais.

A célula de carga utilizada no estudo é do fabricante Alfa Instrumentos, modelo SV-20, com uma capacidade nominal de até 20 kgf. A célula de carga pode ser vista na Figura 33.



**Figura 33:** Célula de carga.

#### 4.3.2 – Transdutor Linear de Posição

Um transdutor de posição converte variações de movimento em sinais elétricos. Existem diferentes transdutores de posição, sendo eles lineares ou rotativos, além de existirem em formatos analógicos ou digitais, dentre outras características.

A medição de deslocamento indica a direção de movimento. O sinal de saída do sensor de deslocamento linear é a medição da distância que um objeto se deslocou em unidade de milímetros (mm), ou polegadas (in.), e pode ter um valor positivo ou negativo.

O modelo utilizado na pesquisa foi o PY-1-F-025-S01M, da fabricante GEFRA. O sensor possui fundo de escala de uma (01) polegada ou 25,4 mm. A Figura 34 mostra o sensor utilizado na pesquisa.



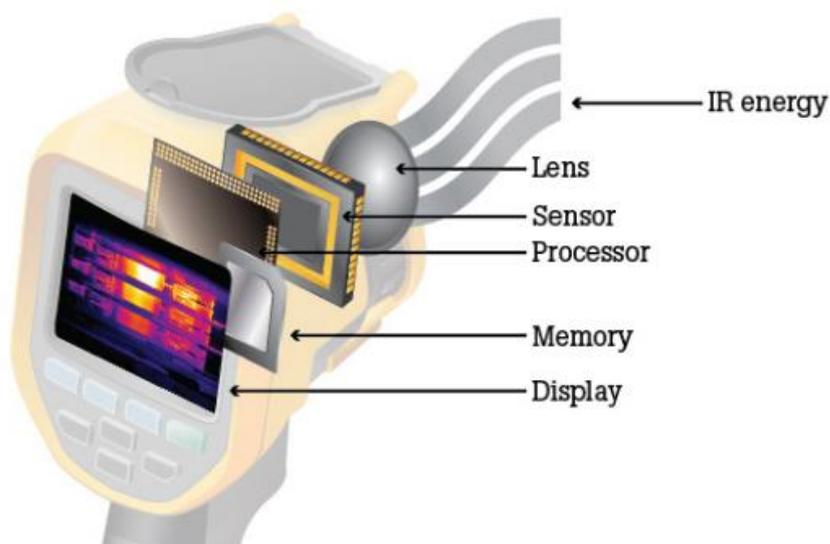
**Figura 34:** Sensor de deslocamento.

### 4.3.3 – Câmera Termográfica

As câmeras infravermelhas, também conhecidas como câmeras termográficas, possuem a especial característica de detectar e mensurar a energia infravermelha de objetos, convertendo a informação em sinal eletrônico, podendo ser visualizado a partir de um *display*. Todos os objetos emitem energia infravermelha, ou assinatura de calor.

O calor detectado por uma câmera infravermelha pode ser quantificado ou medido com precisão, permitindo o monitoramento, não apenas do desempenho térmico, mas também a identificação e avaliação do objeto/sistema.

Uma câmera termográfica possui um sistema óptico que detecta o calor a partir de um sensor especial que contém milhares de pixels detectores arranjados em uma grade e cada um deles irá identificar a energia infravermelha e produzir um sinal eletrônico. O sinal é enviado para o processador da câmera e a partir de cálculos matemáticos, todos os dados necessários para a análise serão originados. Posteriormente, a informação será enviada para a memória e para o *display*, possibilitando o usuário a visualizar o conteúdo em forma de imagem. A Figura 35 ilustra o passo a passo.



**Figura 35:** Partes da Câmera Termográfica (Fluke).

As câmeras infravermelhas possuem inúmeras finalidades, possuindo câmeras projetadas com fins específicos, com linhas domésticas e industriais. A Figura 36 ilustra a utilização de câmeras durante serviços de manutenção preditiva.



**Figura 36:** Exemplo de Termografia (Flir).

A câmera utilizada nos experimentos é o modelo A320, da fabricante Flir Systems, em conjunto com a lente FLIR T197274 Lente Close-up, 1X Wd e foi utilizada uma taxa de aquisição de 5 Hz. A Figura 37 ilustra o modelo de câmera termográfica utilizada no estudo.



**Figura 37:** Conjunto câmera termográfica Flir A320 e lente.

#### 4.3.4 – Fonte de Alimentação Elétrica

A fonte de alimentação possui a função, dentro do estudo, de controlar a corrente elétrica inserida no fio, aquecendo-o a partir do Efeito Joule.

A fonte utilizada no estudo foi a da fabricante TOELLNER, modelo TOE8951, que permite ser controlada remotamente, a partir de um *software*, ou a partir da sua própria interface, possibilitando a configuração de cada passo do experimento, especificando o tempo e a corrente utilizada em cada um dos passos. A fonte utilizada pode ser vista na Figura 38.



**Figura 38:** Fonte de alimentação elétrica.

#### 4.3.5 – Sistema de Aquisição de Dados

O *hardware* utilizado na aquisição de dados foi o HBM-Spider8. Tal sistema é capaz de monitorar e registrar informações a partir de uma taxa de aquisição. A taxa de aquisição utilizada no estudo foi de 600 Hz. O Spider8 possui oito canais, possibilitando que até oito variáveis possam ser acompanhadas simultaneamente. A Figura 39 mostra uma foto do *hardware* utilizado.



**Figura 39:** Hardware de aquisição de dados Spider 8.

### 4.3.6 – Software de Aquisição de Dados

O software utilizado na aquisição de dados foi o Catman 4.5, *software* recomendado pela fabricante do Spider8, da HBM. O *software* permite a visualização e controle individualizado dos dados em tempo real, além da possibilidade de exportar e gerar gráficos a partir de outros *softwares*.

## 4.4 – Fio

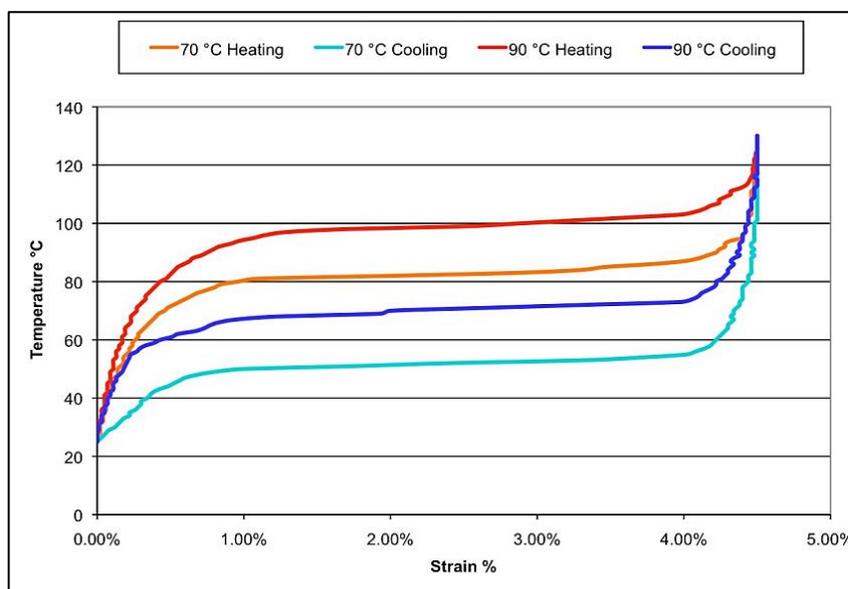
### 4.4.1 – Especificações do Fabricante

O material escolhido para esse projeto é um fio FLEXINOL® Actuator Wire, do fabricante DYNALLOY, Inc. O site do fabricante garante o uso deste fio como atuador para tensões de até 172 MPa. O fabricante também disponibiliza algumas especificações técnicas do fio, que estão organizadas na Tabela 1. O gráfico Temperatura versus Deformação, mostrado na Figura 40, também é disponibilizado pelo fabricante. O gráfico nos informa que sob a carga mecânica constante de 172 Mpa, a temperatura de iniciação da fase austenítica varia de 70°C a 90°C.

**Tabela 1:** Especificações do fio utilizado (Dynalloy Inc).

Liga	Níquel-Titânio
Diâmetro (mm)	0,50
Força nominal (N)	34,92
Resistividade elétrica ( $\mu\Omega \times \text{cm}$ )	Martensita: 80,0
	Austenita: 100,0
Força do resfriamento (N)	13,97
Corrente para 1 segundo de contração (mA)	4000,0
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	6,45

Calor específico (cal/g × °C)	0,2
Calor latente de transformação (cal/g)	5,78
Condutividade térmica (W/cm × °C)	0,18
Coeficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	Martensita: 6,60
	Austenita: 11,0
Coeficiente de Poisson	0,33



**Figura 40:** Gráfico Deformação x Temperatura sob tensão constante de 172Mpa (Dynamalloy Inc).

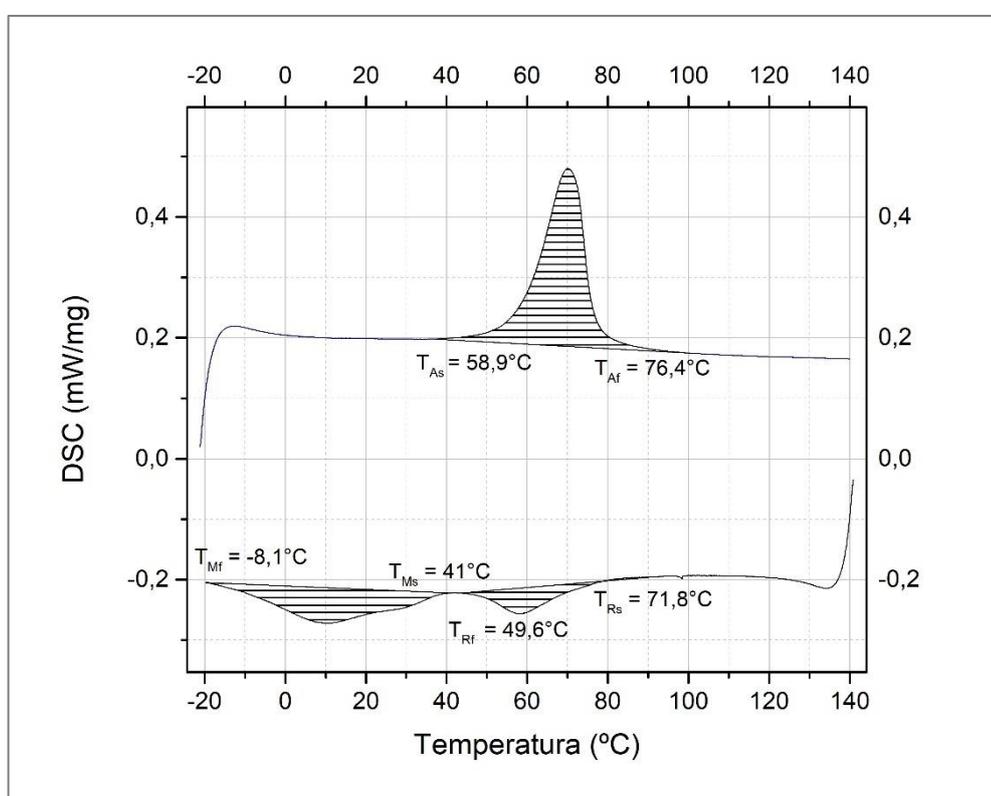
Para a completa caracterização do fio SMA, foram realizados ensaios termomecânicos explicados a seguir.

#### 4.4.2 - Calorimetria Diferencial de Varredura

A Figura 41 apresenta o teste de Calorimetria Diferencial de Varredura (*Differential Scanning Calorimetry*) ao qual a liga de memória de forma foi submetida para caracterizar as temperaturas de início e fim da transformação de fase martensítica para austenítica. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados para este teste.

**Tabela 2:** Parâmetros do ensaio D.S.C. do fio de SMA (SILVEIRA e CHERMONT, 2017).

Parâmetro	Valor
Massa da amostra (mg)	9,80
Massa do cadinho (mg)	39,4
Faixa de temperaturas (°C)	-20 – 140
Taxa de aquecimento/resfriamento (K/min)	10,0

**Figura 41:** D.S.C. do fio FLEXINOL®.

. Pode-se observar que a temperatura de início de transformação da fase austenítica acontece a aproximadamente  $59^{\circ}\text{C}$  e a temperatura referente ao final da transformação austenítica foi de  $76,4^{\circ}\text{C}$ . As temperaturas referentes à fase martensítica foram de  $41^{\circ}\text{C}$  para  $T_{Ms}$  e  $-8^{\circ}\text{C}$  para  $T_{Mf}$ . Na curva inferior é possível identificar uma transformação relacionada à fase R, sendo de  $41^{\circ}\text{C}$  para  $T_{Rs}$  e  $-8^{\circ}\text{C}$  para  $T_{Rf}$ . O equipamento utilizado para o teste foi o

Netzsch DSC 200 F3, do Centro de Mecânica Não-Linear da COPPE/POLI (Mecanon) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

#### 4.4.3 – Ensaio de Tração

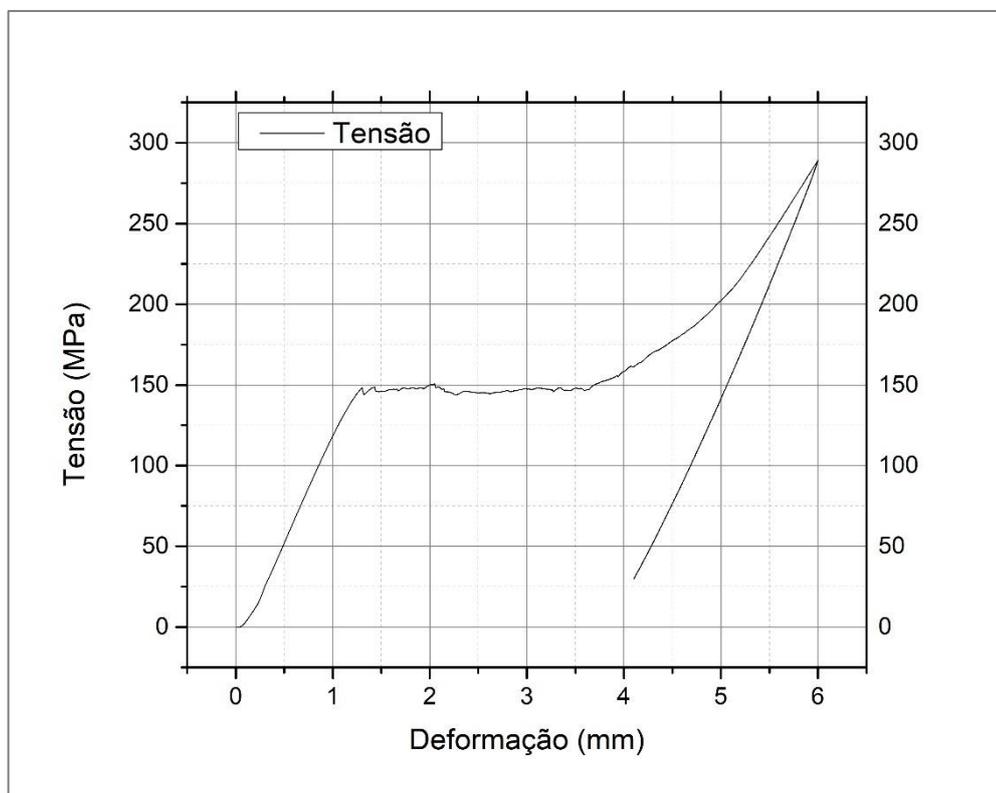
Para a caracterização do fio de SMA, foi utilizado uma máquina de ensaio de tração da fabricante Instron, com capacidade de até 10 kN. A Figura 42 mostra a máquina utilizada, além do computador que é utilizado para o gerenciamento dos ensaios.



**Figura 42:** Máquina de ensaios de tração da fabricante Instron.

O ensaio de tração possibilita a caracterização do fio a ser estudado. O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente a um corpo de prova especificado, ao mesmo tempo em que são medidas as variações no comprimento. O teste foi realizado em temperatura ambiente, utilizando uma taxa de deformação de 0.8 mm/minuto até uma deformação máxima de 6% e a tensão foi calculada a partir de um diâmetro de 0.5 mm, como especificado na seção 4.3.1.

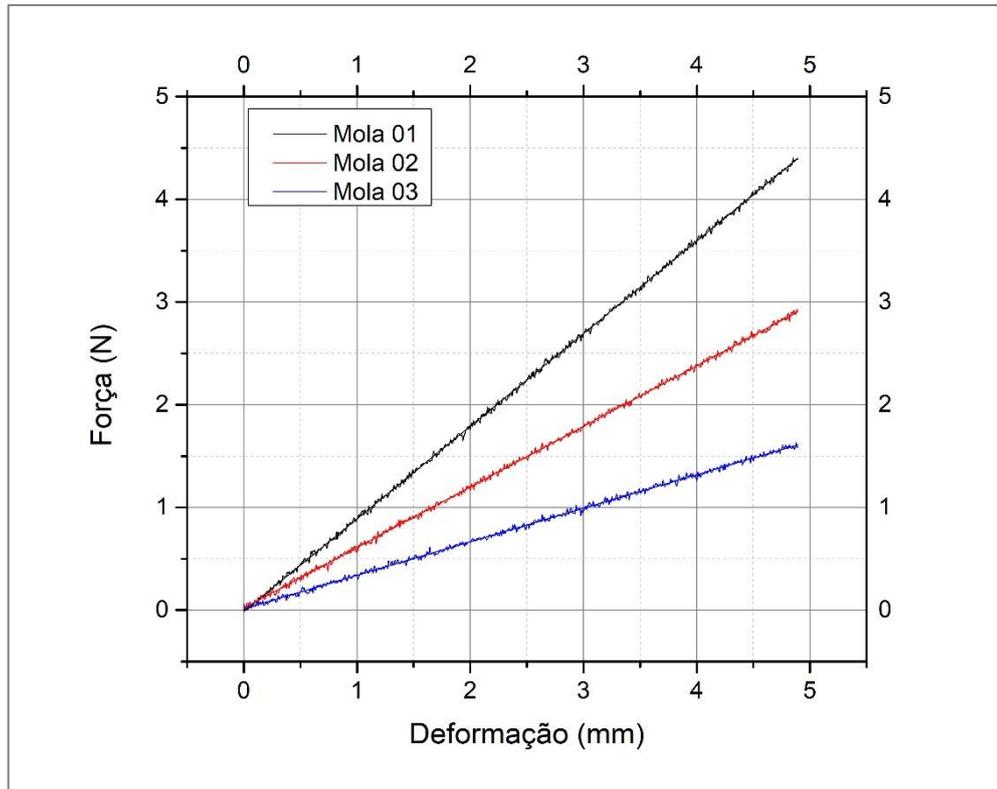
Na Figura 43 é possível verificar as tensões de transição da fase martensítica na curva Tensão x Deformação obtida em um teste de tração realizado no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ). É possível identificar que, em aproximadamente 150 MPa, a liga atinge o ponto  $T_{Ms}$  e  $T_{Mf}$  por volta de 4mm. Como pode ser visto, o teste se deu até uma tensão de 270MPa afim de evitar um possível escoamento do fio.



**Figura 43:** Tensão x Deformação - Fio SMA Ø0,5mm.

#### 4.5 – As Molas helicoidais de Aço

Foram selecionadas molas helicoidais com diferentes valores de rigidez para a realização dos testes no atuador fio-mola, adequando à exigência de carregamento mecânico do fio a fim de garantir uma deformação tal que possibilitasse a transição completa da martensita. Foram realizados ensaios de tração nas molas selecionadas a fim de especificar cada rigidez  $k$ . Os resultados podem ser vistos na Figura 44.



**Figura 44:** Ensaio de tração das molas.

A Tabela 2 apresenta a rigidez de cada mola utilizada no estudo. A Figura 45 mostra as molas utilizadas na análise.

**Tabela 3:** Rigidez das molas utilizadas no estudo.

Mola 01	901,60 N/m
Mola 02	589,39 N/m
Mola 03	326,20 N/m



**Figura 45:** Molas utilizadas no estudo.

## Capítulo 5 - Resultados

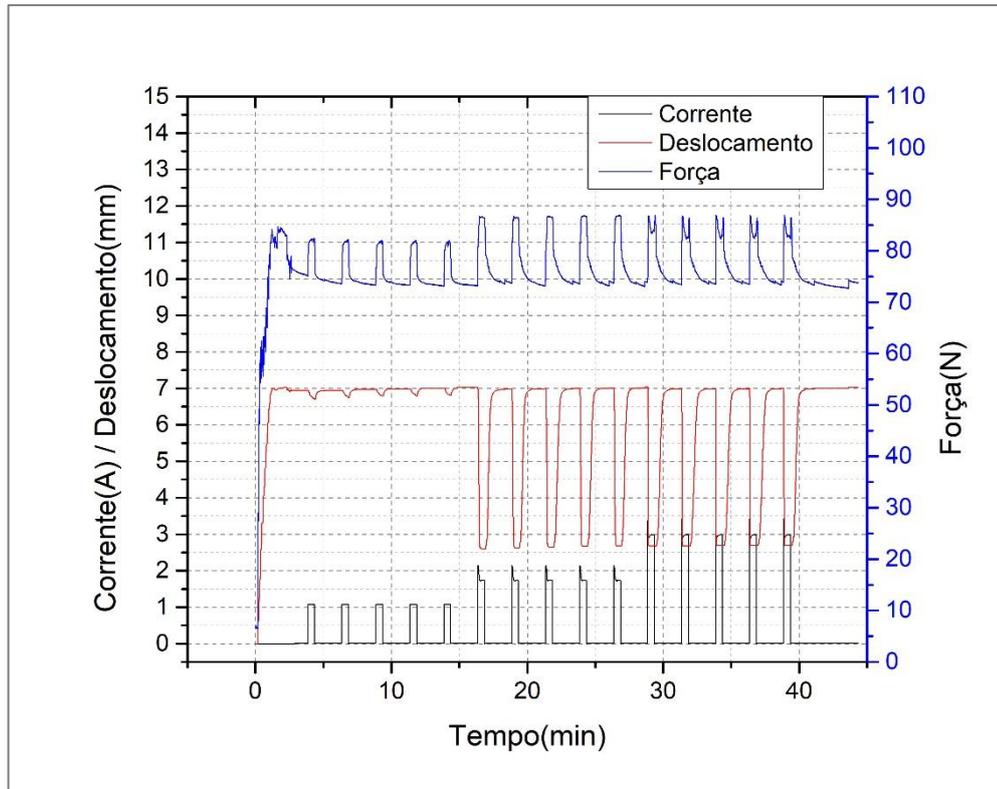
A seguir, serão apresentados os gráficos referentes aos testes efetuados em laboratório. Foi possível analisar as seguintes variáveis:

1. Corrente elétrica, fornecida pela fonte de CC;
2. Força, medida pela célula de carga;
3. Deslocamento, medido pelo transdutor;
4. Temperatura, medida pela câmera termográfica.

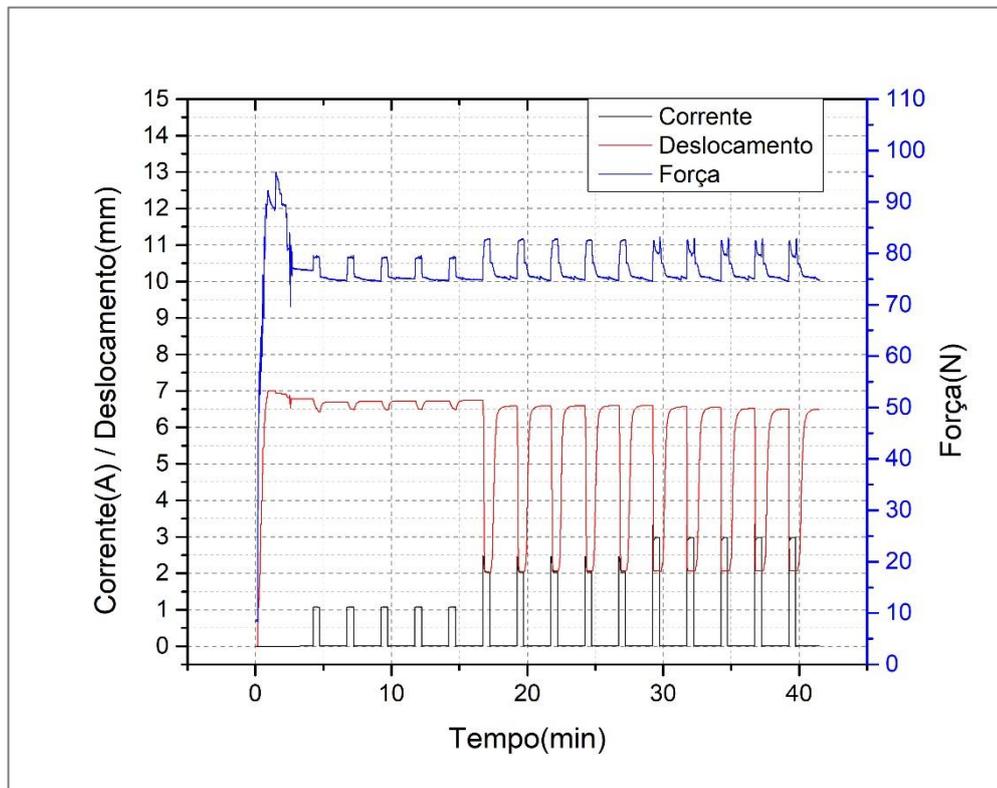
Assim, foi possível gerar diferentes gráficos relacionando essas variáveis a fim de permitir uma análise cuidadosa dos resultados obtidos.

### 5.1 – Corrente x Deslocamento x Força em Função do Tempo

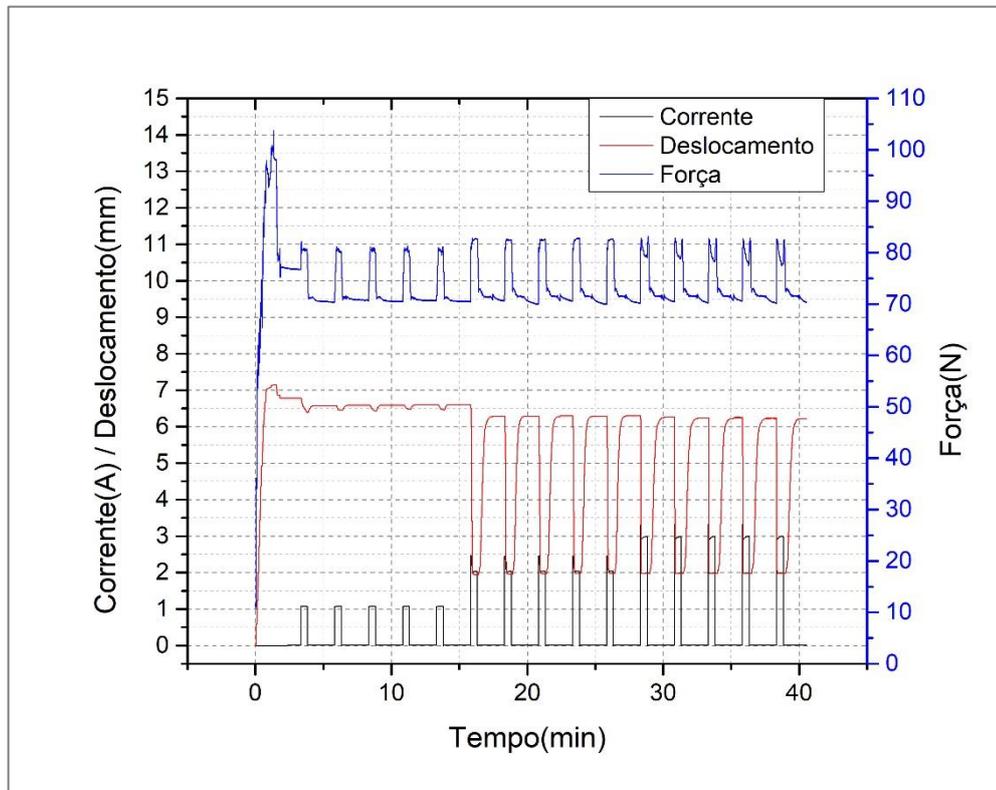
As Figuras a seguir, 46, 47 e 48, apresentam o comportamento do aparato experimental na configuração fio-mola, para as três molas analisadas. É importante notar a semelhança dos gráficos num aspecto geral, ainda que a rigidez de cada mola sejam dissimilares.



**Figura 46:** Resultado Geral - Mola 01.



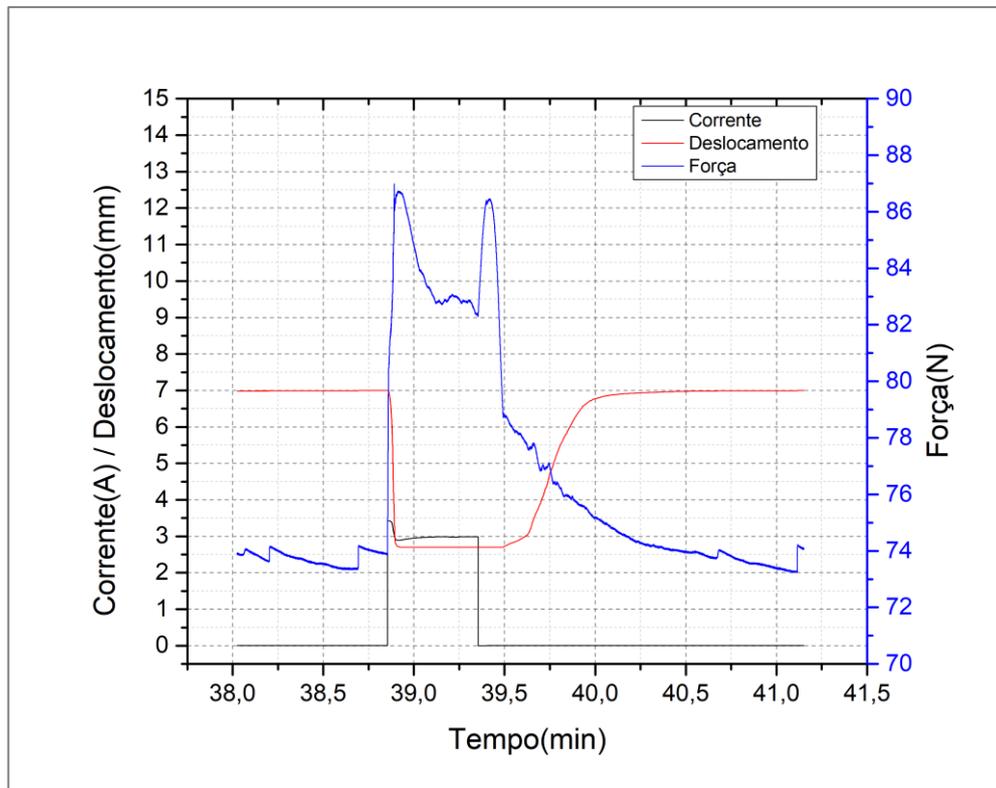
**Figura 47:** Resultado Geral - Mola 02.



**Figura 48:** Resultado Geral - Mola 03.

É possível observar um comportamento do atuador em duas condições distintas em relação ao deslocamento para as três molas. Para a corrente elétrica de 1 A, nas três molas, o deslocamento foi consideravelmente pequeno. Já para as correntes de 2 A e 3 A, nota-se um deslocamento maior em todas as molas. Isso se deve exatamente à temperatura de transformação da austenita,  $T_{Af}$ , que é atingida, possibilitando a “recuperação” do fio e maiores deslocamentos.

De forma geral, as forças nos ciclos de carregamento ficaram numa faixa entre 70 N e 90 N e é possível notar um translado diretamente proporcional à rigidez das molas. Nota-se que, para as correntes de 3 A, nas três molas, as curvas de força sofreram uma variação durante o tempo de aquecimento do fio. Essa variação ficou em torno de 3N em todos os ciclos. Mesmo com essas variações nos ciclos de força, os deslocamentos não sofreram uma mesma alteração correspondente. Na Figura 49 é possível ver em detalhes a variação na curva da força para um ciclo de 3 A.

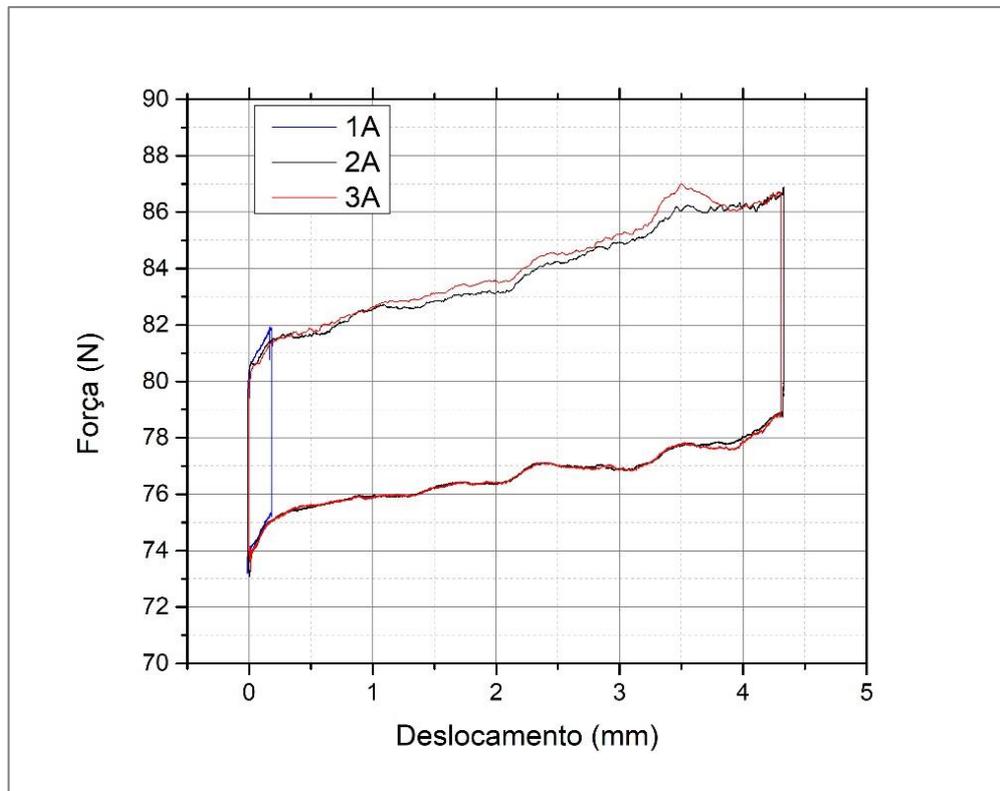


**Figura 49:** Corrente, Deslocamento e Força em detalhe – 3 A.

Na Figura 49 também é possível perceber um pico nos primeiros instantes do ciclo da corrente elétrica e o mesmo comportamento pode ser visto para todos os ciclos de 2 A e 3 A das três molas helicoidais estudadas. Tal fenômeno é explicado pela mudança de resistividade elétrica que ocorre no fio devido à transformação de fase induzida pelo aporte térmico.

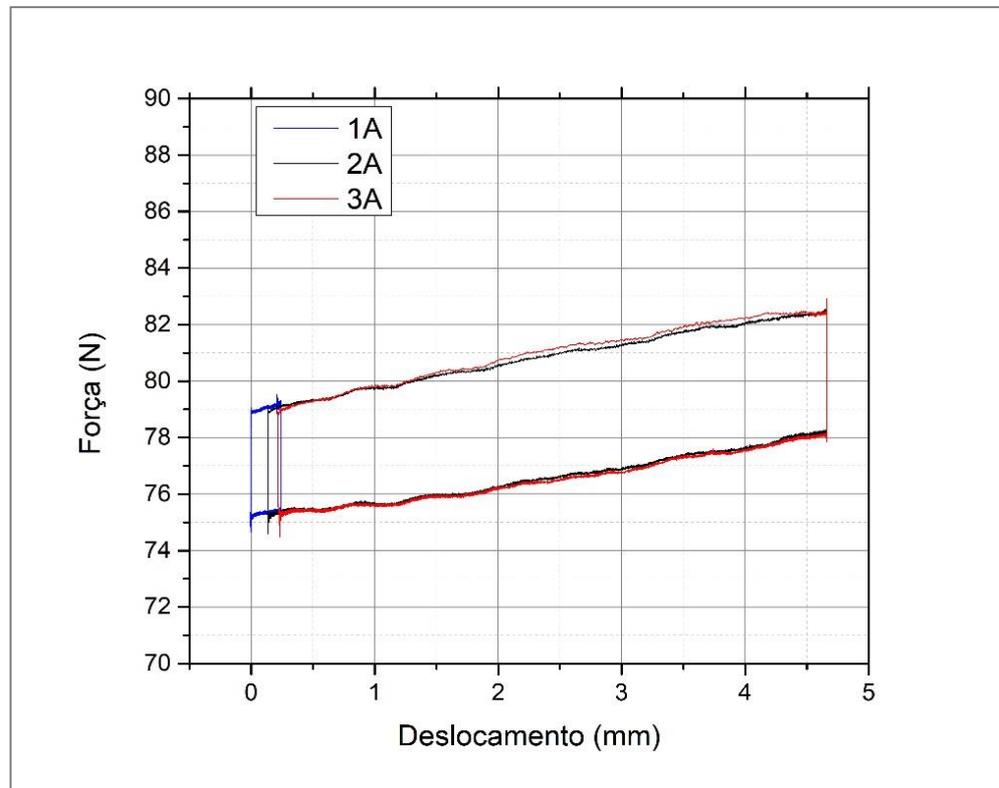
## 5.2 – Força x Deslocamento

As Figuras 50, 51 e 52 apresentam os gráficos que relacionam Força e Deslocamento para as configurações fio-mola analisadas. Para a análise foram isolados e comparados os últimos ciclos de carregamento de cada intensidade de corrente. As áreas formadas nessa análise representam os trabalhos realizados referentes à cada atuador fio-mola. É importante observar que o deslocamento superou 4 mm nos ensaios realizados com todas as molas, apresentando uma recuperação de aproximadamente 60%, visto que o fio é condicionado a uma deformação inicial de 7 mm.



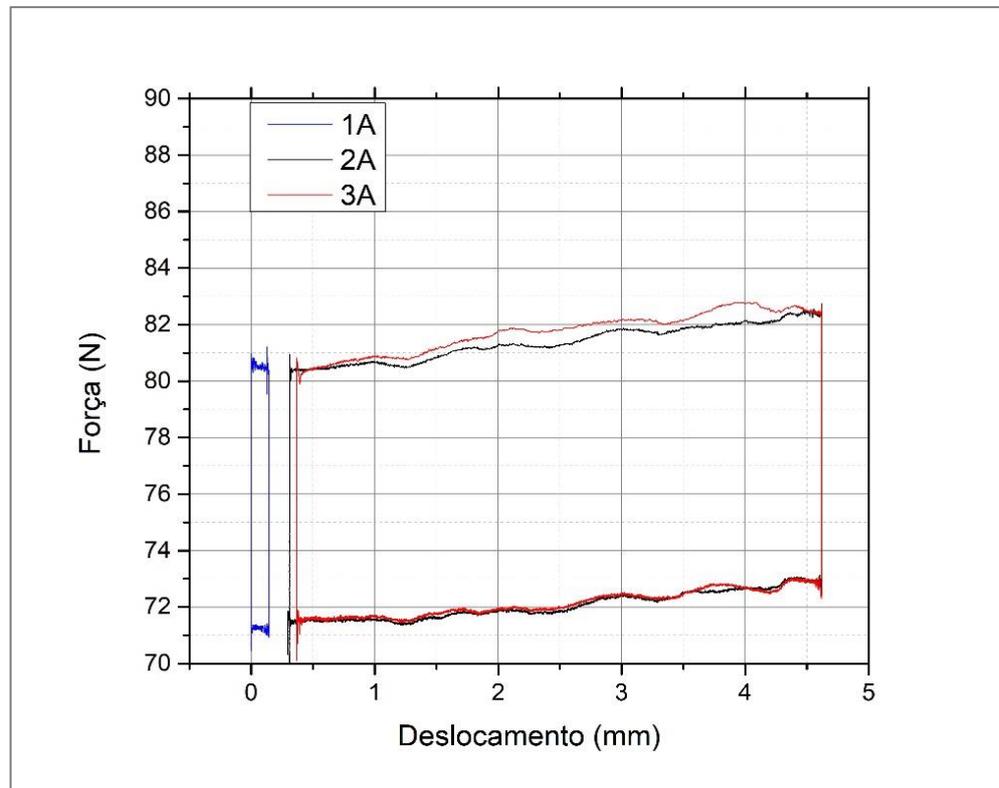
**Figura 50:** Força x Deslocamento - Mola 01.

A Figura 50 apresenta o resultado referente à Mola 01. O deslocamento máximo atingido pelo atuador foi 4,3 mm. Nesta é possível verificar que para o deslocamento máximo a força variou de 78,8 N à 86,8 N.



**Figura 51:** Força x Deslocamento - Mola 02.

A Figura 51 apresenta o resultado referente à Mola 02. O deslocamento máximo atingido pelo atuador foi 4,4 mm para 2 A. Nesta é possível perceber que para o deslocamento máximo, a força variou de 78 N à 82,6 N. É possível notar que os ciclos de 2 A e 3 A sofreram um deslocamento para a direita, 0,13 mm e 0,24 mm respectivamente, o que sugere que algum tipo de escorregamento no aparato experimental. Todavia, o gráfico da Mola 02 apresentou maior linearidade no deslocamento quando comparado aos outros dois resultados.



**Figura 52:** Força x Deslocamento - Mola 03.

A Figura 52 apresenta o resultado referente à Mola 03. O deslocamento máximo atingido pelo atuador foi 4,3 mm. É possível perceber que para o deslocamento máximo a força variou de 72,8 N à 82,4 N. Nota-se que os ciclos de 2 A e 3 A sofreram um deslocamento para a direita como observado nas curvas para a configuração da Mola 02. Os deslocamentos foram de 0,31 mm e 0,37 mm, respectivamente.

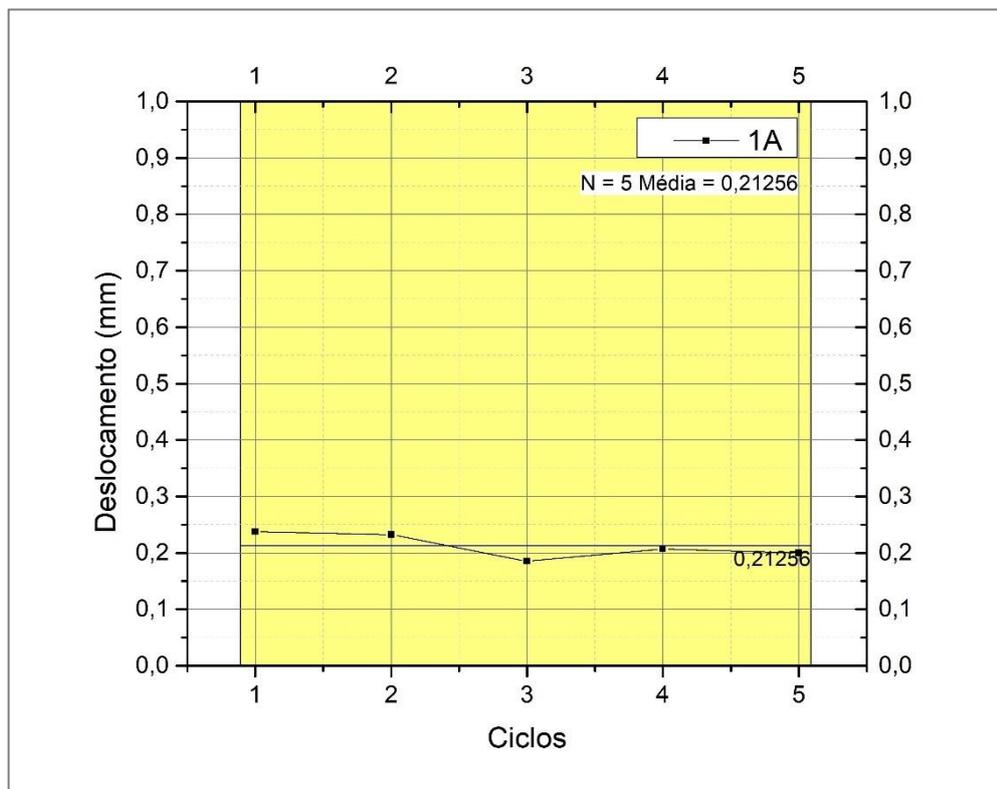
Os ciclos de 2 A apresentaram deslocamentos ligeiramente superiores aos ciclos de 3 A nas três condições, contudo, por ter havido deslocamento da referência inicial, não é possível comparar conclusivamente essas diferenças. Mais detalhes sobre os deslocamentos serão apresentados a seguir.

### 5.3 – Deslocamento x Ciclo

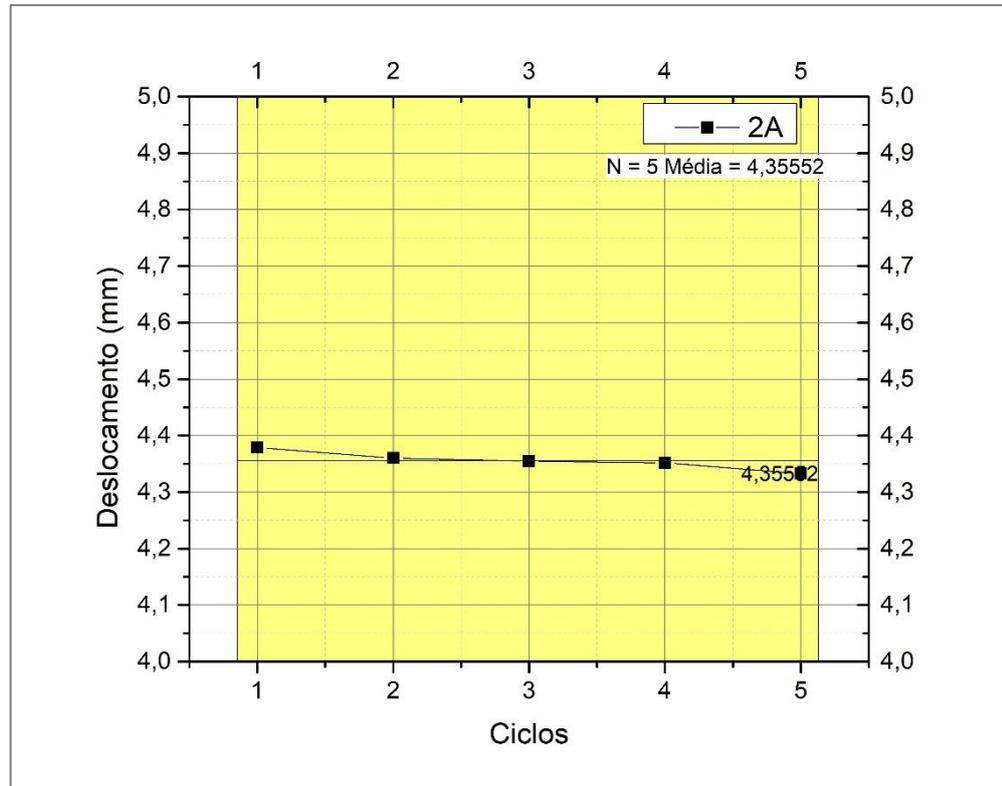
Nesta seção serão mostrados os deslocamentos para cada ciclo e intensidade de corrente elétrica (1 A, 2 A e 3 A). Serão apresentados também os deslocamentos médios para cada intensidades de corrente e, posteriormente, uma comparação dos deslocamentos médios para cada mola.

#### 5.3.1 – Mola 01

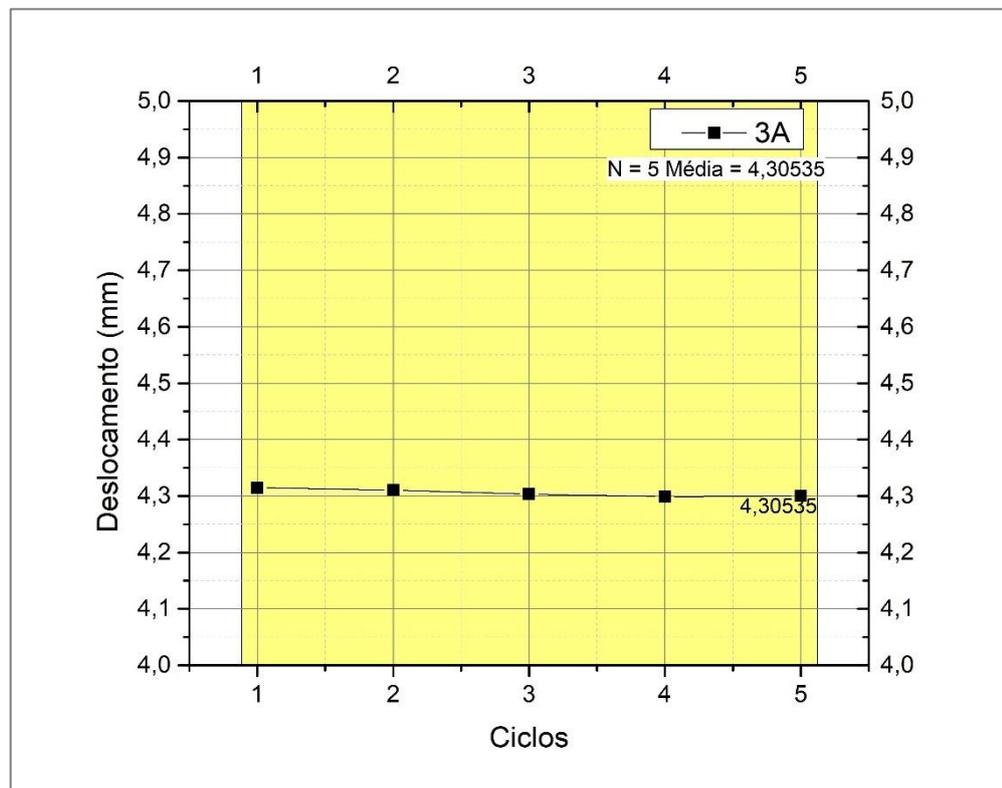
As Figuras 53, 54 e 55 mostram a variação do deslocamento dos cinco ciclos de carregamento para cada intensidade de corrente elétrica.



**Figura 53:** Deslocamento x Ciclo – 1 A.

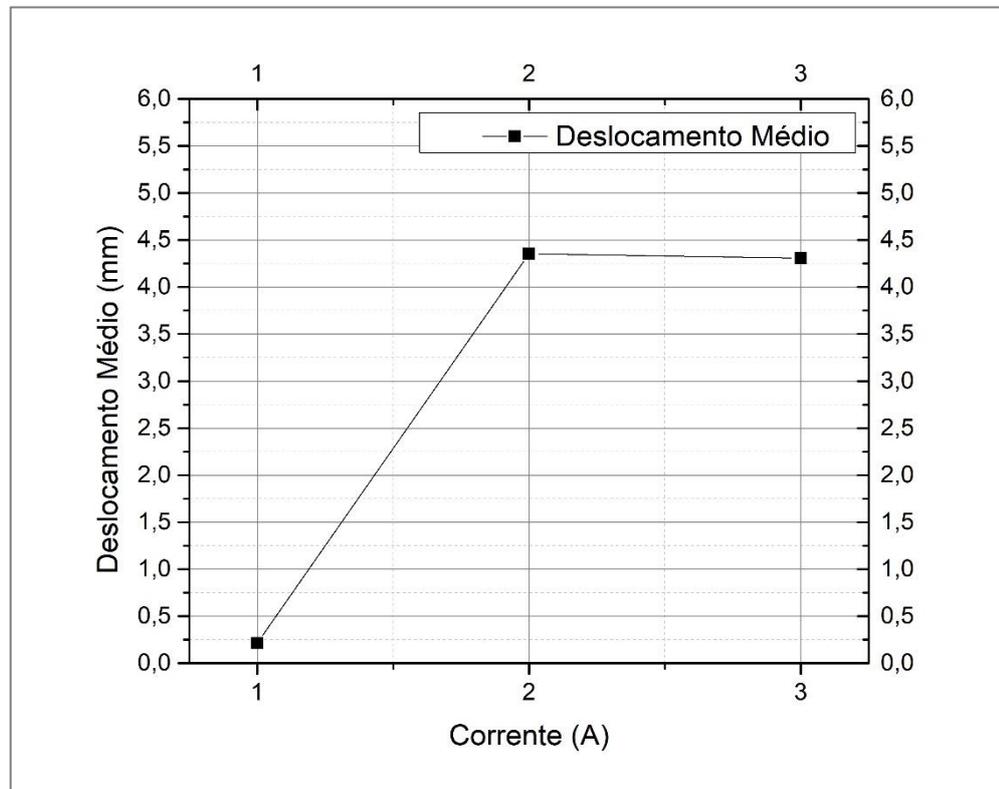


**Figura 54:** Deslocamento x Ciclos – 2 A.



**Figura 55:** Deslocamento x Ciclos – 3 A.

A Figura 56 mostra a variação de deslocamento entre os ciclos para as intensidades de correntes elétricas 1 A, 2 A e 3 A para a mola 01. É possível observar que a variação de ciclo para ciclo em cada intensidades de corrente não é muito expressiva.



**Figura 56:** Deslocamento Médio x Corrente – Mola 01.

Como pode ser analisado, as correntes de 1 A apresentam deslocamentos desprezáveis na medida que se faz necessário o acionamento de uma válvula. Já nas correntes de 2 A e 3 A o deslocamento médio foi bastante próximo, mas com uma pequena superioridade da corrente de 2 A.

### 5.3.2 – Mola 02

As Figuras 57, 58 e 59 mostram a variação do deslocamento dos cinco ciclos de carregamento para cada intensidade de corrente elétrica.

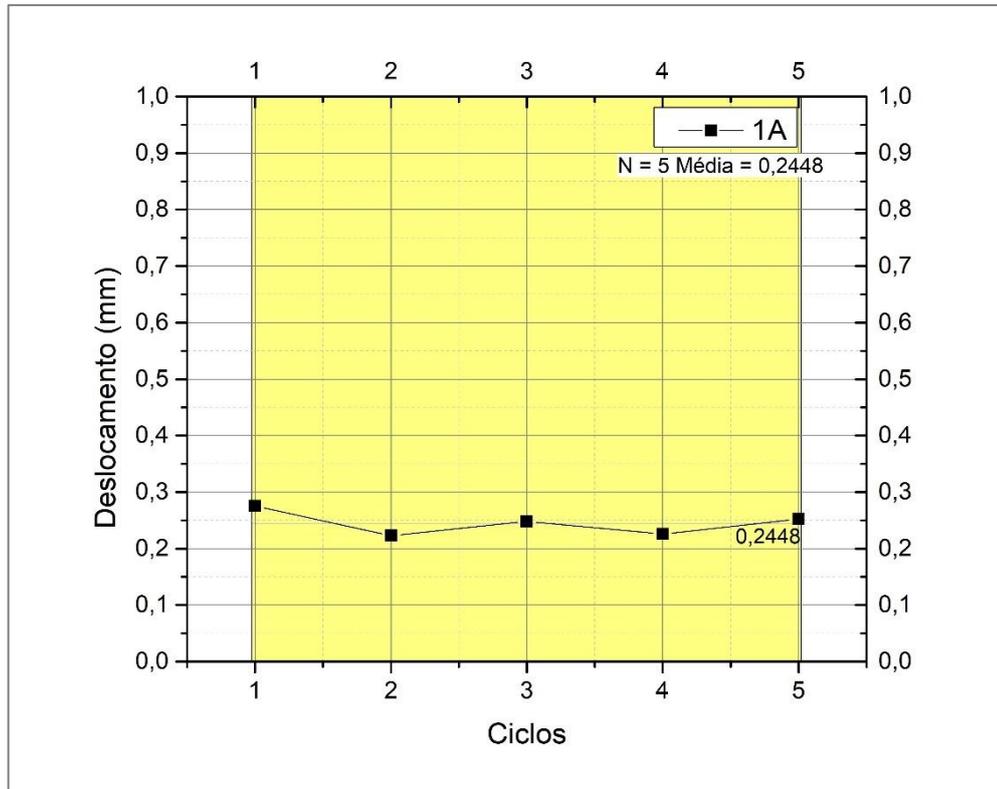


Figura 57: Deslocamento x Ciclo – 1 A.

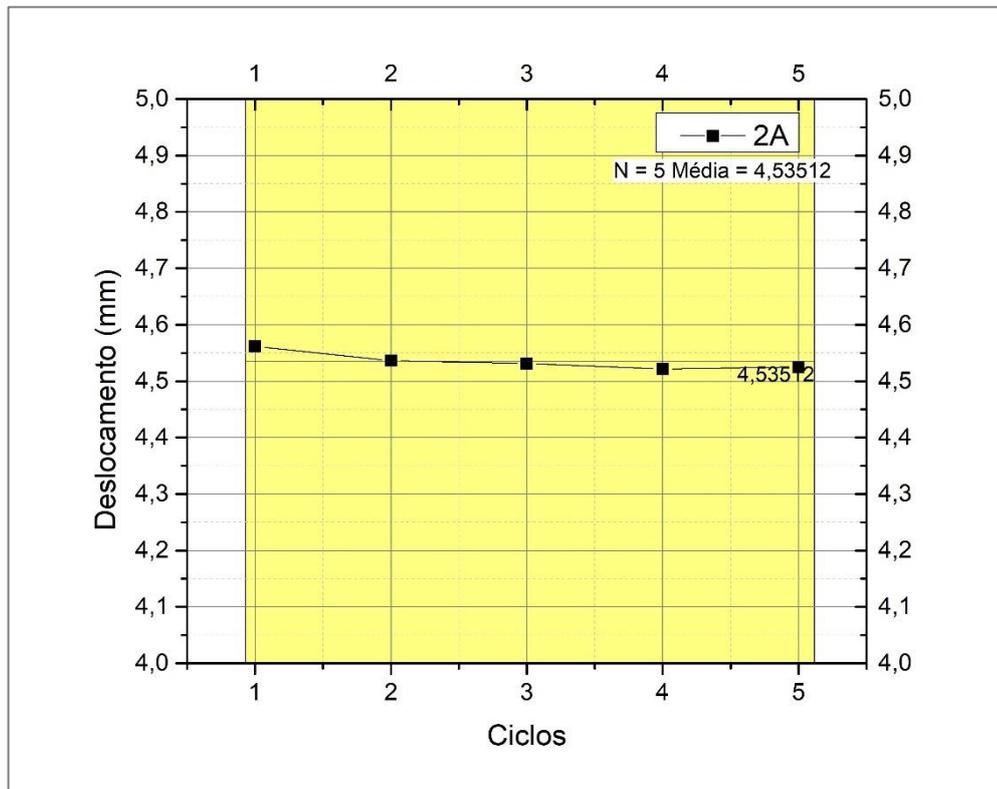
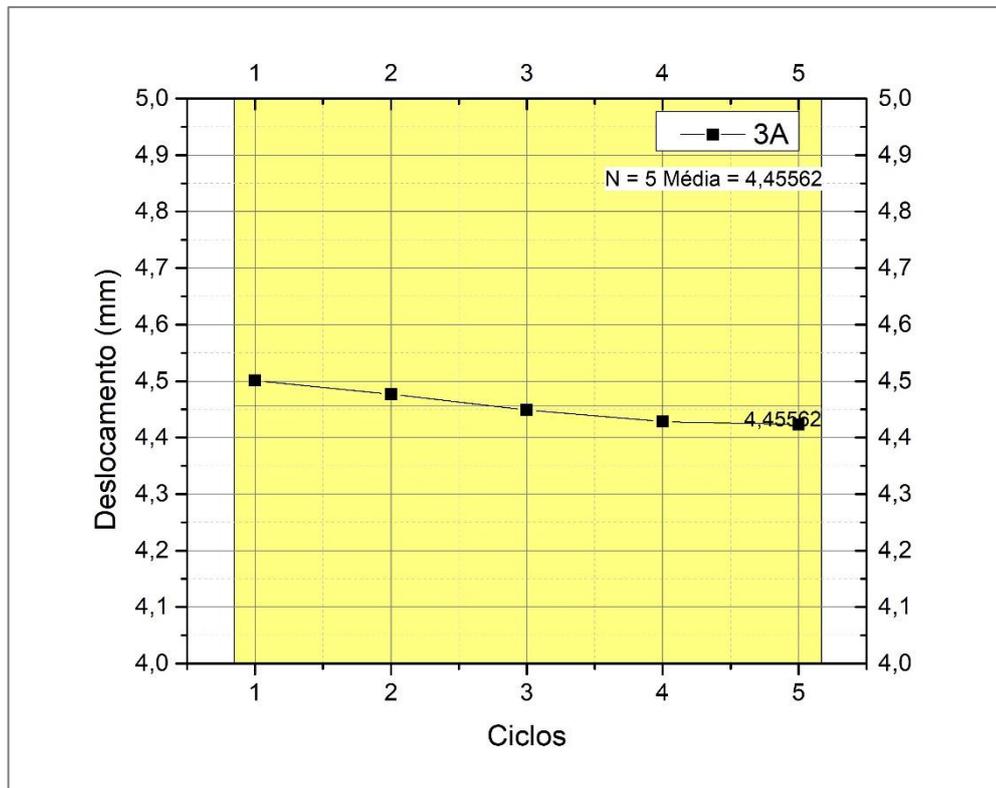
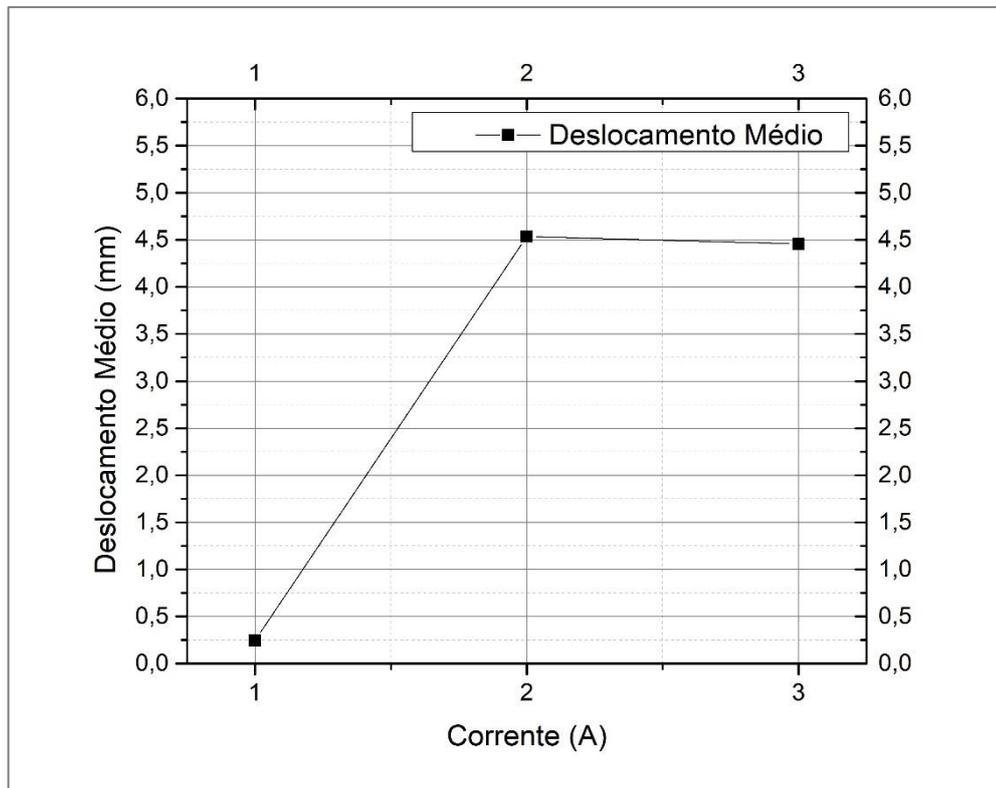


Figura 58: Deslocamento x Ciclo – 2 A.



**Figura 59:** Deslocamento x Ciclo – 3 A.

Novamente, é possível observar que a variação de ciclo para ciclo é pequena, contudo, na Mola 02 a diferença entre as médias de 2 A e 3 A é maior que a diferença das mesmas correntes na Mola 01. Na Figura 61 é possível notar os três deslocamentos médios para a Mola 02, onde nota-se uma grande semelhança com o mesmo gráfico referente à Mola 01.



**Figura 60:** Deslocamento Médio x Corrente – Mola 02.

### 5.3.3 – Mola 03

As Figuras 61, 62 e 63 mostram a variação do deslocamento dos cinco ciclos de carregamento para cada intensidade de corrente elétrica.

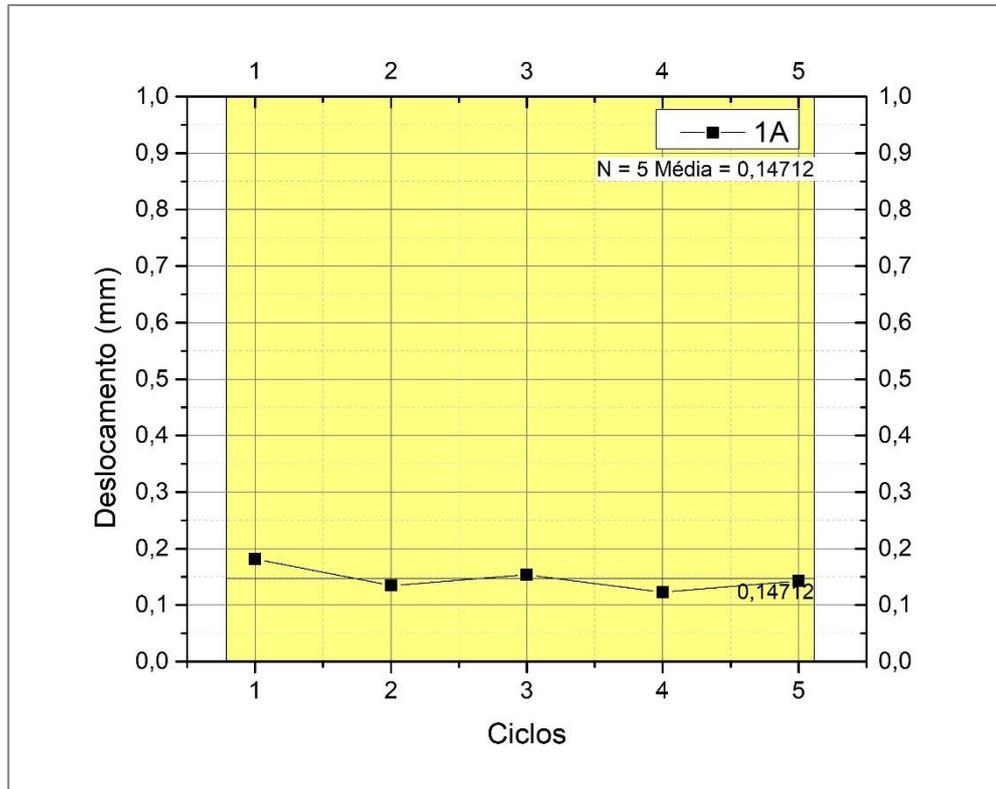


Figura 61: Deslocamento x Ciclo – 1 A.

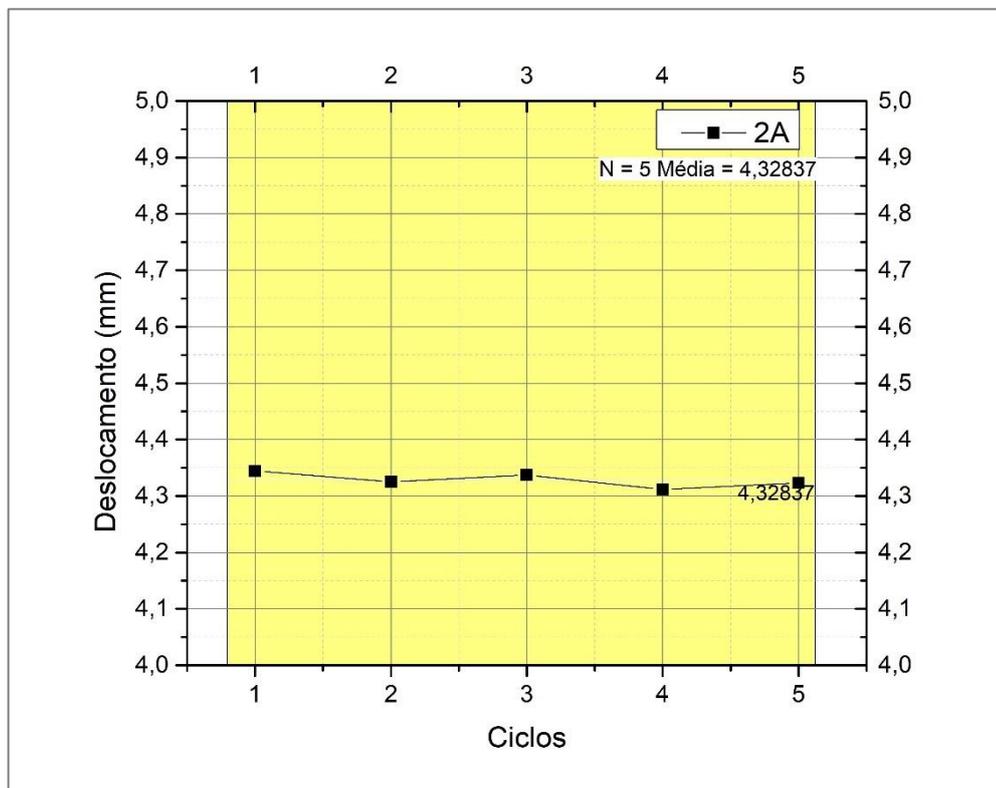
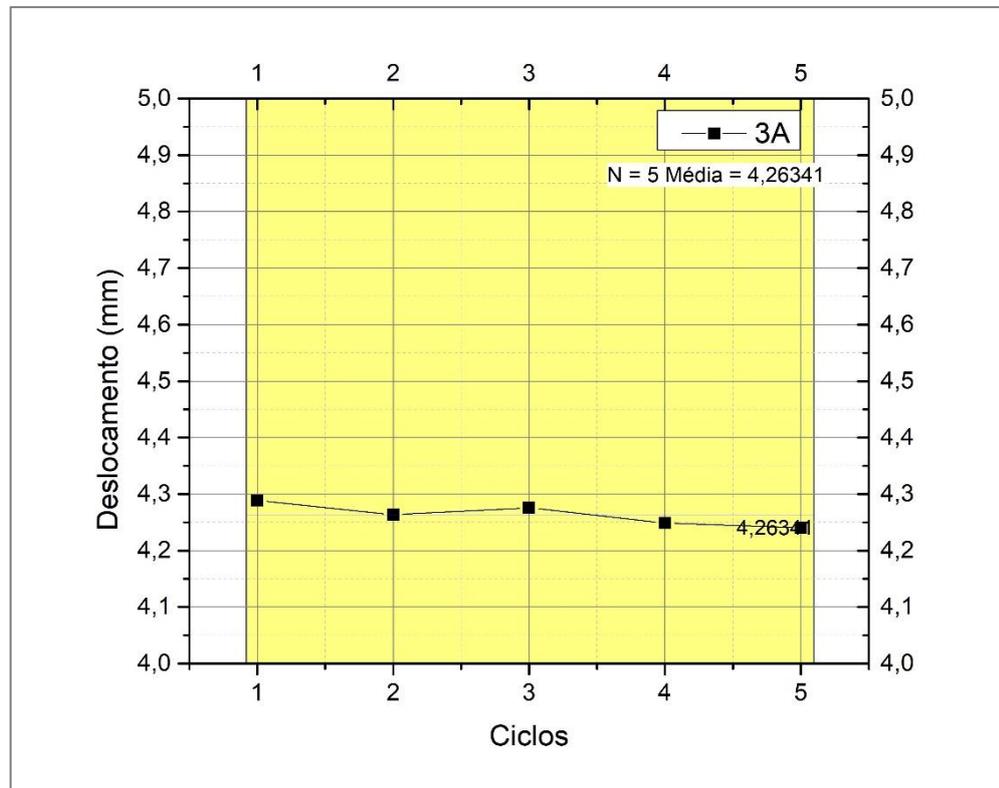
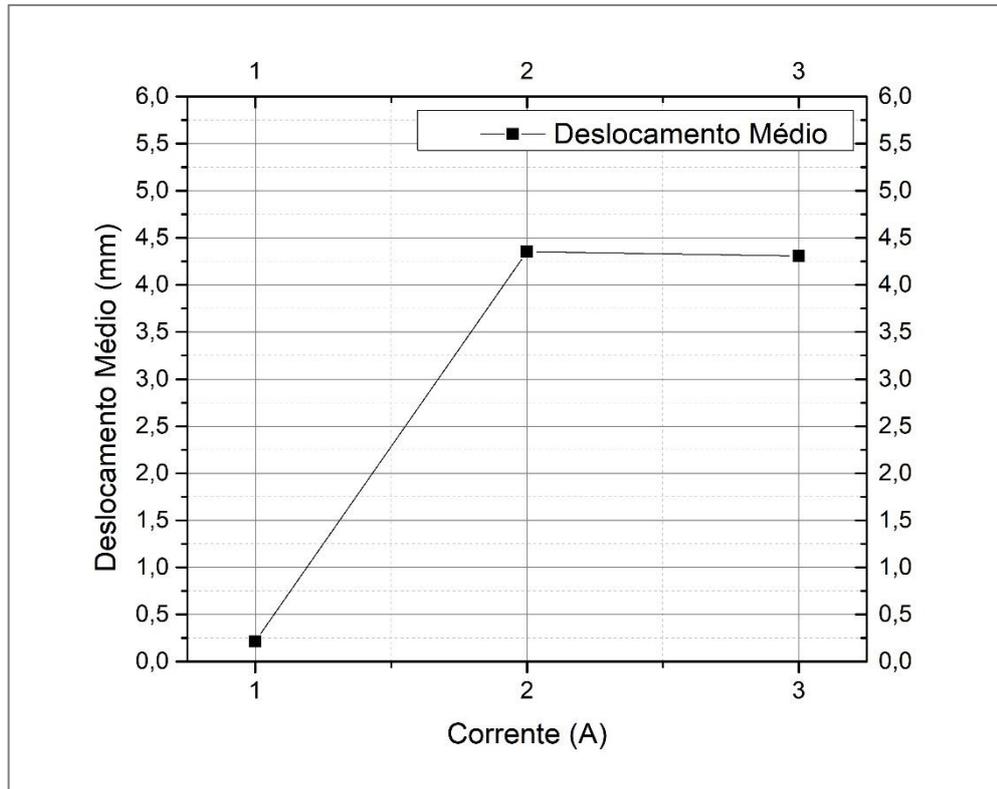


Figura 62: Deslocamento x Ciclo – 2 A.



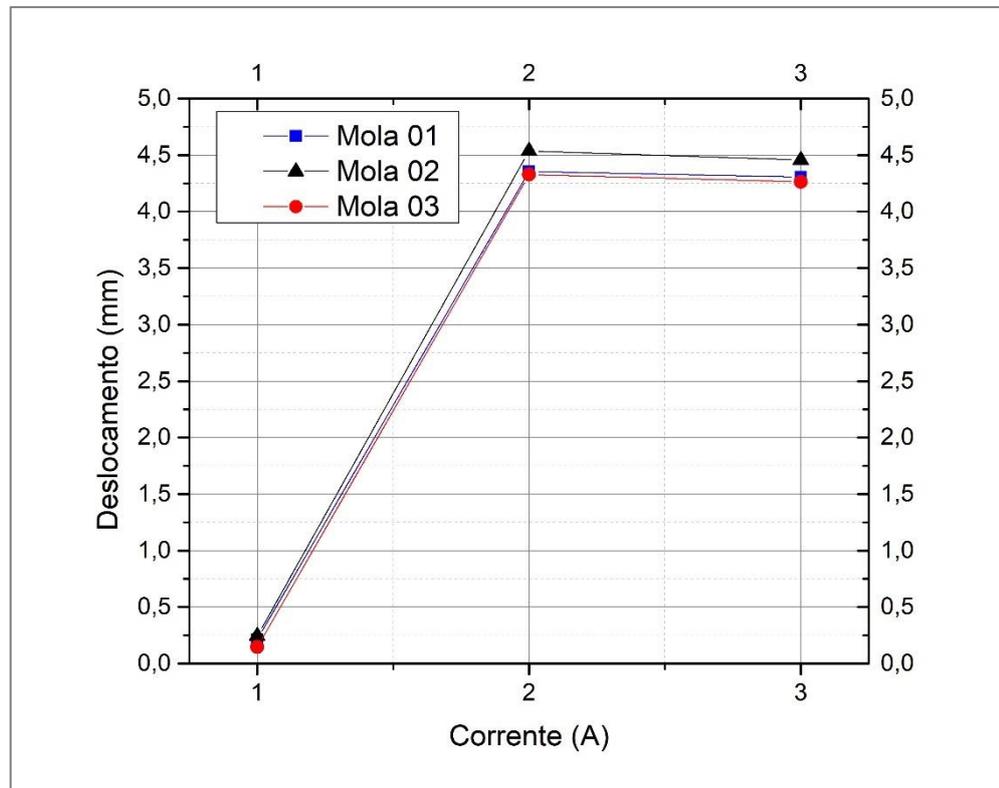
**Figura 63:** Deslocamento x Ciclo – 3 A.

Pode-se perceber nas Figuras 61, 62 e 63 que os valores médios para as três correntes aplicadas à configuração com a Mola 03 foram um pouco menores que as Molas 01 e 02. Ainda assim, a variação de ciclo para ciclo não apresentou grandes variações como visto anteriormente para as outras duas molas. A Figura 64 mostra o Deslocamento Médio por cada intensidade de corrente, a seguir.



**Figura 64:** Deslocamento Médio x Corrente - Mola 03.

Na Figura 65 é possível observar as curvas do deslocamento médio das Molas 01, 02 e 03.



**Figura 65:** Deslocamento médio x Corrente - Molas 01, 02 e 03.

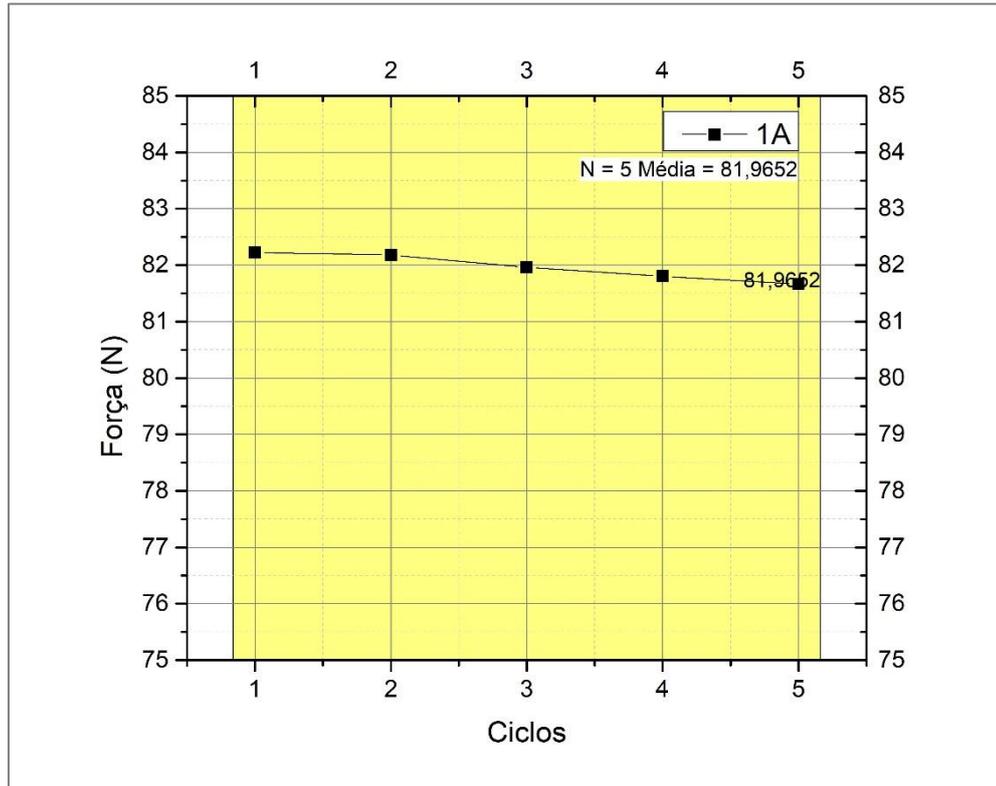
É possível observar, na Figura 65, que os deslocamentos médios para cada intensidade de corrente elétrica foram bastante próximos. A Mola 02 apresentou maiores deslocamentos médios nas três condições de corrente, entretanto, foi superior em apenas 0,2 mm aproximadamente, que em termos práticos não modifica a eficiência do atuador pois representa uma variação de aproximadamente 4%.

#### 5.4 – Força x Ciclo

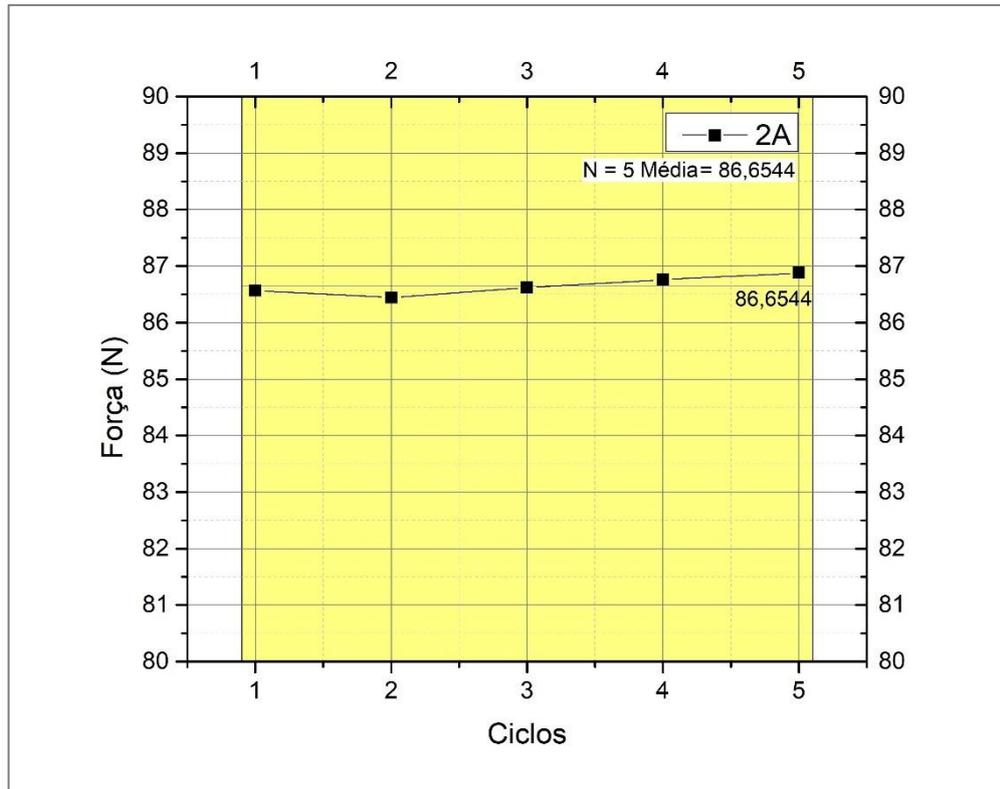
Nesta seção serão mostradas as forças atingidas por cada ciclo e intensidade de corrente elétrica (1 A, 2 A e 3 A). Serão apresentadas também as médias entre as forças atingidas por cada ciclo, para cada intensidade de corrente e, posteriormente, uma comparação das forças médias para cada mola.

### 5.4.1 – Mola 01

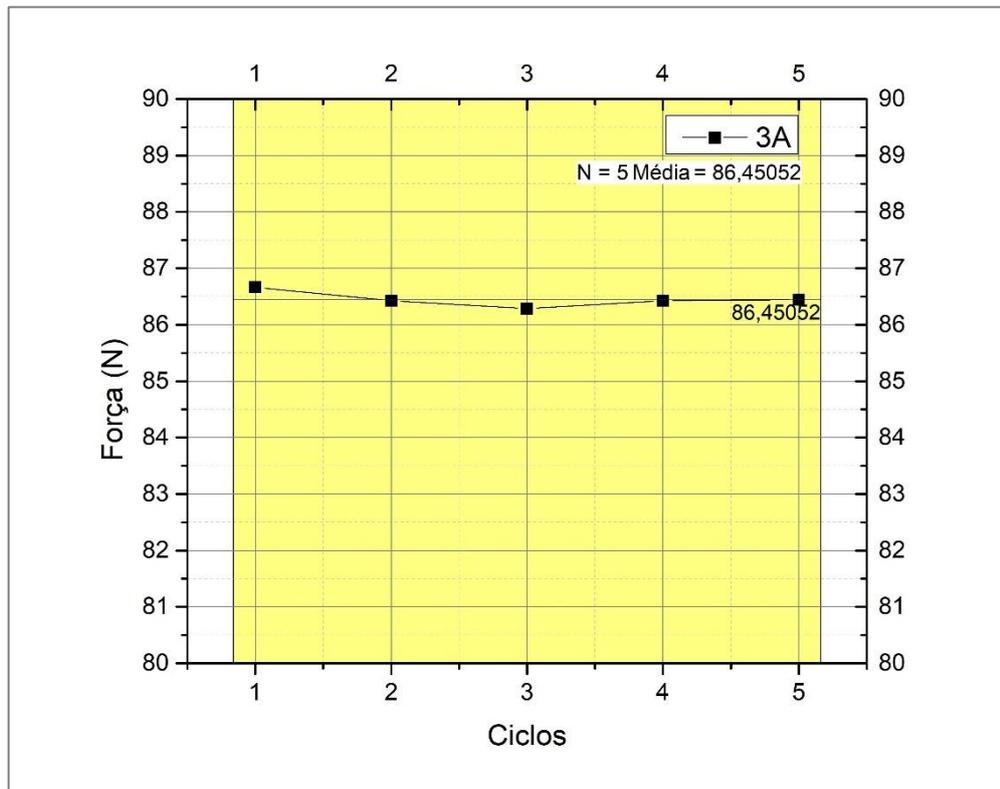
As Figuras 66, 67 e 68 mostram a variação do pico de força dos cinco ciclos de carregamento para cada intensidade de corrente elétrica.



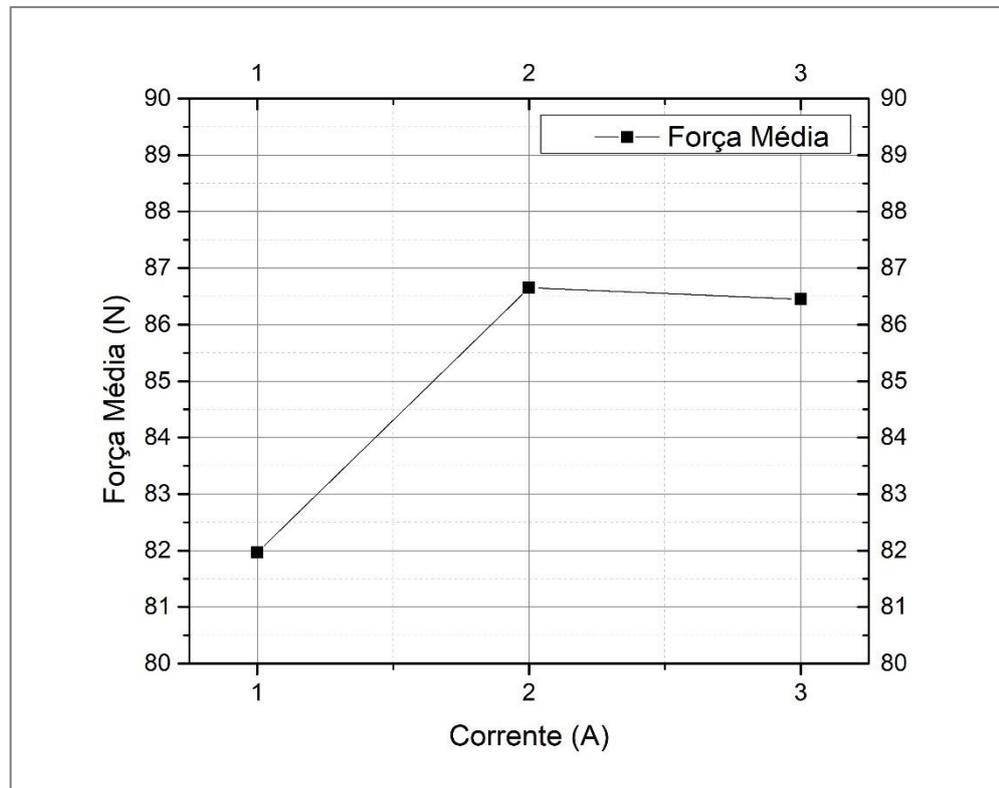
**Figura 66:** Força x Ciclo – 1 A.



**Figura 67:** Força x Ciclo – 2 A.



**Figura 68:** Força x Ciclo – 3 A.



**Figura 69:** Força Média x Corrente – Mola 01.

Na Figura 69 é possível identificar a média das forças para cada intensidade de corrente elétrica. É possível perceber uma semelhança no comportamento semelhante às médias dos deslocamentos, apresentados na seção 5.3. A força máxima exercida pela corrente de 1ª no atuador ficou em aproximadamente 82 N, que resultou em deslocamentos muito pequenos. Para as intensidades de 2 A e 3 A, as forças de atuação ficaram entre 86 N e 87 N, assim, uma diferença de pouco mais de 4 N, ocasionada pelo aumento da temperatura, ocorre para que possibilite a atuação desejada do sistema.

#### 5.4.2 – Mola 02

As Figuras 70, 71 e 72 mostram a variação do pico de força dos cinco ciclos de carregamento para cada intensidade de corrente elétrica.

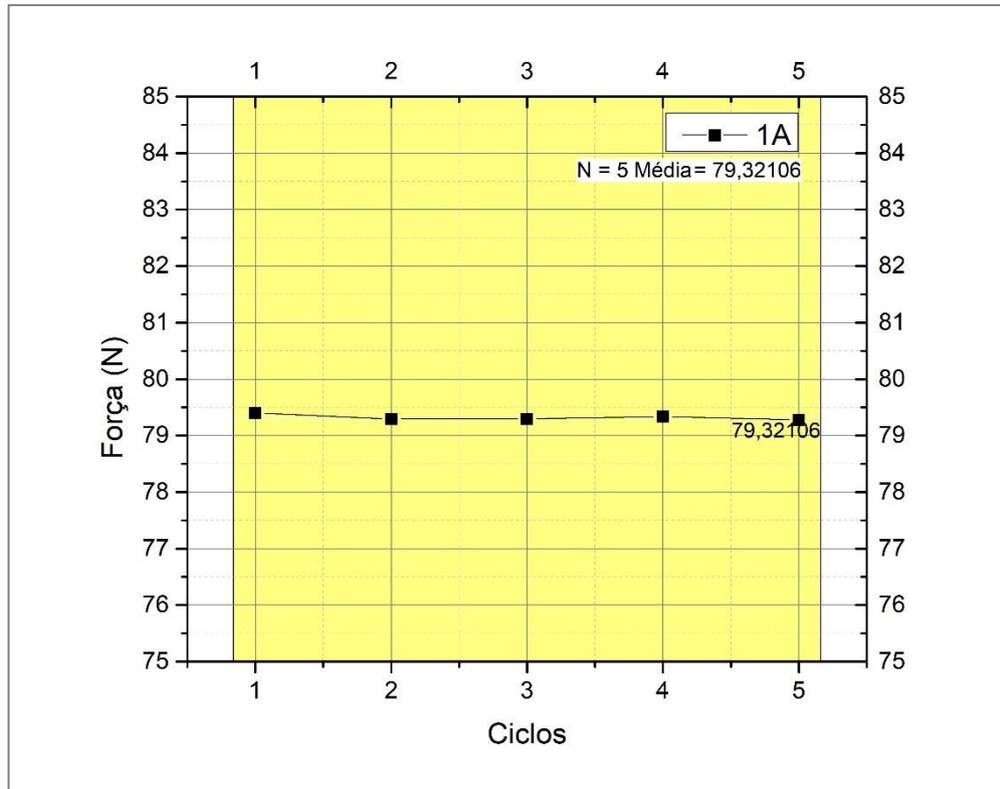


Figura 70: Força x Ciclos – 1 A.

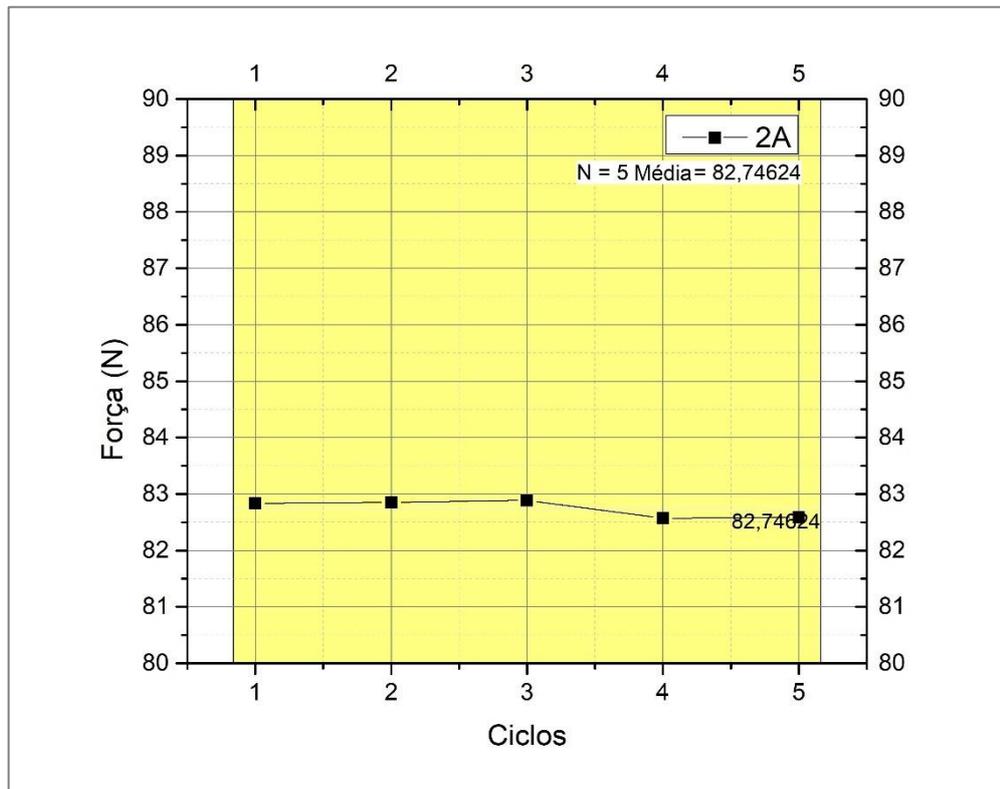


Figura 71: Força x Ciclos – 2 A.

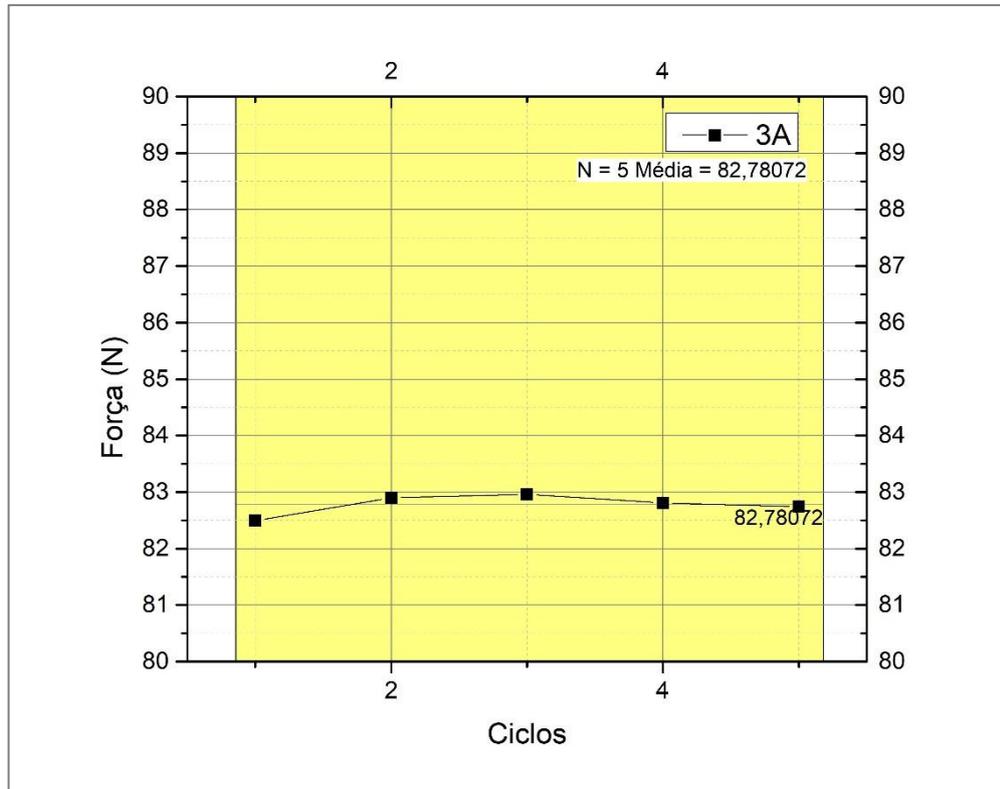


Figura 72: Força x Ciclos – 3 A.

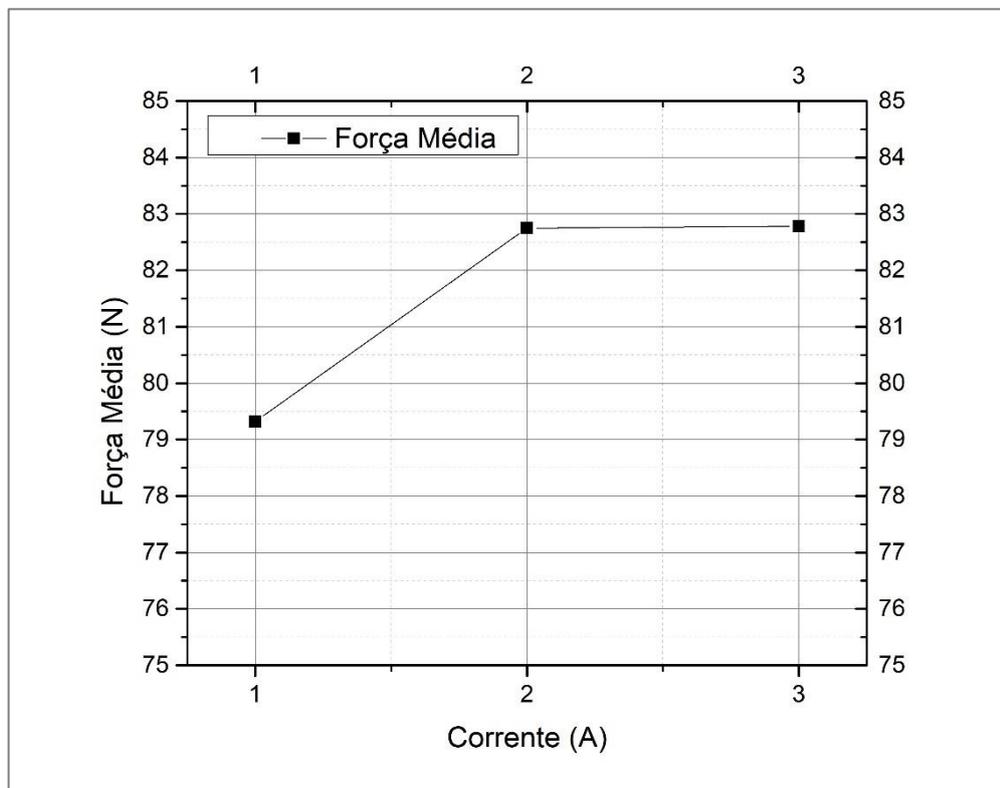
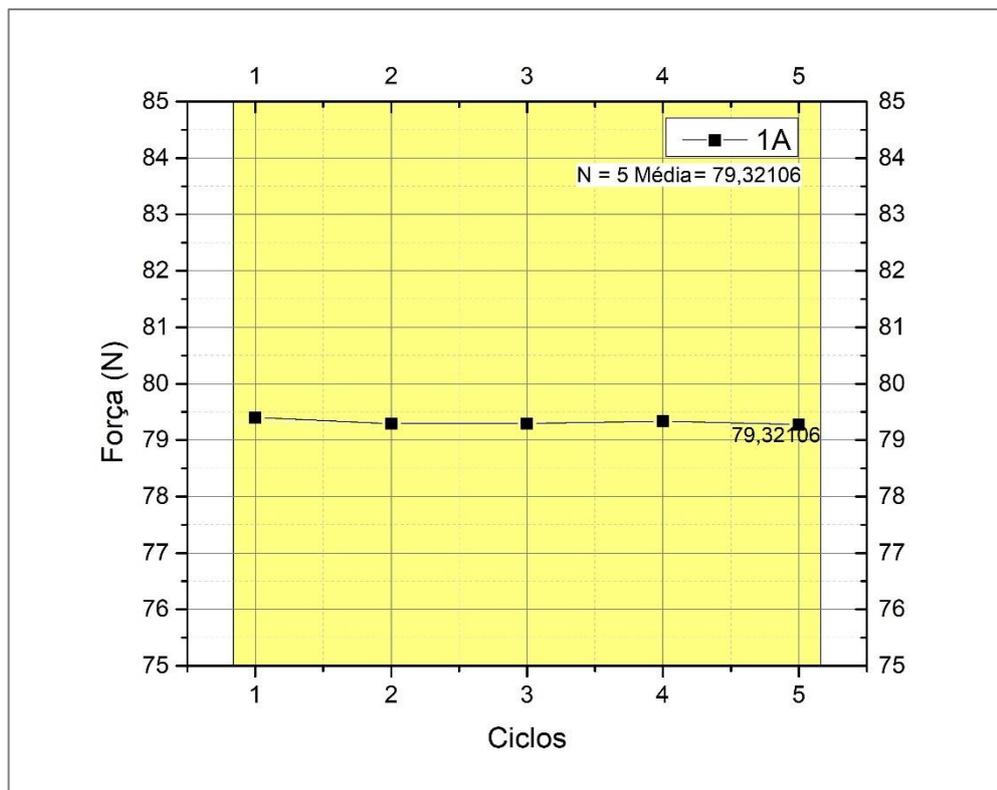


Figura 73: Força Média x Corrente - Mola 02.

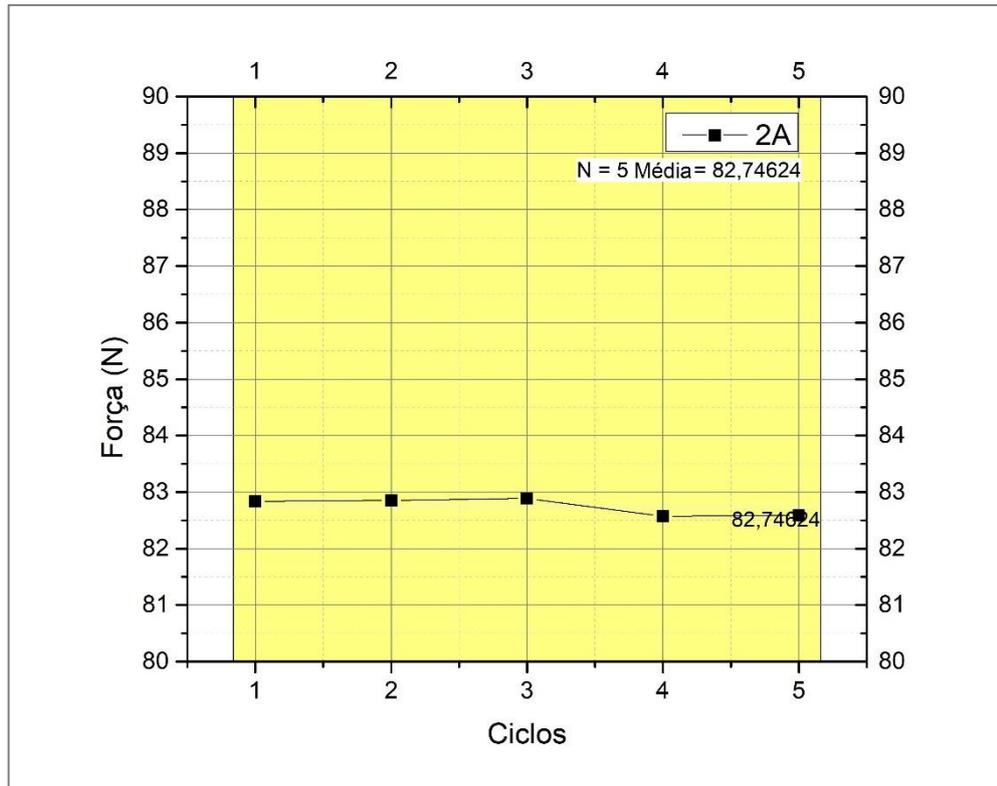
A Figura 73 apresenta a força média em função da intensidade de corrente elétrica aplicada. É possível perceber, também, uma semelhança no comportamento das médias da força comparada às médias dos deslocamentos, como visto na Mola 01. A força máxima exercida pela corrente de 1 A no atuador ficou em aproximadamente 79,3 N e para 2 A e 3 A a força média foi aproximadamente 82,7 N. Nota-se que comparada à Mola 01, esta não apresentou diferenças consideráveis nas médias das forças para as correntes de 2 A e 3 A.

### 5.4.3 – Mola 03

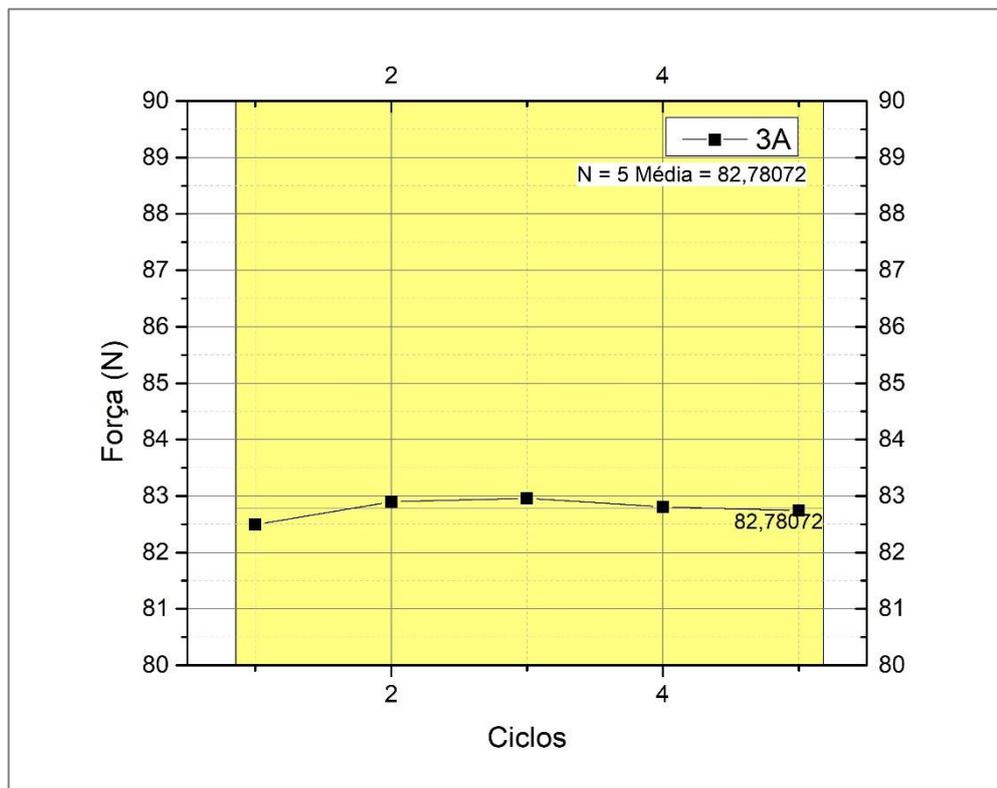
As Figuras 74, 75 e 76 mostram a variação do pico de força dos cinco ciclos de carregamento para cada intensidade de corrente elétrica.



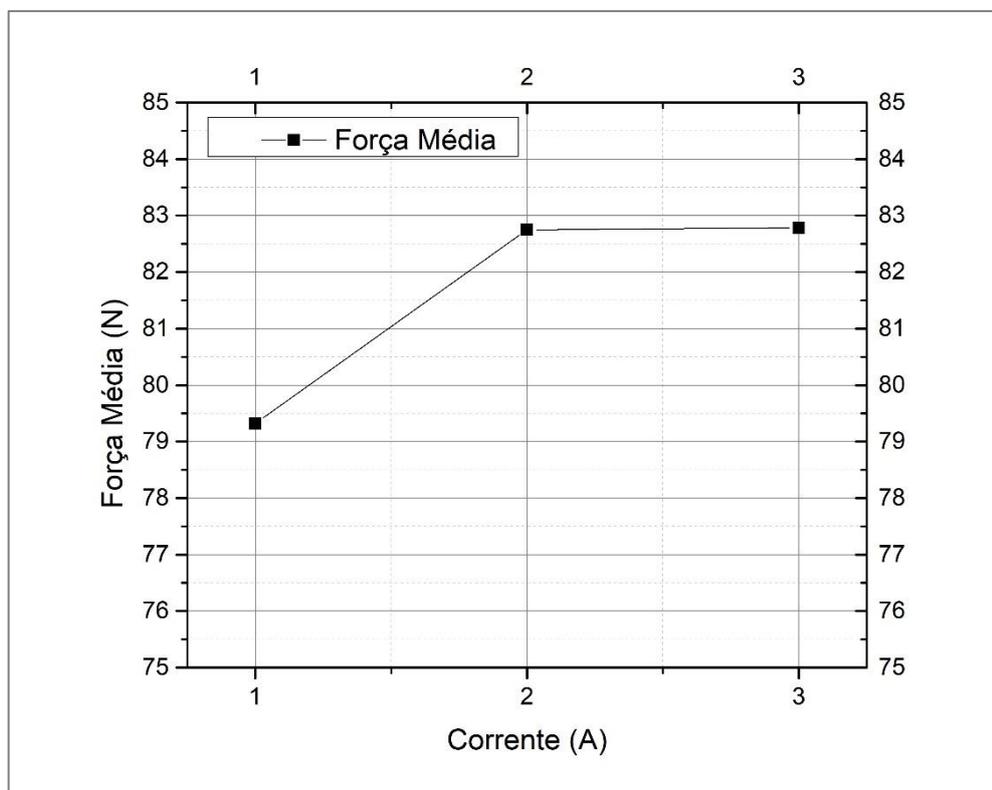
**Figura 74:** Força x Ciclos – 1 A.



**Figura 75:** Força x Ciclos – 2 A.

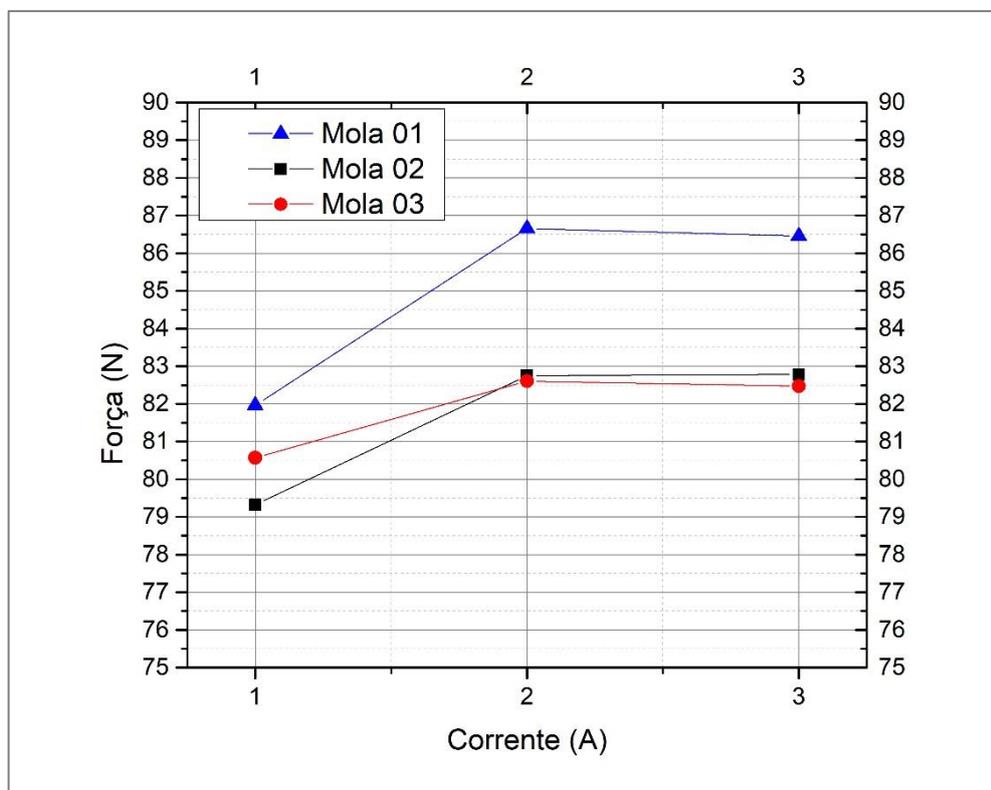


**Figura 76:** Força x Ciclos – 3 A.



**Figura 77:** Força Média x Corrente - Mola 03.

A Figura 77 apresenta a força média em função da intensidade de corrente elétrica aplicada na Mola 03. É possível perceber, também, uma semelhança nos valores da força quando comparada à Mola 02, assim, a força máxima exercida pela corrente de 1 A no atuador ficou em 79,3 N e, para 2 A e 3 A, a força média foi respectivamente 82,6 N e 82,5 N. Nota-se que como na configuração com a Mola 02, esta não apresentou diferenças consideráveis nas médias das forças para as correntes de 2 A e 3 A. A Figura 79 apresenta as médias das forças nas três configurações avaliadas.

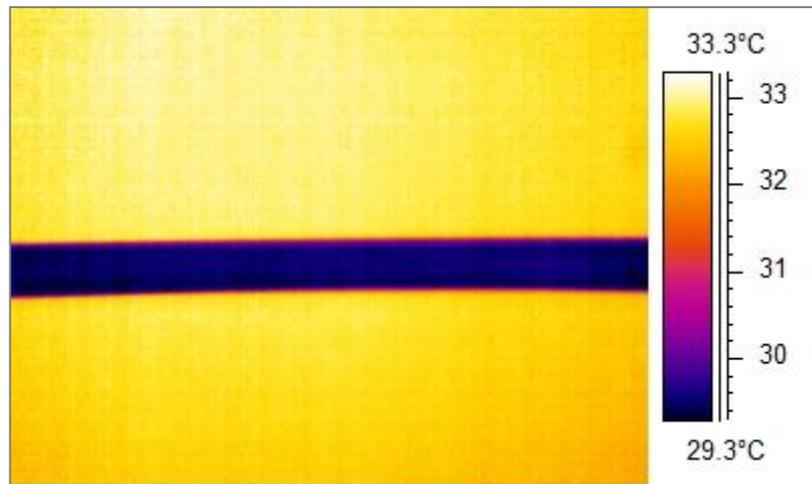


**Figura 78:** Força Média x Corrente - Molas 01, 02 e 03.

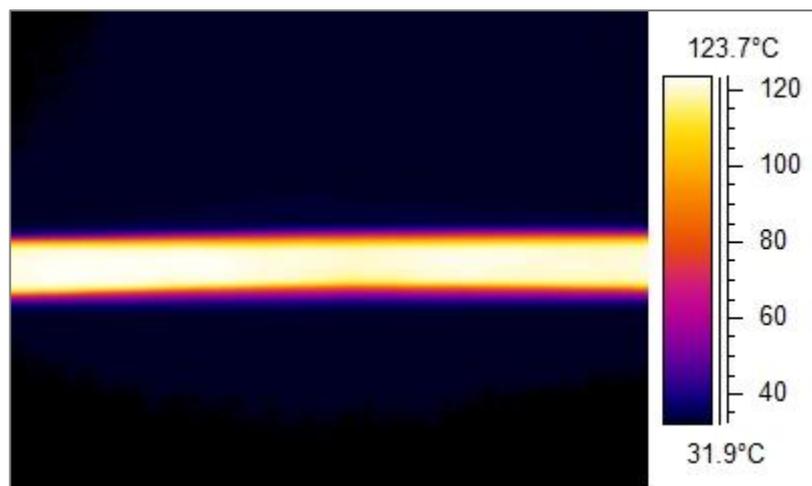
Como pode ser visto a Figura 78, as forças foram superiores na Mola 01. As Molas 02 e 03 apresentaram médias de força muito próximas sendo que a Mola 03 apresentou uma média de força maior para as intensidades de 1 A. Nas intensidades de 2 A e 3 A as Molas 02 e 03 apresentaram forças com valores similares.

## 5.5 – Temperatura

Todos os testes foram feitos com a utilização de uma câmera termográfica para a aquisição das temperaturas referentes à cada ciclo. A temperatura se dá por efeito Joule, pela passagem das correntes elétricas provindas da fonte de corrente contínua, 1 A, 2 A e 3 A como já discutido. As Figuras 79 e 80 apresentam a imagem que é obtida do filme da câmera termográfica Flir A320, uma para o fio em temperatura ambiente e outra para o fio submetido a uma corrente elétrica de 2 A que atinge 124°C, aproximadamente.

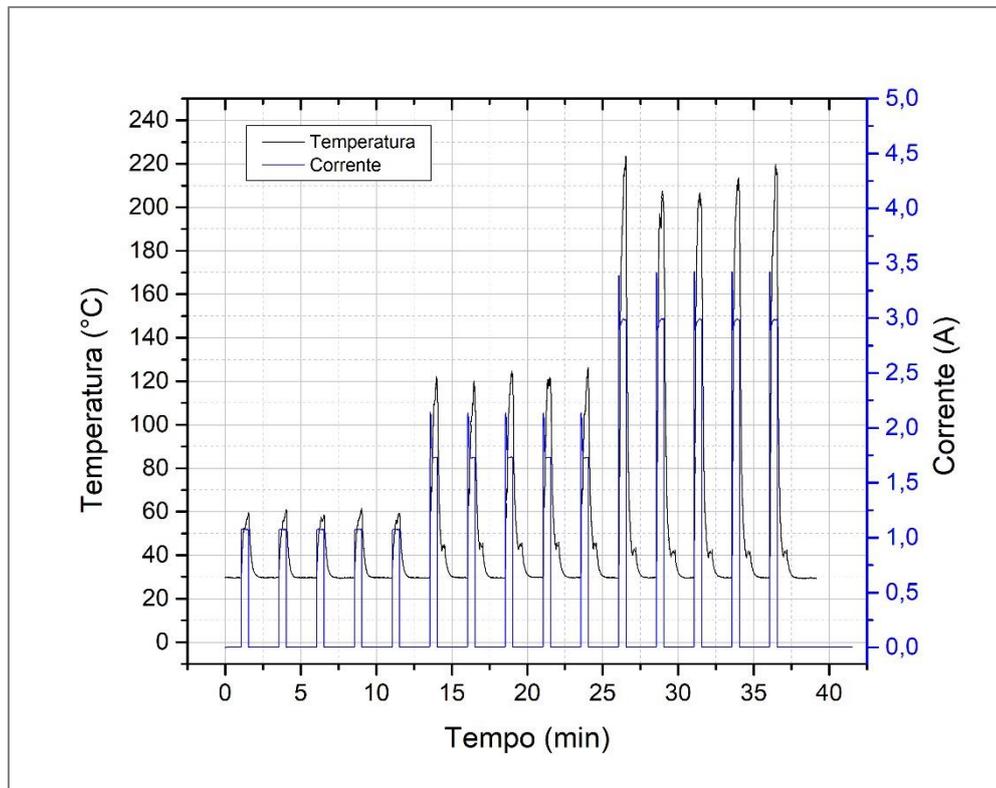


**Figura 79:** Fio em temperatura ambiente – 0 A.



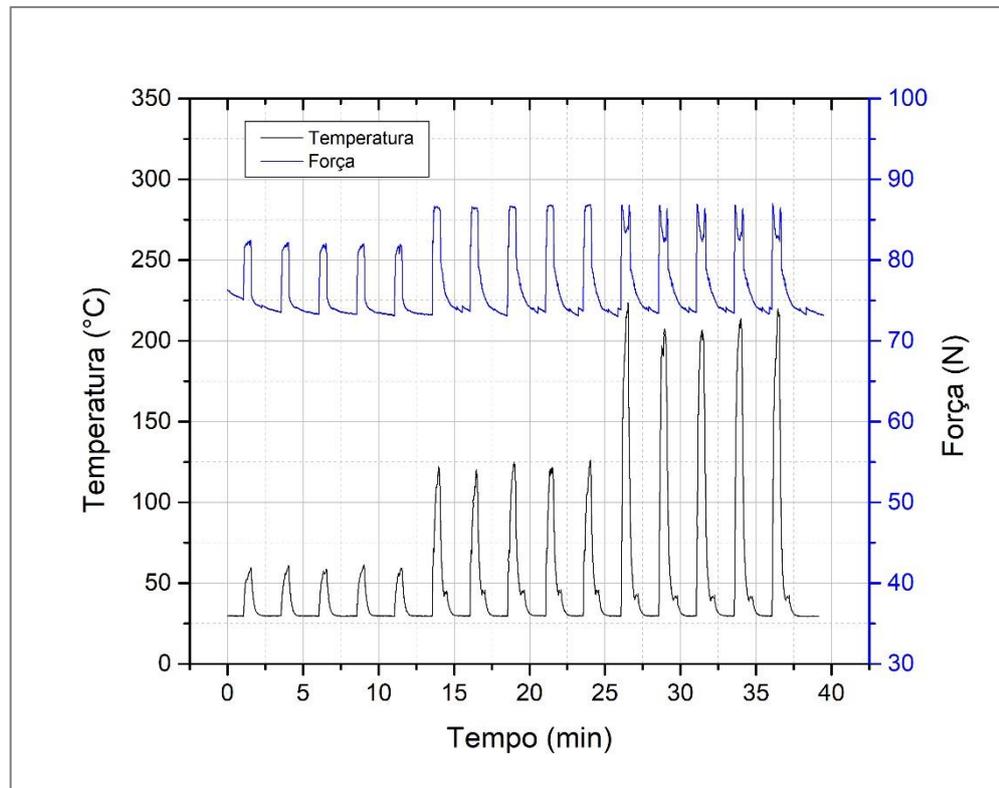
**Figura 80:** Fio à 124°C – 2 A.

Assim, as temperaturas para as correntes citadas são relativamente altas comparadas à temperatura ambiente, logo, a mesma não influencia a máxima temperatura atingida no fio. Com isso as curvas de aquecimento se mostraram bastante próximas para as Molas 01, 02 e 03. As Figuras 79 e 80 colorações variadas que, de acordo com a escala ao lado, existe um gradiente de temperatura com uma variação de 60°C do centro para a periferia do fio, o que não é o que ocorre de fato. Essa variação se dá pela superfície curva do fio que faz com que existam pontos mais distantes, impossibilitando o foco em toda a seção transversal do fio. A Figura 81 a seguir mostra a relação da temperatura com a corrente elétrica para a Mola 01.



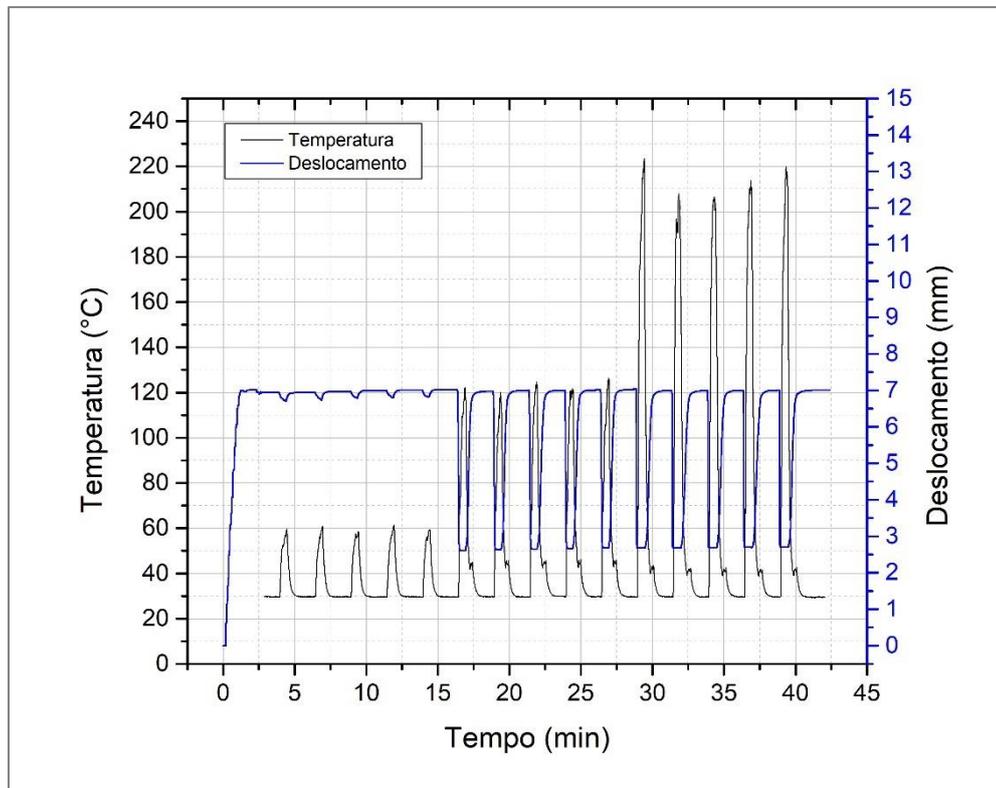
**Figura 81:** Temperatura e Corrente x Tempo - Mola 01.

É possível observar na Figura 81 que a corrente se manteve estável ao longo dos 5 primeiros ciclos, contudo, depois é possível perceber que a mesma sofreu alterações nos primeiros instantes dos ciclos seguintes. A corrente de 1 A se manteve com o módulo desejado assim como a corrente de 3 A. Já a corrente de 2 A, após a alteração dos instantes iniciais, decaiu e se estabilizou em aproximadamente 1,75 A e este comportamento pode ser observado nos ciclos dessa mesma intensidade. Apesar dessas variações, a temperatura nas correntes de 1 A e 2 A se mostrou estável, já na corrente de 3 A é possível identificar uma queda considerável de 15°C nos ciclos 2 e 3. No quarto ciclo a que foi de 10°C. Na Figura 82 pode-se observar a relação da temperatura com a força para a Mola 01.



**Figura 82:** Temperatura e Força x Tempo - Mola 01.

A Figura 82 apresenta a relação entre a Temperatura e Força no sistema. É possível ver a relação direta entre as duas variáveis visto que ambas possuem um comportamento muito similar. No início de cada ciclo é possível perceber que a temperatura sobe rapidamente quando a corrente elétrica começa a atuar e, da mesma forma, o módulo da força se eleva chegando rapidamente à força máxima do ciclo. Com o cessar da corrente, o fio começa a perder calor para o ambiente numa velocidade menor do que a velocidade de aquecimento e isso pode ser visto à medida que as curvas apresentam uma queda mais suave na temperatura pós-ciclo. Da mesma forma acontece com a força, tendo um tempo de descarregamento maior do que o tempo de carregamento, o que se traduz na diferença de inclinação da curva nos dois momentos. A Figura 83 mostra a relação da temperatura com o deslocamento para a Mola 01. É possível notar que independentemente das variações consideráveis nas curvas da temperatura os deslocamentos continuaram com o mesmo comportamento uniforme como visto em seções anteriores deste trabalho.



**Figura 83:** Temperatura e Força x Tempo - Mola 01.

## Capítulo 6 - Proposta Conceitual de Atuação de Válvula *Gas Lift* com SMA

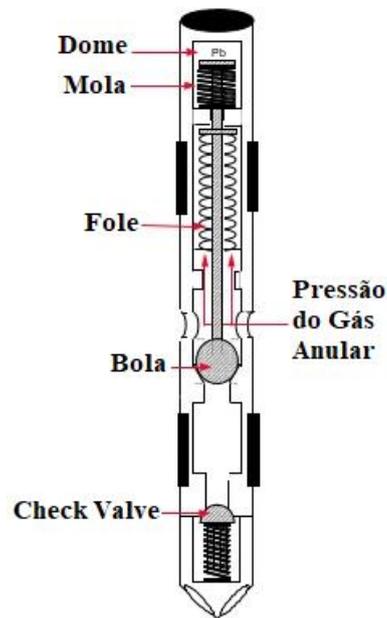
Tendo em vista os resultados obtidos durante os ensaios experimentais, desenvolvido um modelo em 3D, utilizando o *software* SolidWorks 2016, com a finalidade de demonstrar de uma forma mais precisa a atuação de um sistema fio de SMA-mola convencional dentro de uma válvula *Gas Lift*.

Importante salientar que os projetos das válvulas de *Gas Lift* representam uma propriedade intelectual das empresas fabricantes e não foi possível obter dimensões ou especificações de válvulas específicas. Também é interessante comentar que existem inúmeras variações de projetos de válvulas, com o objetivo de atender a cada exploração específica na indústria de óleo e gás.

Geralmente a atuação de uma válvula *Gas Lift* está em função da pressão do gás presente na tubulação anular. A válvula é projetada para abrir a partir do momento em que a pressão atinja um patamar pré-estabelecido, fazendo com que o gás seja liberado. A válvula fechará quando a pressão diminuir, interrompendo o fluxo de gás do anular para dentro da coluna de produção.

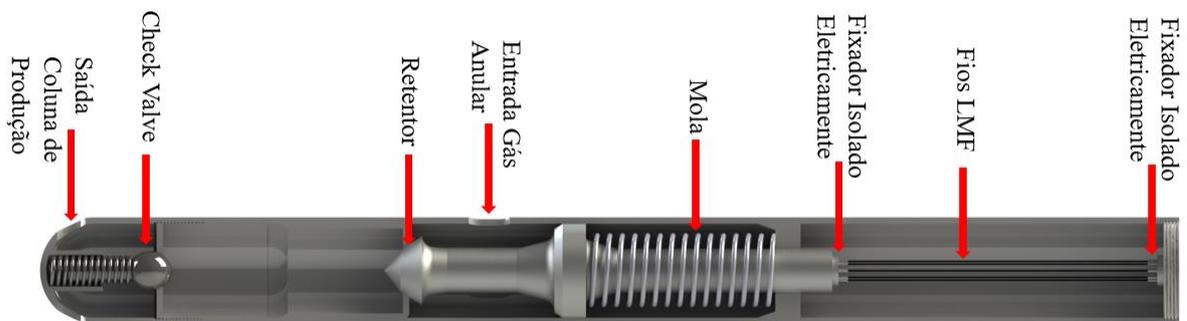
Dentro da válvula existe uma região chamada de domo, que é preenchida com gás nitrogênio e está ligada diretamente com uma mola. A pressão do gás da região anular deve ser suficiente para vencer as forças geradas pela pressão do gás nitrogênio e da mola, com a conseqüente abertura da válvula. Colocando-se mais nitrogênio dentro do domo, maior será a pressão requerida do gás da tubulação anular para que a válvula abra. Essa atuação é típica de uma válvula *Gas Lift* Intermitente. A válvula de *Gas Lift* Contínua pressupõe a injeção contínua de gás, não possuindo mecanismos de fechamento.

A Figura 84 ilustra uma válvula de *Gas Lift* típica, indicando suas principais partes, sendo essa válvula fechada, quando a esfera encostando na sede da válvula.



**Figura 84:** Desenho de válvula *Gas Lift* (Google Images)

Dentro desse contexto, a válvula com atuação de *SMA* pode ser aplicada tanto para sistemas intermitentes quanto para contínuos. A Figura 85 mostra o desenho em 3D renderizado.



**Figura 85:** Desenho de válvula atuada com fios de *SMA* (SolidWorks 2016).

O sistema representa o aparato experimental desenvolvido no presente trabalho. A válvula contém 5 compartimentos: um que abriga os fios de *SMA*, um para a mola, um de entrada do gás da tubulação anular, um sem função específica e o compartimento onde está instalada a *Check Valve*, que possui as saídas para a coluna de produção.

A haste corre dentro do módulo, estando a mola comprimida, sendo a válvula normalmente fechada. O gás entra na região central da válvula a partir de um orifício, como é visto em outras válvulas *Gas Lift* e o retentor trava o fluxo. Quando uma corrente elétrica aquece os fios de *SMA* acima de  $T_{Af}$ , ocorre a recuperação dos fios, puxando a haste e comprimindo a mola, liberando o fluxo de gás para as regiões inferiores, com a consequente liberação do fluxo pela *Check Valve*.

Com a interrupção da corrente elétrica nos fios de *SMA*, acontece o resfriamento e posterior deformação dos fios pela mola, vedando o fluxo de gás no sistema. Posteriormente, a *Check Valve* atuará, interrompendo o eventual fluxo de óleo que poderia passar da coluna de produção para o gasoduto anular.

Todavia, deve-se considerar os possíveis problemas que o sistema pode causar. Os fios devem estar isolados eletricamente do sistema, visto a válvula entra em contato com materiais inflamáveis. Além disso, o fechamento da válvula não é instantâneo. O tempo entre o fim da energização dos fios com seu posterior arrefecimento e a total restrição do fluxo deve ser devidamente calculado dentro de cada projeto.

## Capítulo 7 - Conclusão

### 7.1 – Conclusões do Projeto

É clara a importância do desenvolvimento tecnológico na indústria de Óleo e Gás, como foi visto nos Capítulos 2 e 3. A produção desses produtos na nossa sociedade é de grande relevância devido a vasta empregabilidade do petróleo e seus derivados nas mais diferentes indústrias, nas quais impactam no nosso dia a dia. Além disso, introduzir as Ligas de Memória de Forma nesse ambiente traz, sem dúvidas, grandes desafios tecnológicos, porém pode representar soluções inovadoras, tendo como propósito processos com alta confiabilidade e segurança.

Para a utilização otimizada e segura das ligas de memória de forma como atuadores termomecânicos faz-se necessário um estudo de caracterização prévia para que as mesmas possam ser utilizadas. O funcionamento do atuador baseia-se, essencialmente, nas propriedades mecânicas que a liga apresenta, ou seja, qualquer mudança microestrutural provinda de alguma solicitação mecânica indevida ou até mesmo alguma falha no processo de fabricação do material pode tornar todo o conjunto inutilizável.

Assim, além das propriedades mecânicas serem de suma importância para o comportamento desejado, o controle das deformações se dá basicamente pelo controle da temperatura a qual o fio é submetido. Neste trabalho pudemos concluir que correntes acima de 2 A não ocasionavam maiores deslocamentos independentemente da força aplicada no fio.

Com os ensaios experimentais, concluiu-se que o sistema apresentou boa capacidade de recuperação em condições de transformação total da fase austenítica, aproximadamente 60% de recuperação. Os resultados mostraram, também, performances aproximadas quando utilizadas correntes de 2 A e 3 A enquanto que a corrente de 1 A não se revelou suficiente para transcorrer a transição completa da martensita não-maclada para a fase austenítica. Apesar da corrente de 1 A atingir uma temperatura entre  $T_{As}$  e  $T_{Af}$ , seus deslocamentos foram muito inferiores aos das demais intensidades de corrente elétrica.

## 7.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Nesta seção apresentaremos alguns pontos a serem considerados a fim de possibilitar a implementação de melhorias visando atingir maior controle e qualidade nos resultados experimentais. A seguir discutiremos esses pontos:

1. Os componentes do aparato experimental não foram confeccionados de forma a garantir tolerâncias dimensionais refinadas, isto é, a fabricação de alguns componentes poderia ter sido feita por processos de usinagem mais avançados de forma a melhorar a qualidade dos alinhamentos e minimizar ao máximo os atritos;
2. Na etapa de posicionamento das molas, seria interessante o desenvolvimento de alguma melhoria que permitisse maior controle do deslocamento da mola a fim de garantir a repetibilidade no que diz respeito à força inicial determinada para atuar em conjunto com o fio, pois como pode ser visto nas figuras da seção 5.1 deste trabalho, a força e o deslocamento sofreram algumas alterações nos momentos iniciais, após a liberação do carrinho;
3. Com relação as diferentes forças para deformar o fio no início do teste, faz-se necessário a implementação de uma metodologia que controle a taxa de carregamento para que a força não atinja valores excessivos e faça com que o fio sofra deformações plásticas;
4. Outro ponto importante seria a escolha das configurações e geometrias de alguns componentes de forma a garantir que as solicitações mecânicas não provoquem deformações perceptíveis pelos sensores envolvidos no teste de forma a interferir nos resultados de força ou deslocamento;
5. A temperatura é crucial para a análise do experimento, assim, faz-se de suma importância um cuidado maior no que se refere à aquisição dessa variável. A câmera termográfica possui algumas limitações que influenciam diretamente na análise. Dentre elas, a dificuldade de foco é uma das preocupações que deve estar presente durante toda a duração dos testes, pois qualquer mudança no foco, mesmo que mínima, faz com que todo o teste seja invalidado. Para isso, seria interessante algum suporte que melhorasse a condição de configuração do foco. Outra questão a respeito da câmera é que o seu software não permite o monitoramento em tempo real, assim, se

ocorre alguma avaria durante processo, a mesma, só poderá ser identificada após o término do teste.

6. Uma alternativa para garantir a aquisição correta da temperatura seria a utilização de termopares, contudo, como existe passagem de corrente elétrica no fio se faz necessário a utilização de um material dielétrico que permita a transmissão de calor;
7. Por último, para um controle mais preciso no atuador se faz necessária uma investigação mais aprofundada das correntes elétricas entre 1 A e 2 A, mais precisamente abaixo de 1,5 A. Essas correntes resultaram em uma instabilidade considerável no deslocamento. A Figura A1, que pode ser vista no Apêndice A, apresenta os resultados para os ciclos de 1 A, 1.1 A, 1.2 A, e 1.3 A e a Figura A2 mostra os resultados de deslocamento x corrente em detalhe.

## Capítulo 8 - Bibliografia

AGUIAR, R. A. A., **Análise da Redução de Vibrações de Sistemas Mecânicos Utilizando Ligas com Memória de Forma**. Rio de Janeiro: COPPE UFRJ, 2011.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Gas Lift Manual** (Vol. Gas Lift (Book 6 of the vocational training series)). Exploration and Production Department, 1994.

AUSTIN, D.; CARRIKER, B.; MAC GUIRE T. PRATT, J.; PRIEST, T.; PULSIPHER A. G. **History Of the Offshore Oil and Gas Industry In Southern Louisiana**, Interim Report, U. S. Department of the Interior, MMS, July 2004. Disponível em: <[https://www.lsu.edu/ces/publications/2004/2004-049\\_Final\\_Report.pdf](https://www.lsu.edu/ces/publications/2004/2004-049_Final_Report.pdf) >. Acesso em: 16/10/2017

CHAITANYA, S., DHANALAKSHMI, K.. **Control of Shape Memory Alloy Actuated Gripper using Pulse-Width Modulation**, \* Vignan University, Vadlamudi National Institute of Technology, Tiruchirappalli. India, 2014.

CHRISTIE, A.; KISHINO, A.; CROMB, J.; HENSLEY, R.; KENT, E.; MC-BESTH, B.; STEWART, H.; VIDAL, A.; KOOT, L. **Subsea Solutions. Oil - field Review**, Winter 1999/2000. Disponível em: <[https:// www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors99/win99/pages2\\_19.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors99/win99/pages2_19.pdf)>. Acesso em: 16/10/2017.

DYNALLOY INC. Tech Sheets. DYNALLOY, Inc. **Makers of Dynamic Alloys**. Disponível em: <[http://www.dynalloy.com/tech\\_sheets.php](http://www.dynalloy.com/tech_sheets.php)>. Acesso em: 11/12/2017.

FILHO, H. A. **Otimização de Gás Lift na Produção de Petróleo: Avaliação da Curva de Performance do Poço**, – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

FLIR. Disponível em: <http://www.flir.com.au/about/display/?id=41528>. Acesso em: 21/04/2018.

FLOWSERVE. Disponível em: <http://slideplayer.com/slide/9080379/>. Acesso em: 17/05/2018.

FLUKE. Disponível em: <http://en-us.fluke.com/training/training-library/measurements/how-infrared-cameras-work.html>. Acesso em: 21/04/2018.

GE OIL & GAS. **Choke Valves**. Disponível em: <https://www.geoilandgas.com/drilling/onshore-drilling/choke-valves>. Acesso em: 19/11/2017.

GRECHI, P.; ALVES, A., **Estudo Comparativo Entre Sistemas Submarinos de Isolamento (SSIS) com Válvulas Submarinas De Isolamento (SSIV) Do Tipo Esfera e Gaveta.** 2016.

GUOA, Z., PAN, Y., WEE, L., YU, H.. **Design And Control Of A Novel Compliant Differential Shape Memory Alloy Actuator**, Department of Biomedical Engineering, National University of Singapore, 9 Engineering Drive 1, Singapore 117575bDSO National Laboratories, 20 Science Park Drive, Singapore 118230a. Singapore, 2015.

HANSEN, S., **Modelling Failure Mechanisms in Subsea Equipment.** NTNU, 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Oil Information: Overview.** 2017 Disponível em: [http://www.iea.org/bookshop/754-Oil\\_Information\\_2017](http://www.iea.org/bookshop/754-Oil_Information_2017). Acesso em: 16/10/2017.

KOÇ, İ., ERAY, T., SÜMER, B.; ÇERÇİ, N.. **An Active Force Controlled Laparoscopic Grasper by Using a Smart Material Actuation** Department of Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, Beyoglu, Istanbul, Turkey Department of Mechanical Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey, 2016.

KRISHNAN, R.V.; DELAEY, L.; WARLIMONT, H.. **Thermoelasticity, Pseudoelasticity And The Memory Effects Associated With Martensitic Transformations**, Part. 1 Structural and microstructural changes, Journal of Materials Science, vol. 9, p. 1521-1535, 1974

LAGOUDAS, D.C., 2008. **Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications.** Springer, New York, NY, USA.

LUFKIN, Gas Lift Systems. Catálogo, 2011.

MARTIN, K., **At The Ready: Subsurface Safety Valves**, Oilfield Review, 2002. Disponível em: [https://www.slb.com/resources/publications/industry\\_articles/oilfield\\_review/2002/or2002win04\\_safetyvalves.aspx](https://www.slb.com/resources/publications/industry_articles/oilfield_review/2002/or2002win04_safetyvalves.aspx). Acesso em: 15/11/2017.

MONTEIRO, P.C.C., MONTEIRO, L. L. S., SAVI, M. A., PACHECO P. M. C. L. e PAIVA T., **A Comparative Analysis Of Different Shape Memory Alloy Actuator Configurations.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016.

NAKASHIMA, P. H. R., **Otimização de Processos de Produção de Petróleo Via Injeção Contínua.** Tese de D. Sc. PPGEE/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2004.

NOIA – NATIONAL OCEAN INDUSTRIES ASSOCIATION. **History of Offshore**, 2006. Disponível em: <http://www.noia.org/history-of-offshore/>. Acesso em: 16/10/2017.

OFFSHORE TECHNOLOGY. **Well Oiled – New Standards for Subsea Valves**. Disponível em: < <https://www.offshore-technology.com/features/feature96758/>>. Acesso em: 19/11/2017.

RAO, A., SRINIVASA, A., REDDY, J. **Design Of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators**. Springer, 2015.

SILVA, L., JUNIOR, P., NETTO, T., SAVI, M.. **Experimental Investigation Of The Influence Of The Heating Rate in an SMA Actuator Performance**. Sensors and Actuators A: Physical, 2013.

SILVEIRA, G. M. e CHERMONT, R. A., **Desenvolvimento de uma válvula inteligente acionada por atuador de liga de memória de forma**, CEFET/RJ, 2017.

SONG, G.; HU, Z.; SUN, K.; MA, N.; ECONOMIDES, M.; SAMUEL, R.; ECONOMIDES, E. **An Innovative Ultradeepwater Subsea Blowout Preventer Control System Using Shape Memory Alloy Actuator**, 2008; Journal of Energy Resources Technology, 130.

SONG, G.; PATIL, D.; KOCUREK, C.; BARTOS, J. **Applications of Shape Memory Alloys in Offshore Oil and Gas Industry: A Review**, 2010

TERÇO, H. **Caracterização de Um Fio de Memória De Forma para a Aplicação em Projeto de Mão Robótica**. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2017.

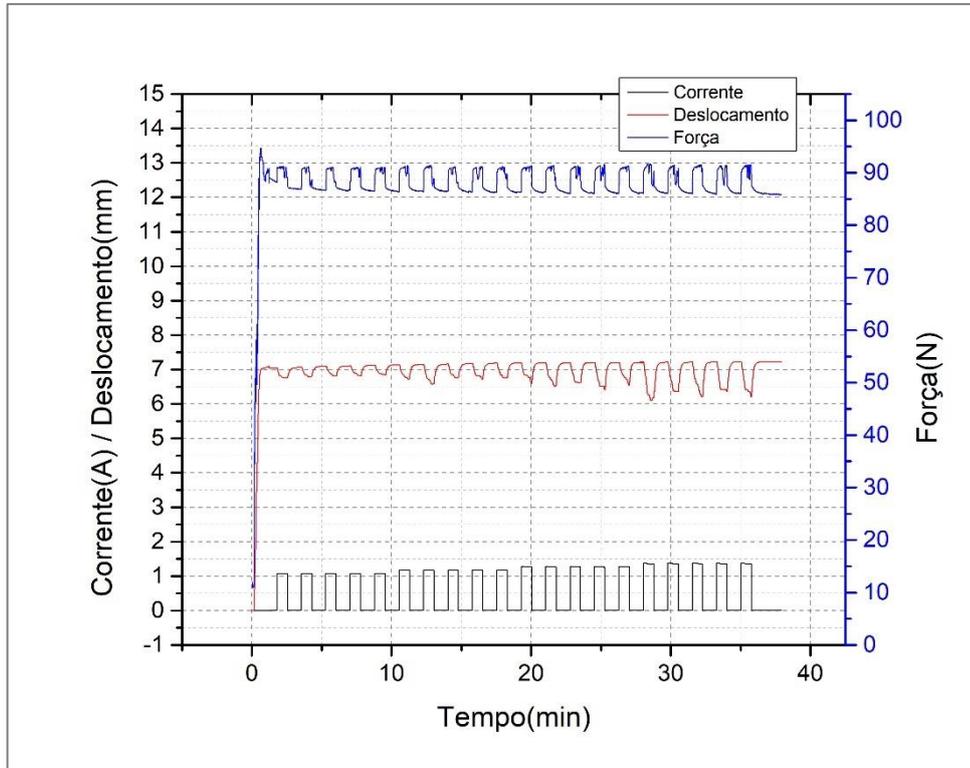
THOMAS, J. E., 2004, **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Editado por José Eduardo Thomas, 2ª edição, Interciência: Petrobrás, Rio de Janeiro. Lufkin Industries, Gas Lift Systems, 2011

WADDELL. A., PUNCH, J., STAFFORD, J., JEFFERS, N.. **On the Hydrodynamic Characterization of a Passive Shape Memory Alloy Valve**. CTVR, Stokes Institute, University of Limerick, Limerick, Ireland Thermal Management Research Group, Bell Labs, Alcatel-Lucent. Dublin, Ireland, 2015.

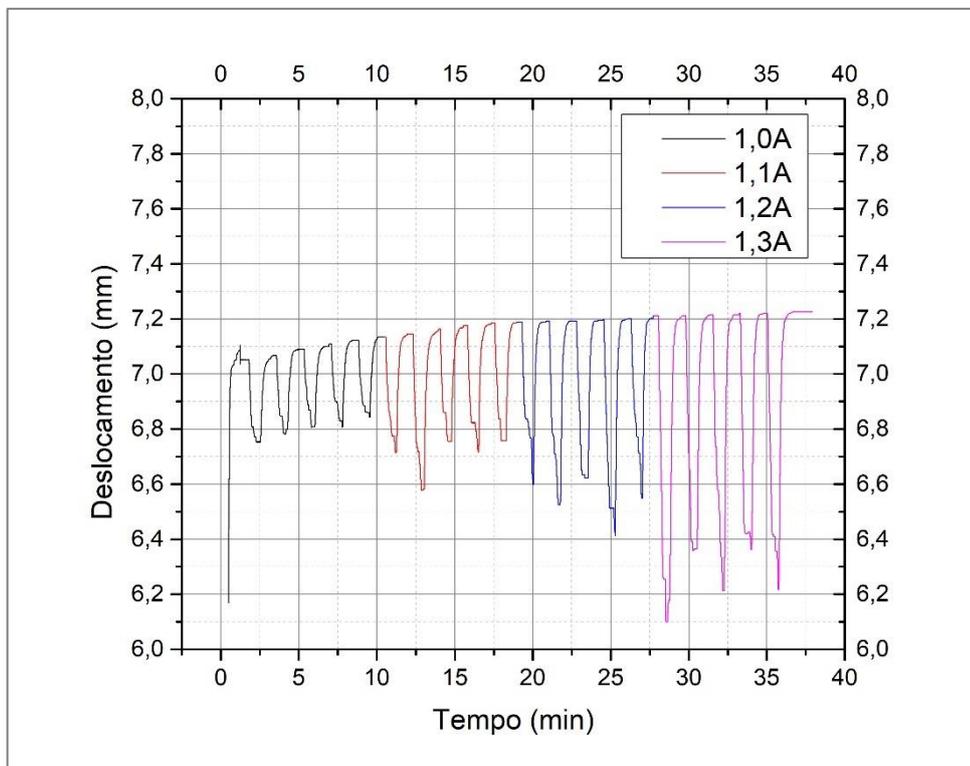
WANG, W., RODRIGUE, H., KIM, H., HAN, M., AHN, S.. **Soft Composite Hinge Actuator and Application to Compliant Robotic Gripper**, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Seoul, Republic of Korea, 2016.

WAYMAN, C. & DUERIG, T. W., 1990. **Engineering Aspects Of Shape Memory Alloys**.

## Apêndice A



**Figura A1:** Correntes de 1 A, 1.1 A, 1.2 A e 1.3 A - Mola 02



**Figura A2:** Deslocamento em detalhe.