

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

**Caracterização Termomecânica de um Atuador baseado  
em Ligas com Memória de Forma**

Luma Monteiro Forno

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2018**

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

## **Caracterização Termomecânica de um Atuador baseado em Ligas com Memória de Forma**

Luma Monteiro Forno

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> Coorientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2018**

# FICHA CATALOGRÁFICA

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível. Agradeço à minha família, por todo suporte emocional que recebi em um momento de tamanha importância para minha vida profissional.

Gostaria também de fazer um agradecimento em especial, ao engenheiro Thiago Chagas, por me proporcionar a oportunidade do estudo deste projeto, além de toda a ajuda durante a realização do mesmo. E ao também engenheiro Marcelo Cutin, por toda ajuda, pelos conselhos pessoais e profissionais e pela amizade.

Por último e não menos importante, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Ricardo Amar Aguiar e Luciana Loureiro, pela orientação e paciência durante o ano de 2018.

## RESUMO

Ligas com memória de forma são materiais que possuem a capacidade de recuperar a forma original mesmo após sofrer diversas deformações. A busca por materiais mais leves e cada vez mais resistentes proporcionaram o impulso necessário para o desenvolvimento dessas ligas e utilização em projetos de atuação resistentes, de baixa complexidade e tamanho reduzido. Este projeto tem como objetivo o estudo de caracterização termomecânica de um atuador linear que utiliza fios de Liga com Memória de Forma para produzir um movimento de rotação e consequente acionamento de uma válvula. Testes com um fio com memória de forma em um sistema de patescas foram realizados em diferentes configurações, usando molas de aço de rigidezes diferentes, com o objetivo de caracterizar o mecanismo e estudar a aplicação como atuador de válvulas. Foi verificada a influência do aumento da corrente elétrica no comportamento do atuador, além dos efeitos ocasionados pela mudança das molas usadas.

Palavras-chave: Memória de Forma, Atuadores, Válvula.

## **ABSTRACT**

Shape Memory Alloy are materials that have the ability to recover the original shape even after suffering several deformations. The search for lighter and more resistant materials provides the necessary impetus for the development of these alloys and its use in resistant actuation projects, with low complexity and reduced size. The purpose of this project is the thermo-mechanical characterization study of a linear actuator using Shape Memory Alloy wires to produce a rotative movement and consequent actuation of a valve. Tests with a shape memory wire in a pulley system were performed in different forms using steel springs with different rigidity, with the purpose of characterizing the mechanism and studying the application as a valve actuator. It was verified the influence of the electrical current on the actuator behavior and the effects caused by the change of the springs used.

Key-words: Shape Memory Alloy, Actuators, Valves.

# Sumário

Capítulo 1 .....	1
Introdução.....	1
1.1 – Motivação .....	1
1.2 – Histórico.....	2
1.3 – Justificativa .....	3
1.4 – Objetivos.....	3
1.5 – Organização do Trabalho.....	3
Capítulo 2 .....	5
Revisão Bibliográfica .....	5
2.1 – Análise dos Fenômenos das Ligas com Memória de Forma.....	5
2.2 – Efeito Memória de Forma .....	7
2.2.1 – Efeito Memória de Forma com Tensão Assistida .....	11
2.4 – Aplicações .....	14
2.4.1 – Indústria Automotiva.....	14
2.4.2 – Indústria Aeronáutica .....	15
2.4.3 – Indústria Aeroespacial .....	16
2.4.4 – Aplicações Biomédicas .....	17
2.5 – Aplicações em Atuadores de Válvulas .....	19
2.5.1 – Válvula Combinada para Aquecedores Auxiliares Veiculares.....	20
2.5.2 – Microválvulas de SMA.....	21
2.5.3 – Microválvulas de Ligas de Memória de Forma Biestáveis .....	22
2.5.4 – Válvula Comutadora.....	23
2.6 –Aplicação na Indústria de Óleo e Gás .....	26
2.6.1 – Blow-out Preventers .....	27
2.6.2 – Atuador de Ferramenta de Downhole.....	28

2.7 – Patentes Registradas .....	29
2.7.1 – Atuador Rotativo usando Liga de Memória de Forma.....	29
2.7.2 – Atuador com Memória de Forma .....	31
Capítulo 3 .....	33
Possíveis Aplicações: Estudo de caso de uma Válvula Esfera.....	33
3.1 – Introdução.....	33
3.2 – Estudo de Caso de uma Válvula Esfera Atuada .....	35
3.3.1 – Válvula esfera com acionamento elétrico.....	38
Capítulo 4 .....	41
Metodologia.....	41
4.1 – Metodologia do Projeto .....	41
4.2 – Aparato Experimental.....	42
4.3 – Funcionamento do Atuador .....	43
4.4 – Instrumentos Utilizados .....	44
4.4.1 – Fonte .....	44
4.4.2 – Multímetro .....	45
4.4.3 – Alicata Amperímetro .....	46
4.4.4 – Câmera Termográfica .....	46
4.4.6 – Deslocamento .....	47
4.5 – Cronograma de Ações .....	47
4.6 – O Experimento.....	48
4.6.1 – O Fio de SMA .....	49
4.6.2 – As Molas.....	49
4.6.3 – O Atuador .....	51
4.6.3 – Configuração 1 .....	53
4.6.3.1 – Início dos Testes .....	54
4.6.2 – Configuração 2 .....	57

4.6.4 – Configuração 3 .....	59
4.6.5 – Nova Abordagem.....	64
4.6.5.1 – Testes .....	66
Capítulo 5 .....	67
Resultados.....	67
5.1 – Considerações Iniciais .....	67
5.2 – Teste 5 .....	67
5.3 – Teste 6 .....	69
5.4 – Teste 7 .....	70
5.5 – Teste 8 .....	72
5.6 – Teste 9 .....	73
5.7 – Teste 10 .....	74
5.8 – Notas e Observações.....	77
Capítulo 6 .....	78
Conclusões.....	78
6.1 – Conclusões do Estudo .....	78
6.2 – Sugestões para Estudos Futuros.....	80
Referências Bibliográficas.....	81

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2. 1** – Mudança de fase induzida por temperatura em SMA. [1 - modificada]
- Figura 2. 2** - (a) Processo de transformação de martensita maclada para a variante não maclada quando um carregamento é aplicado. (b) Efeito do descarregamento e posterior aquecimento resultando na recuperação de forma de um SMA. [1 - modificada]
- Figura 2. 3** – Diagrama Tensão x Deformação x Temperatura para uma liga de NiTi com efeito memória de forma [1 - modificada].
- Figura 2. 4** – Diagrama Tensão x Deformação x Temperatura para SMA [16].
- Figura 2. 5** – Transformação de fase induzida por temperatura na presença de carregamento [1 - modificada].
- Figura 2. 6** – Representação simplória do Efeito Memória de Forma com Tensão Assistida [16 – modificado]
- Figura 2. 9** – Aplicações para atuadores usando molas de NiTi [2 - modificada] .
- Figura 2. 10** – Aplicação de SMA nos motores de um Boeing [1].
- Figura 2. 11** – Dobradiças de SMA mostradas nas suas duas configurações, aberta e fechada [1].
- Figura 2. 12** – Filtro de Simon [1].
- Figura 2. 13** – Stents (a) Esquemática das configurações aberta e fechada [1]. (b) Ilustração do posicionamento de um *Stent* no vaso sanguíneo [17].
- Figura 2. 14** – Atuador SMA usando aquecimento térmico direto [4 - modificada].
- Figura 2. 15** - Válvula combinada para aquecedores Auxiliares ou *Thermostat Combi Valve for Auxiliary Heaters* [4].
- Figura 2. 16** – Tamanho da Microválvula em relação a um lápis [18].
- Figura 2. 17** – Microválvulas Monoestáveis Normalmente Abertas e Normalmente Fechada [18 - modificada].
- Figura 2. 18** – Microválvulas Biestáveis (a) Modelo simplificado. (b) Modelo usando esfera como elemento de vedação [18 – modificada].
- Figura 2. 19** – Arranjo de uma válvula magnética [5].
- Figura 2. 20** – Posicionamento do fio de SMA passando por dentro da mola [5].
- Figura 2. 21** - (a) Modelo de válvula desenvolvida e testada. (b) Possível modificação [5 - modificada].

**Figura 2. 22** – Esquema BOP. (a) BOP Inativo. (b) BOP Atuado [9 - modificada].

**Figura 2. 23** – Diagrama esquemático de um BOP com fios SMA [9 - modificada].

**Figura 2. 24** – Esquemática do dispositivo atuador da ferramenta de *downhole* [9 - modificada].

**Figura 2. 25** – Mecanismo de Atuação Rotativa usando Liga de Memória com Forma [10 - modificada].

**Figura 2. 26** – Atuador de persianas com memória de forma [12].

**Figura 3. 1** – Válvula de acionamento manual. (fonte: Site *Swagelok*)

**Figura 3. 2** – Válvula de esfera com acionamento manual (a) Posição aberta. (fonte: Google Imagens) (b) Representação do fluxo com a válvula aberta e fechada. (fonte: Catálogo *Swagelok*).

**Figura 3. 3** – Válvulas esfera com acionadores pneumáticos [11].

**Figura 3. 4** – Dimensões do acionador pneumático [14].

**Figura 3. 5** – Acionador elétrico [13].

**Figura 3. 6** – Atuador elétrico *Swagelok* [13]

**Figura 4. 1** - Representação esquemática da metodologia do experimento [8].

**Figura 4. 2** – Esquemática do Aparato Experimental.

**Figura 4. 3** – Foto do Atuador na Configuração 1

**Figura 4. 4** – Vista da extremidade móvel do atuador.

**Figura 4. 5** – Fonte de Alimentação Elétrica

**Figura 4. 6** – Multímetro

**Figura 4. 7** – Alicates Amperímetro

**Figura 4.8** – Câmera Termográfica Fluke (fonte: <http://www.getrotech.com.br/filtros/termografia/fluke-ti110-camera-de-imagens-termicas.html>)

**Figura 4. 9** – Régua Graduada Comum

**Figura 4. 10** – Molas

**Figura 4. 11** – Curvas de Rigidezes das Molas. (a) Mola 1. (b) Mola 2. (c) Mola 3.

**Figura 4. 12** – Resultante de Forças na patesca (fonte: autor)

**Figura 4. 13** – Diagrama de Corpo Livre

**Figura 4. 14** – Esquema para cálculo do comprimento do fio (fonte: autor).

**Figura 4. 15** – Configuração 2 da Bancada de Testes.

**Figura 4. 16** – Haste multiplicadora de forças.

**Figura 4. 17** – Esquemático da bancada com haste multiplicadora de forças.

**Figura 4. 18** – Configuração 3 usando a mola 3.

**Figura 4. 19** – Diagrama da Haste

**Figura 4. 20** – Resultado do pré-teste da Configuração.

**Figura 4. 21** – Danos causados na estrutura após soltura do *crimp*.

**Figura 4. 22** – Atuador desmontado.

**Figura 4. 23** – Montagem da bancada para a nova abordagem.

**Figura 5. 1** – Ciclos de Aquecimento e Resfriamento para 1 A.

**Figura 5. 2** – Ciclos de Aquecimento e Resfriamento para 1,5 A.

**Figura 5. 3** – Ciclos de aquecimento e resfriamento para 2 A.

**Figura 5. 4** – Força x Deslocamento para 1,5 e 2 A.

**Figura 5. 5** – Deslocamento Médio x Corrente para a Mola 2.

**Figura 5. 6** – Ciclos de aquecimento e resfriamento para 1,5 A.

**Figura 5. 7** - Ciclos de aquecimento e resfriamento para 2 A.

**Figura 5. 8** – Força x Deslocamento para 1,5 e 2 A.

**Figura 5. 9** - Deslocamento Médio x Corrente para as Molas 2 e 3.

**Figura 5. 10** - Gráfico Força x Deslocamento para as Molas 2 e 3.

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 3. 1** – Tabela de Dimensões do Fabricante *Swagelok* (fonte: Catálogo *Swagelok*)

**Tabela 3. 2** – Designações para o atuador *Swagelok* [13].

**Tabela 4. 1** – Informações do Fabricante do Fio

**Tabela 4. 2** – Rigidezes das Molas

**Tabela 4. 3** – Informações do fabricante da patesca

**Tabela 4. 4** – Teste 1 na Configuração 1

**Tabela 4. 5** – Testes 2, 3 e 4 na Configuração 1

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$A$  – Austenita

$A_f$  – Temperatura final de transformação para a fase austenítica

$A_s$  – Temperatura inicial de transformação para a fase austenítica

$M$  – Martensita

$M_f$  – Temperatura final de transformação para a fase martensítica

$M_s$  – Temperatura inicial de transformação para a fase martensítica

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_f$  – Tensão final da transformação de martensita maclada para martensita não maclada

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

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

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

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

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

$API$  – American Petroleum Institute

$LFSA$  – Lightweight Flexible Solar Array

$NC$  – Normally Closed

$NiTi$  – Níquel - Titânio

*NiTiCu* -Níquel – Titânio – Cobre

*NO* – Normally Open

*TVR* – Thermovvariable Rate

*VGC* – Variable Geometry Chevron

*SMA* – Shape Memory Alloy

*BOP* – Blowout Preventers

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 – Motivação

Desde muito tempo, os metais têm sido amplamente utilizados em diversos segmentos da indústria desempenhando papéis importantes como materiais estruturais e na maior parte dos equipamentos produzidos. Por este motivo, suas aplicações têm evoluído continuamente com o passar dos anos.

A necessidade por materiais mais leves, mais resistentes e com propriedades específicas e personalizáveis e que pudessem fornecer maior funcionalidade impulsionaram o desenvolvimento e a pesquisa por novas ligas. A este grupo de materiais, com características diferentes e aplicações diversas deu-se o nome de “materiais multifuncionais”. Dentre eles, os que exibem a capacidade de atuação sob estímulos específicos, recebem o nome de “materiais ativos” e as ligas com memória de forma pertencem a esse subgrupo.

Devido à sua interessante capacidade de recuperar a forma original, mesmo depois de sofrer severas deformações, da ordem de 8%, essas ligas têm sido cada vez mais estudadas e aplicadas em diversos setores da indústria, desde a biomedicina até na extração de óleo e gás.

A primeira liga deste tipo foi desenvolvida há mais de quarenta anos e sua primeira aplicação comercial foi para a indústria aeronáutica, em aviões de combate. [1] Hoje, as ligas com memória de forma têm sido cada vez mais usadas devido à sua boa aplicabilidade e seu grande potencial para substituir atuadores de válvulas. Neste trabalho, explora-se um atuador usando fios de SMA para produzir um movimento rotativo e ensaiar o acionamento de uma válvula.

## 1.2 – Histórico

Adolf Martend descobriu a martensita nos aços por volta dos anos de 1890 e durante décadas, a transformação dela foi um dos fenômenos da metalurgia mais estudados.

No início, acreditava-se que essa transformação era um processo impossível de ser revertido, até que em 1949, Kurdjumov & Khandros apresentaram, a partir de observações e dados experimentais, que sua reversibilidade era possível de ser feita.

Mesmo assim, até a descoberta da liga de níquel-titânio (NiTi), também conhecida como Nitinol, por Buehler, em 1963, a transformação reversível da martensita permaneceu praticamente inutilizada. Sua descoberta reacendeu o interesse em pesquisar mais sobre materiais que além de recuperar a forma original, possuíam também propriedades mecânicas satisfatórias.

A deformação a que os materiais desse tipo podem ser submetidos podem chegar a 8% do tamanho original e sua recuperação de forma se deve à transformação de martensita para austenita sob estímulo da temperatura.

A primeira aplicação comercial de SMA, foi o então conhecido como *Cryofit*, onde a liga com memória de forma foi usada para fazer o acoplamento de tubos num avião de combate F-14 [1]. Embora sua descoberta tenha sido em 1965, atualmente esse tipo de acoplamento ainda tem sido utilizado nos tubos de instrumentação em equipamentos *subsea* na Indústria de Óleo de Gás devido à facilidade que oferece durante a montagem e devido à sua resistência à corrosão.

Além da utilização *subsea*, estes materiais vem sendo largamente empregados e obtendo sucesso em diversas outras áreas, como na medicina e na indústria automotiva, substituindo os antigos materiais utilizados por materiais inteligentes e com capacidade de atuação sob estímulo da temperatura.

### 1.3 – Justificativa

O uso de materiais inteligentes tem sido cada vez mais estudado para a aplicação em atuadores de válvulas devido às suas características e a forma como se comportam quando submetido à esforços termomecânicos. As ligas com memória de forma oferecem a oportunidade de substituir sistemas de atuação convencionais, reduzindo seu custo e tamanho, por este motivo o material em questão foi escolhido para ser analisado e estudada a possibilidade de produzir um atuador linear para acionar uma válvula do tipo *on-off*, utilizando movimento rotativo.

### 1.4 – Objetivos

O objetivo desse projeto é uso de materiais inteligentes, em especial as ligas com memória de forma, para acionar uma válvula de bloqueio do tipo *on-off*. O trabalho terá por conta desenvolver um atuador linear com arranjo de fio(s) e mola(s) bem como seu mecanismo de funcionamento a fim de ensaiar a atuação por movimento rotativo de uma válvula. Testes serão realizados a fim de se verificar o tempo de atuação, a capacidade de produção de força no mecanismo e a viabilidade de substituir um atuador elétrico por um arranjo de fios de SMA.

### 1.5 – Organização do Trabalho

No capítulo I, mostra-se uma breve introdução sobre o projeto com a justificativa e o objetivo para a escolha do tema principal, que é a aplicação de ligas com memória de forma para atuarem sistemas, bem como um resumo histórico do material desde a sua descoberta até os dias de hoje e um panorama da sua utilização nos vários ramos da indústria. O capítulo II, apresentará a revisão bibliográfica e os conceitos envolvidos para que se entenda melhor os pormenores dos materiais com memória de forma, seu funcionamento e suas aplicações. O

capítulo III compreende o estudo de caso de uma válvula para a qual se estuda a viabilidade de implementação do atuador usando SMA. O capítulo IV visará a apresentação da metodologia que será adotada. O capítulo V mostrará os resultados dos testes performados neste projeto. O capítulo VI apresentará a conclusão do estudo de caracterização termomecânica do atuador e possíveis propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 – Análise dos Fenômenos das Ligas com Memória de Forma

Ligas com memória de forma, ou em inglês *Shape Memory Alloys* (SMA), são ligas metálicas que possuem a habilidade de reverter uma deformação e recuperar a sua forma original com estímulo da temperatura.

A característica mais importante dessas ligas é o fato de sofrerem transformações adifusionais, ou seja, sem composição química ou atômicas alteradas durante a mudança de fase. É importante enfatizar que a transformação de fase não ocorre pela difusão dos átomos e sim, pela distorção da estrutura de cisalhamento. Não existe migração de átomos na microestrutura, apenas uma reorientação delas. Cada cristal formado pode ter uma orientação diferente, chamada de variante.

As ligas com memória de forma possuem duas fases distintas e por esta razão, são representadas mais comumente em diagramas de fase, que consistem numa representação esquemática das condições de equilíbrio entre as fases distintas e podem conter diferentes variáveis de controle, como tensão, temperatura, concentração etc.

As duas fases presentes nas ligas com memória de forma consistem em uma austenítica e uma martensítica, cada uma com uma estrutura cristalina e conseqüentemente com propriedades diferentes, onde a austenita é a fase de alta temperatura e a martensita, de baixa temperatura. As transformações são reversíveis e não dependem do tempo, mas sim da magnitude do estímulo ao qual estão submetidas.

A fase martensítica pode existir em duas formas diferentes: a martensita maclada (*Twinned Martensite*, em inglês), que é formada a partir da acomodação das variantes e

associada à temperatura; e a martensita não-maclada (em inglês, *Detwinned martensite*), ou reorientada, associada a um estímulo induzido por tensão.

As transformações de fase podem ser caracterizadas utilizando-se as temperaturas onde o processo de mudança na estrutura cristalina do material começa e termina, quando se encontra livre de tensões. Sendo assim,

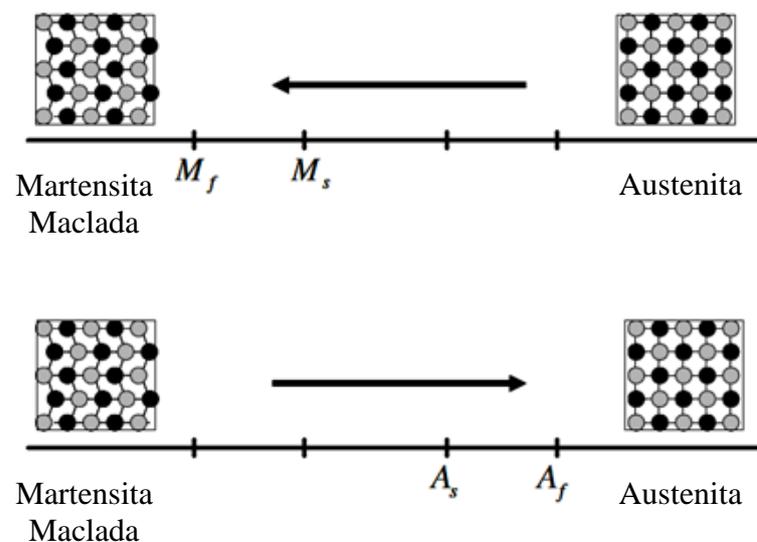
$A_s$  - Temperatura a partir da qual começa a transformação de Martensita para Austenita.

$A_f$  - Temperatura na qual termina a transformação de martensita para austenita.

$M_s$  - Temperatura a partir da qual começa a transformação de Austenita para martensita

$M_f$  - Temperatura na qual termina a transformação de austenita para martensita.

Na Figura 2.1 pode-se ver uma ilustração do processo de mudança de fase induzida por temperatura, sem carregamento envolvido, num material com memória de forma.



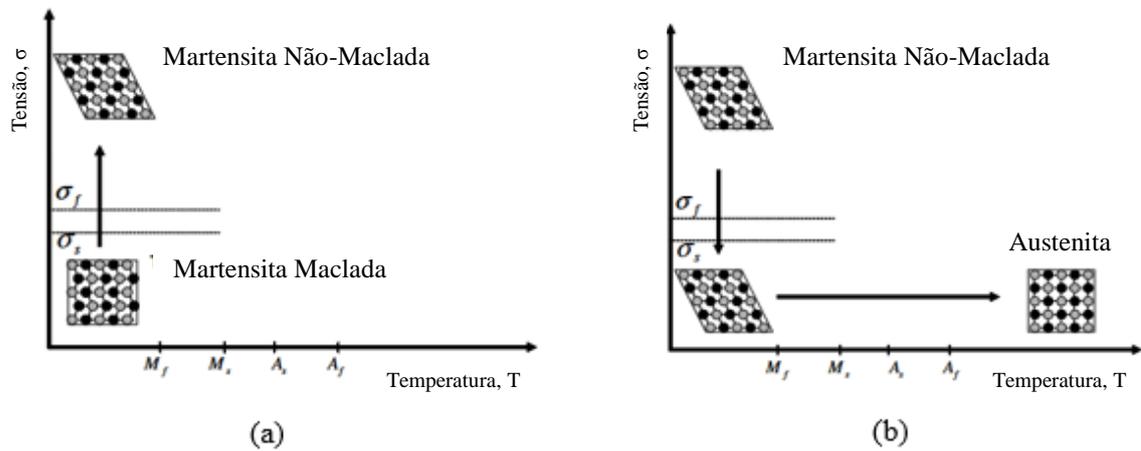
**Figura 2. 1** – Mudança de fase induzida por temperatura em SMA. [1 - modificada]

Quando resfria-se uma estrutura inicialmente austenítica, sem a presença de um carregamento aplicado, a estrutura cristalina se transforma de austenita para martensita. Quando o material, na fase austenítica, atinge a temperatura  $M_s$  inicia-se o processo de transformação de austenita para martensita. Como não há tensão, existe somente a variante associada à temperatura, Martensita Maclada. Ao atingir a temperatura  $M_f$ , o processo de transformação termina e o material é composto totalmente por martensita maclada. A esse evento dá-se o nome de transformação direta, onde a mudança de forma é desprezível, resultando apenas na mudança na estrutura.

Quando o material é aquecido na fase martensítica, a estrutura retorna à forma austenítica, caracterizando a transformação reversível associada à mudança de forma. No caso mostrado na Figura 1, não há recuperação de forma, visto que não houve deformação prévia na amostra.

## 2.2 – Efeito Memória de Forma

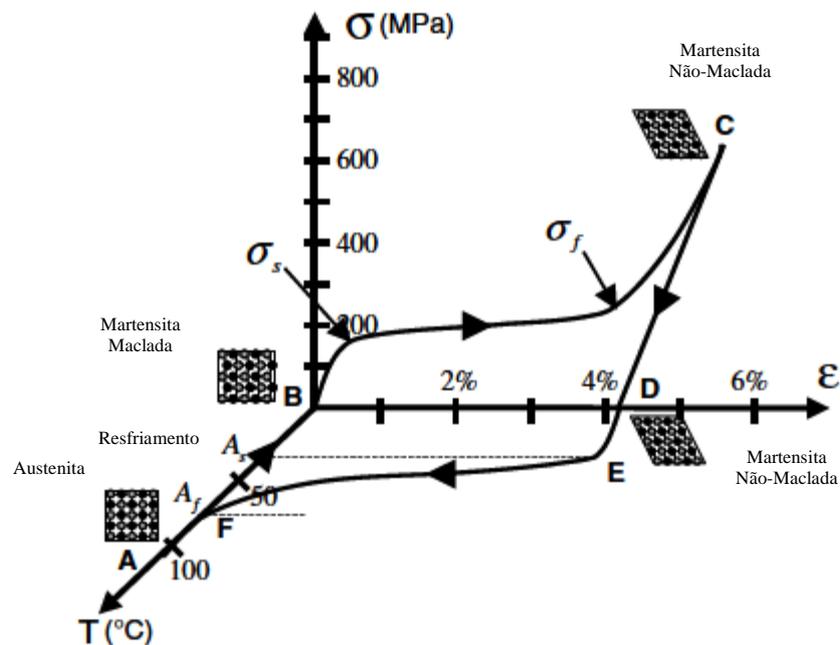
De acordo com o gráfico da Figura 2.2, agora considera-se que haja carregamento mecânico que cause deformação no material inicialmente na fase de martensita maclada. *“Se um carregamento mecânico é aplicado ao material na fase martensítica maclada, à baixa temperatura, a martensita se transforma em martensita não maclada devido à reorientação de um certo número de variantes. Esse processo resulta numa deformação macroscópica, onde a deformação é retida quando o carregamento é liberado. Um aquecimento subsequente do SMA até uma temperatura acima de  $A_f$  resulta numa transformação de fase reversível e uma completa recuperação da forma original.”* [1, tradução livre]



**Figura 2. 2** - (a) Processo de transformação de martensita maclada para a variante não maclada quando um carregamento é aplicado. (b) Efeito do descarregamento e posterior aquecimento resultando na recuperação de forma de um SMA. [1 - modificada]

A tensão onde o processo de transformação de martensita maclada para não-maclada se inicia e termina, é representado no gráfico acima por  $\sigma_s$  e  $\sigma_f$ , respectivamente. Neste intervalo, ambas as fases coexistem e o carregamento aplicado precisa ser suficiente para que haja a transformação completa.

A Figura 2.3 mostra a representação de um diagrama Tensão-Deformação-Temperatura para uma liga com memória de forma de NiTi.



**Figura 2.3** – Diagrama Tensão x Deformação x Temperatura para uma liga de NiTi com efeito memória de forma [1 - modificada].

Para que se possa entender melhor o diagrama tridimensional, no ponto A, parte-se de uma estrutura austenítica que quando resfriada até abaixo de  $A_s$ , sofre transformação assumindo a fase Martensítica Maclada, no ponto B. A partir daí um carregamento mecânico é imposto à liga de forma que ao atingir  $\sigma_f$ , possui uma estrutura totalmente reorientada, Martensítica não-maclada e deformada devido ao carregamento aplicado. Do ponto C em diante o carregamento é liberado, porém o corpo mantém os níveis de deformação e a variante não-maclada da martensita até atingir o ponto D, onde o carregamento cessa completamente. A liga então passa a ser aquecida e quando atinge  $A_s$ , inicia-se a transformação de fase de martensita para austenita. Pode-se observar que a deformação decresce concomitantemente ao aumento da temperatura, caracterizando a recuperação da forma. Ao atingir  $A_f$ , no ponto F, a liga é composta totalmente por estrutura austenítica e o ciclo pode ser repetido.

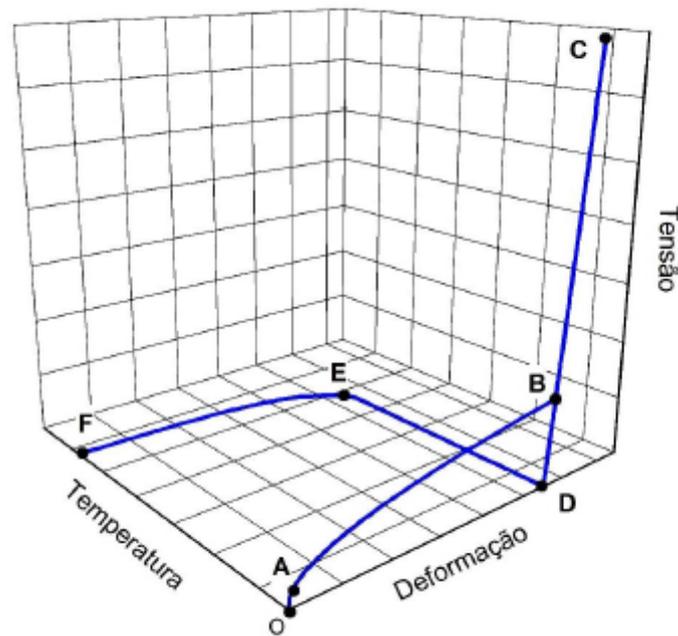
Isso mostra que na ausência de carregamento plástico gerado durante o processo de transformação para a variante não-maclada da martensita é possível recuperar a forma original

da amostra em A. Um subsequente resfriamento da liga faz com que ela retorne à estrutura martensítica maclada sem mudança de forma associada.

Essa situação, onde SMA pode ser deformado e consegue manter essa deformação após ser descarregado, é conhecido como *One-Way Effect*. A aplicação de tensão resulta em uma deformação pseudo-plástica, que pode ser revertida com o aquecimento da amostra até acima da temperatura de austenitização  $A_f$ . Utiliza-se o termo pseudo-plástico para a deformação pois ela parece ser irreversível quando o carregamento é liberado, caracterizando uma “falsa” deformação permanente.

Usa-se como exemplo um fio de SMA de comprimento e diâmetros conhecidos e o diagrama da Figura 2.4 como base. O fio de SMA quando esticado, apresenta comportamento elástico e continua se deformando elasticamente enquanto a tensão para esticá-lo aumenta (O-A). Quando atinge  $\sigma_s$ , o material alonga significativamente com pequenos aumentos nos níveis de tensão. Este ponto marca o início da transformação para martensita não-maclada e continua até atingir  $\sigma_f$ , onde está completo (A-B). A partir de  $\sigma_f$ , o material endurece enquanto a tensão aumenta, sofrendo pouca deformação com o aumento da carga (B-C). O fio agora, martensítico não-maclado, é elasticamente descarregado e a deformação induzida pelo carregamento se mantém (C-D).

Ao aquecer o fio, a princípio ele sofre uma expansão térmica desprezível (D-E), porém ao atingir  $A_s$ , inicia o processo de transformação para austenita, resultando na contração do fio/atuação do sistema (E-F). Ao reduzir a temperatura, o fio retorna à condição de martensita maclada, sem mudança de forma associada.



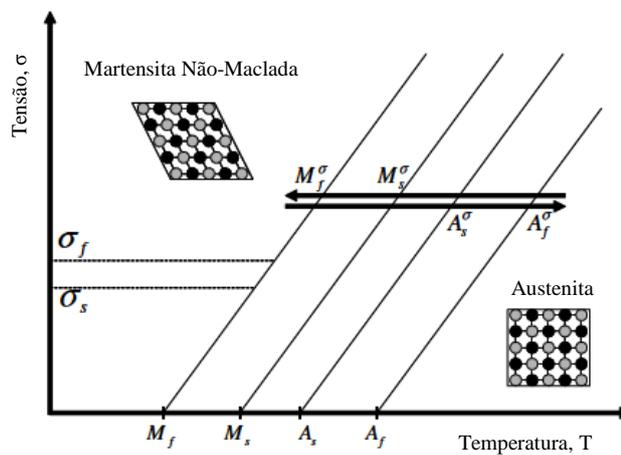
**Figura 2.4** – Diagrama Tensão x Deformação x Temperatura para SMA [16].

### 2.2.1 – Efeito Memória de Forma com Tensão Assistida

Nas situações vistas até agora um aspecto é relevante: em algum momento, o carregamento mecânico cessa e com controle de temperatura consegue-se a recuperação da forma de um material com memória de forma. Porém, para que se possa aplicar o SMA comercialmente é praticamente inviável ter que controlar dois parâmetros diferentes para que haja atuação em um sistema. Por conta disto, para aplicações comerciais, o efeito memória de forma com tensão assistida ou em inglês *Extrinsic Two-Way Effect*, é o mais comumente usado para atuação de sistemas de válvulas, por exemplo.

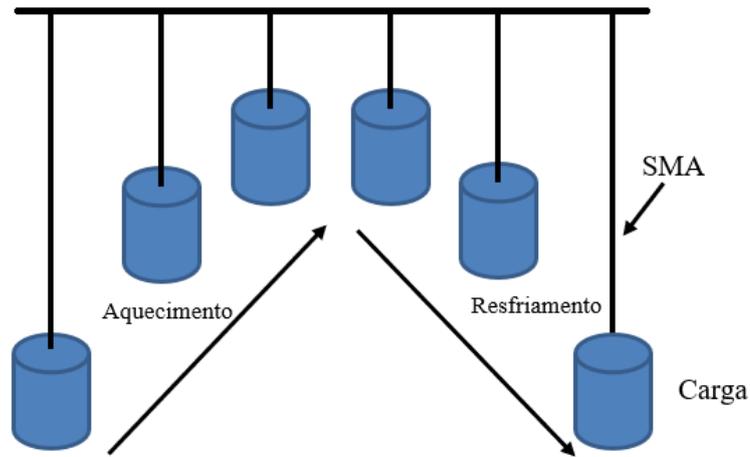
O efeito memória de forma com tensão assistida consiste em pré-carregar o sistema com algum tipo de carregamento mecânico de forma que ao variar a temperatura possa-se ter a deformação x recuperação da forma.

No gráfico da Figura 2.5, pode-se observar as novas temperaturas de transformação de fase devido à presença de carregamento. E isso se deve ao fato de que independente da natureza do carregamento aplicado, a temperatura de transformação cresce com o aumento da carga, ou seja, quanto maior a carga aplicada ao material, maior a temperatura necessária para que ele recupere sua forma original. Porém, deve-se atentar para o seu limite de escoamento. Não é possível recuperar a forma caso o material tenha ultrapassado a tensão de escoamento e sofrido deformação plástica irreversível.



**Figura 2.5** – Transformação de fase induzida por temperatura na presença de carregamento [1 - modificada].

Na Figura 2.6 pode-se observar um exemplo desse efeito utilizando um fio de memória de forma e cargas estáticas responsáveis por manter uma tensão constante no sistema.



**Figura 2. 6** – Representação simplória do Efeito Memória de Forma com Tensão Assistida [16 – modificado]

Com uma massa suficientemente grande para causar deformação quando presa à extremidade de um fio de SMA, sem escoá-lo, carrega-se inicialmente o sistema. O fio, inicialmente apresenta a estrutura martensita maclada e ao sofrer carregamento, se deforma e assume a variante não-maclada da martensita. Aquecendo-se o fio, sem retirar o carregamento, aumenta-se a temperatura até acima de  $A_f$ , austenitizando completamente o fio de SMA e recupera-se sua forma original. Porém, ao ser resfriado novamente, como o carregamento se mantém constante, o fio de SMA se transforma diretamente para a variante não-maclada, deformando-se novamente por conta do carregamento. Dessa forma, controla-se apenas a temperatura, resultando na contração/deformação do fio de SMA e na possível atuação de um sistema [1].

## 2.4 – Aplicações

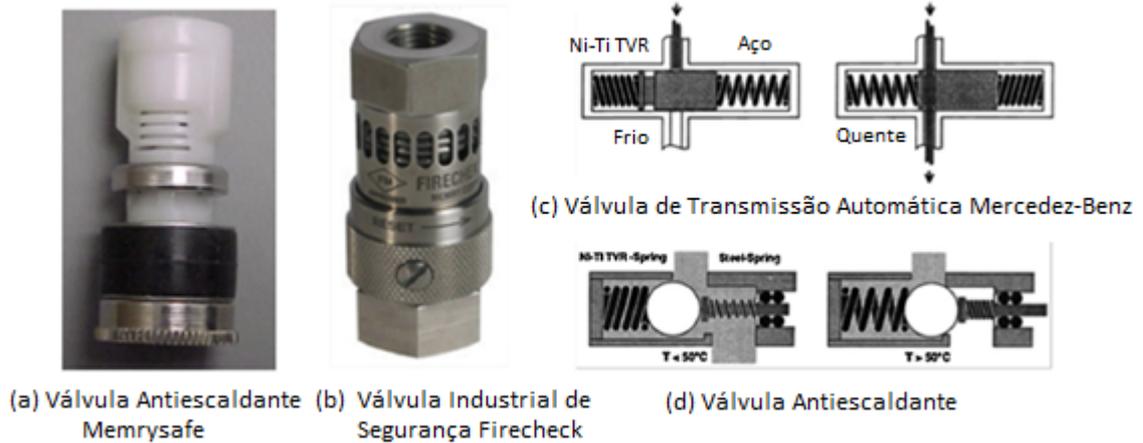
Como dito anteriormente, as ligas de NiTi têm sido estudadas mais extensivamente e são usadas em grandes números de aplicações nos setores aeroespacial, automotivo, automação e controle, energia, processamento químico, aquecimento e ventilação, segurança e eletrônica [2]. Essas ligas exibem fortemente o efeito memória de forma e o comportamento pseudoelástico sob certas condições, o que faz desse material ideal para uma grande variedade de aplicações pois também exibe resistência à corrosão e é biocompatível.

Ligas com memória de forma têm sido usadas em automóveis para aplicações em absorvedores de impacto, sensores e atuadores. O comportamento histerético do pseudoelástico fornece um sistema efetivo para dissipar vibrações e é usado para absorver impacto em veículos blindados em operações militares e comerciais. [1]

### 2.4.1 – Indústria Automotiva

Nos veículos modernos, o número de sensores e atuadores vem crescendo por conta da demanda por segurança, conforto e performance. A simplicidade mecânica e tamanho reduzido dos atuadores com SMA reduzem a escala, peso e o custo dos componentes mecânicos significativamente e proporcionam substanciais benefícios na performance comparado aos atuadores convencionais. A capacidade de se adaptar a outros mecanismos e técnicas fazem das ligas com memória de forma um excelente atuador para aplicações automobilísticas. [2]

A Figura 2.9 mostra molas de taxa termovariável de NiTi (TVR), que são usadas para controlar a porta de abertura num forno, que também é usada para oferecer mudança de marcha suave para as transmissões automáticas Mercedes-Benz, para dispositivos de segurança doméstica para controlar o fluxo de água quente (por ex. Válvulas antiscaldes Memrysafes da Memry Corporation, Figura 2.9a), e para válvulas de segurança industrial (por exemplo, Firechek da Memry Corporation). E o mais interessante é que esses atuadores podem atuar como um sensor e um atuador nessas aplicações. [2]



**Figura 2. 7** – Aplicações para atuadores usando molas de NiTi [2 - modificada] .

A Figura 2.9 a mostra uma válvula ante escaldante. Os atuadores térmicos com SMA são usados em dispositivos domésticos por segurança. Uma das causas mais frequentes de lesão nos lares, edifícios e em hotéis é a queimadura com água excessivamente quente no chuveiro e na pia. Por este motivo estão sendo produzidas válvulas *antiscald* que empregam um pequeno elemento de NiTiCu que, quando aquecido a uma temperatura acima da qual o escaldamento ocorrerá, fecha a válvula. A válvula reabre automaticamente quando a temperatura da água é segura. [6]

#### 2.4.2 – Indústria Aeronáutica

Desde o sucesso do sistema de acoplamento dos jatos F-14 usando materiais com memória de forma em 1970, as propriedades únicas dos SMA geraram aumento de interesse em aplicações aeroespaciais que estão sujeitas à altos carregamentos dinâmicos e restrição de espaço. [2]

A Boeing desenvolveu um dispositivo aerodinâmico serrilhado com atuadores SMA, que é também conhecido como VGC (*variable geometry chevron*) e foi instalado em um motor a jato GE90-115B (para o comercial Boeing 777-300 ER aeronave) com o objetivo de reduzir os níveis de ruídos do motor durante a decolagem e aterrissagem [2]. Basicamente, o dispositivo consiste em pequenas vigas de SMA que dobram as divisas durante os voos de baixa altitude ou de baixa velocidade. Em voos de altitude elevada ou velocidades altas, a queda na temperatura resfria os feixes de memória de forma que sofrem transformação de fase e assumem a estrutura martensítica, se deformando, aumentando a abertura e aumentando o desempenho do motor [1].



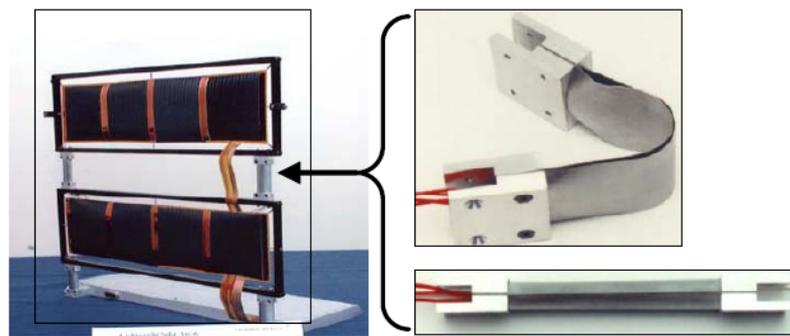
**Figura 2. 8** – Aplicação de SMA nos motores de um Boeing [1].

### 2.4.3 – Indústria Aeroespacial

Ligas com memória de forma foram usadas em aplicações espaciais para abordar problemas relacionados à atuação e liberação em ambiente de atmosfera zero bem como amortecimento de vibrações durante o lançamento de naves espaciais. A maioria das aplicações e sistemas são tipicamente projetados por experimentação cuidadosa. Uma das aplicações das ligas é para o mecanismo de liberação de baixo impacto em satélites [1].

Até 1984, estimava-se que quase 14% das missões espaciais experimentaram falha devido a choque, e, em alguns casos, as missões tiveram que ser abortadas. Os choques foram causados devido à liberação com velocidade não controlada dos mecanismos. Por este motivo, atuadores inteligentes usando ligas com memória de forma, que proporcionam atuação lenta devido ao aquecimento gradual do material, são os mais adequados para a operação. [1]

SMA também são usados na atuação de vários componentes, como painéis solares. O LFSA (*Lightweight Flexible Solar Array*), usa tiras de SMA como dobradiças, que posicionam os painéis solares dobrados após o aquecimento em aproximadamente 30 segundos [1]. O sistema de atuação dos painéis pode ser visto na Figura 2.11.



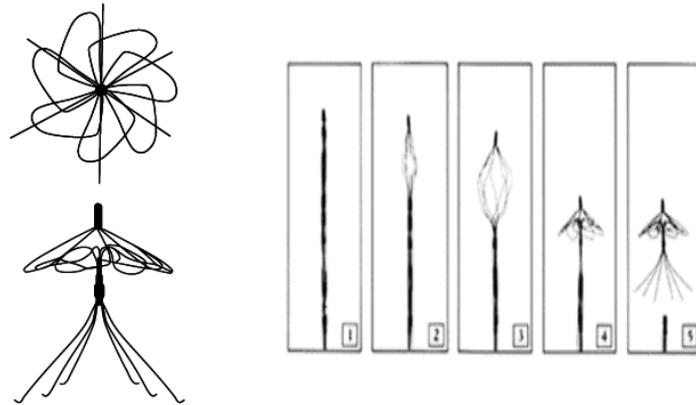
**Figura 2. 9** – Dobradiças de SMA mostradas nas suas duas configurações, aberta e fechada [1].

#### 2.4.4 – Aplicações Biomédicas

A Memória de forma e as características da pseudoelasticidade associadas à biocompatibilidade fazem das ligas de Níquel-titânio umas das mais atraentes para a aplicação de materiais inteligentes na medicina. A combinação dessas características levou ao desenvolvimento de diversas aplicações, como *stents*, filtros, fios ortodônticos e dispositivos para cirurgias minimamente invasivas. [1]

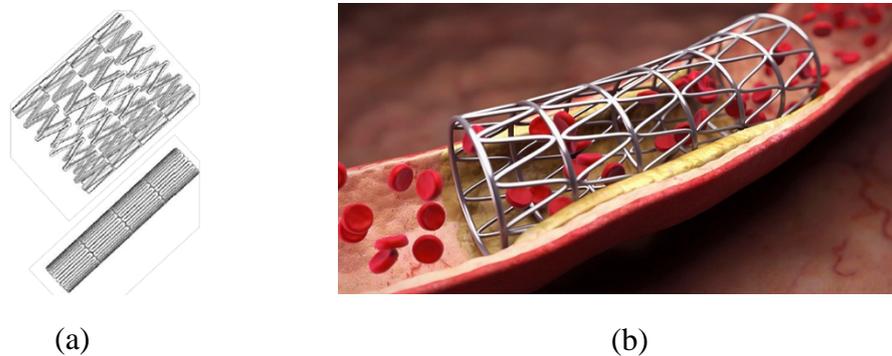
Um dispositivo simples e interessante pode ser visto na Figura 2.12. O filtro de Simon, como o próprio nome já diz, funciona como um filtro que retém coágulos sanguíneos. O dispositivo é deformado e introduzido em um cateter. Ao ser introduzido no vaso sanguíneo, a

temperatura do corpo do paciente aquece o filtro, fazendo com que ele atinja a temperatura de austenitização resultando na recuperação da sua forma original, estendida.



**Figura 2. 10** – Filtro de Simon [1].

Outra aplicação importante são os *Stents* produzidos com ligas de memória de forma. O dispositivo funciona como um cateter introduzido nos vasos sanguíneos para suportá-los. Os *Stents* comuns são produzidos com aço inoxidável e não proporcionam o ajuste perfeito quando colocados. Similarmente ao Filtro de Simon, o *Stent* é introduzido deformado e ao ser aquecido pelo corpo do paciente, recupera a forma e sustenta o vaso sanguíneo.

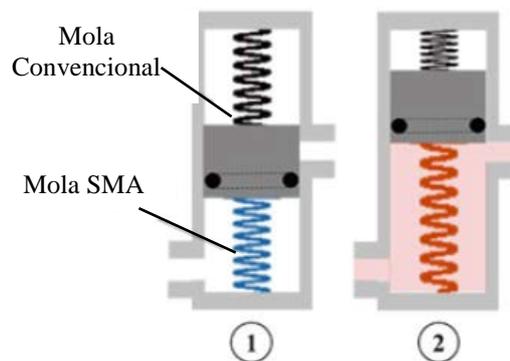


**Figura 2. 11** – Stents (a) Esquematização das configurações aberta e fechada [1]. (b) Ilustração do posicionamento de um *Stent* no vaso sanguíneo [17].

## 2.5 – Aplicações em Atuadores de Válvulas

Bons tempos de resposta, alta potência de saída, grande deslocamento, boa posição, manutenção, reprodutibilidade e boa eficiência são os requisitos essenciais de um atuador que são facilmente conquistados com a ajuda de Ligas com Memória de Forma. [9]

O uso de SMA em sistemas de atuação de válvulas se dá mais comumente pelo uso do *Extrinsic Two Way Effect* ou Efeito Memória de Forma com Tensão Assistida, devido à sua melhor resposta mecânica. Esses atuadores podem ser acionados de duas maneiras diferentes, uma delas é usando corrente elétrica e proporcionando o aquecimento do material por Efeito Joule ou, de forma térmica diretamente, usando a própria temperatura do ambiente/fluido em contato para realizar o aquecimento [4]. Um exemplo simples de atuador usando molas de SMA pré-carregadas é mostrado na Figura 2.14.

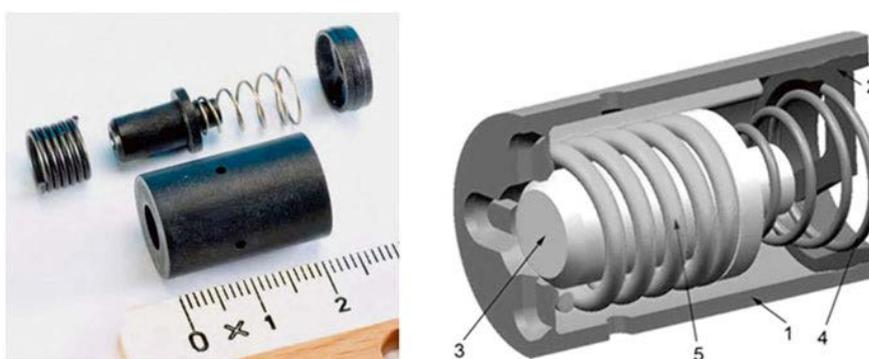


**Figura 2. 12** – Atuador SMA usando aquecimento térmico direto [4 - modificada].

A mola de SMA é pré-carregada pelo pistão, que está conectada a uma outra mola convencional, tensionando-a e fazendo com que a passagem se mantenha aberta. Uma vantagem do uso de molas de SMA ao invés de fios em aplicações similares é a alta deformação reversível que as molas podem oferecer [7]. O fluido entra na câmara onde a mola SMA está presente e

aquece a mola, fazendo com que ela atinja a temperatura de transformação de fase de martensita para austenita, contraindo e fechando a passagem de fluido.

### 2.5.1 – Válvula Combinada para Aquecedores Auxiliares Veiculares



**Figura 2.13** - Válvula combinada para aquecedores Auxiliares ou *Thermostat Combi Valve for Auxiliary Heaters* [4].

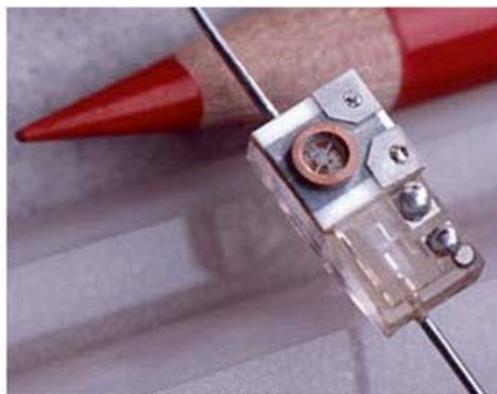
É uma válvula compacta, usada em veículos motorizados e atuada por memória de forma, onde suas características principais consistem na regulação de temperatura do fluxo e água nos ciclos auxiliares de um aquecedor, pequeno espaço requerido para sua instalação, baixo peso, resposta rápida às variações de temperatura e longa duração.

A válvula representada na Figura 2.15 possui uma mola de SMA no estado martensítico, comprimida. Neste estado, o fluido é executado apenas através do sistema de circulação menor que consiste em aquecedor e trocador de calor, através do aquecedor gradualmente aquecido o fluido aquece também o elemento SMA em 1. Quando a temperatura de transformação de fase é atingida, a mola recupera a forma e move o pistão 3 dentro da câmara, empurrando a mola de aço 4. Depois de aberta, o fluido continua aquecendo a mola e flui através do circuito do motor. Quando o aquecimento cessa, a mola de SMA resfria e é empurrada pela mola de aço, fechando a válvula novamente [4].

## 2.5.2 – Microválvulas de SMA

Os microsistemas compreendem uma tecnologia em desenvolvimento e de demanda crescente mais requisitados pelas industriais biomédica e de alta tecnologia. Como as ligas com memória de forma proporcionam a oportunidade de confeccionar sistemas cada vez mais leves e menores, elas são as mais indicadas para esse tipo de aplicação. Na figura 2.16 pode-se ver uma comparação entre o tamanho da microválvula e a ponta de um lápis.

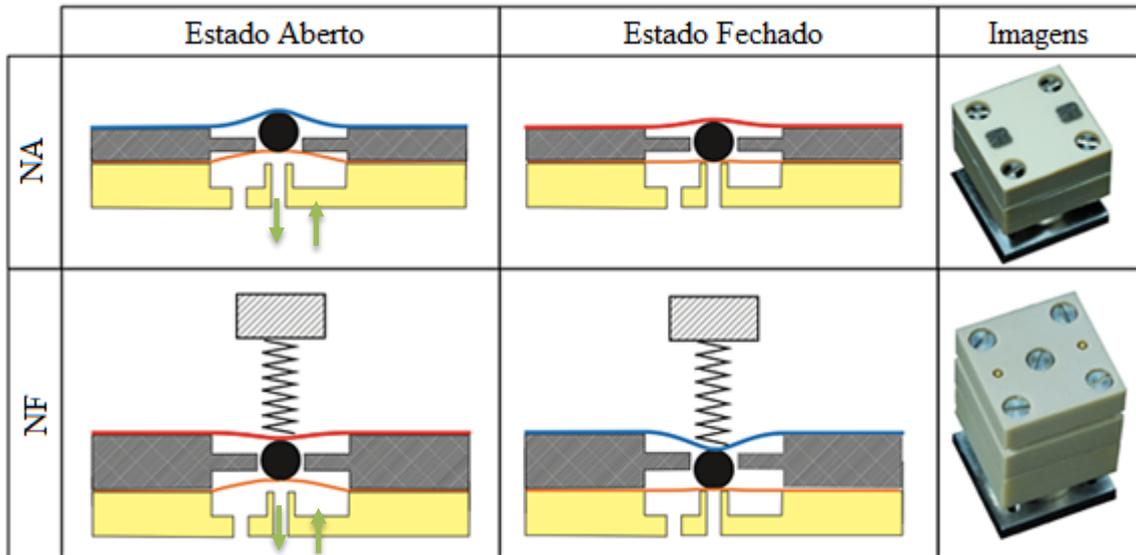
As microválvulas compreendem um alojamento de polímero com uma câmara de fluido integrada, membrana e microactuador SMA. O microactuador é desviado por um êmbolo, por exemplo, uma microesfera. Na corrente zero, a microválvula está no estado aberto. Neste caso, o fluido é capaz de escoar através da válvula, se houver uma pressão de suprimento. Por aquecimento elétrico, o microactuador muda para seu estado original planar e, assim, fecha a microválvula. [3]



**Figura 2. 14** – Tamanho da Microválvula em relação a um lápis [18].

Microválvulas Monostáveis fecham e abrem em condição de desligamento e por aquecimento elétrico, respectivamente. São projetadas de maneira modular para reduzir o número de componentes e isso permite a fabricação econômica dessas microválvulas normalmente abertas (NA) e normalmente fechadas (NF), bem como um rápido ajuste à pressão

e faixa de vazão necessárias [3]. A figura 2.17 mostra as microválvulas nos estados aberto e fechado.



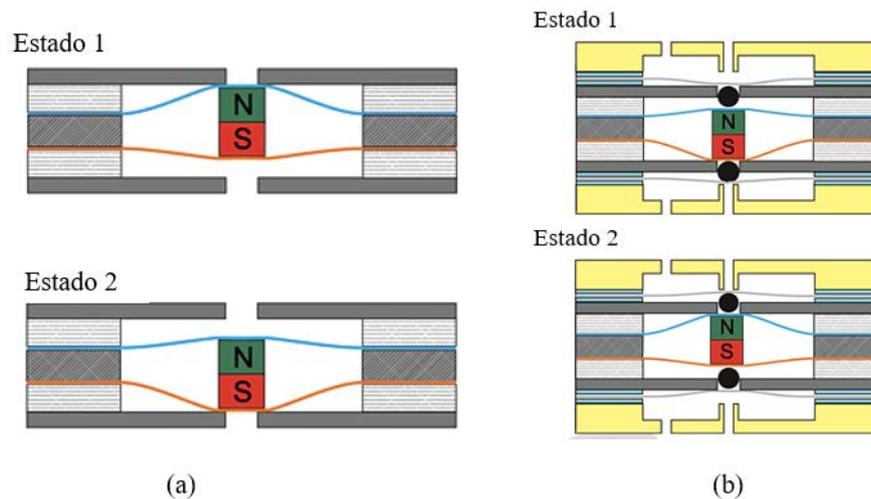
**Figura 2. 15** – Microválvulas Monoestáveis Normalmentemente Abertas e Normalmentemente Fechada [18 - modificada].

### 2.5.3 – Microválvulas de Ligas de Memória de Forma Biestáveis

As microválvulas biestáveis de SMA só consomem energia durante a comutação e, portanto, são adequadas para sistemas fluídicos que operam com baixo ou médio consumo de energia e ciclos de trabalho reduzidos. A atuação bidirecional é realizada por dois atuadores de microvoltagem SMA neutralizados e seletivamente aquecidos. Na condição de desligamento, as posições estáveis são mantidas por forças de travamento magnetostático. [3]

Na Figura 2.18a pode-se ver uma ilustração das microválvulas em questão. Quando um dos fios de SMA é aquecido, ele sofre transformação de fase martensítica para a austenítica, fazendo com que ele contraia e empurre o elemento de vedação para baixo, deformando também o outro fio, que ainda não é aquecido. Devido às forças magnetostáticas envolvidas, o elemento se prende ao anteparo do lado oposto, fechando uma passagem e abrindo a outra. O inverso ocorre quando o segundo fio de SMA é aquecido.

A Figura 2.18b mostra o mesmo princípio, porém usando uma esfera com a ajuda de tiras de material compósito para fazer a vedação e fechar a passagem de fluido.



**Figura 2. 16** – Microválvulas Bistáveis (a) Modelo simplificado. (b) Modelo usando esfera como elemento de vedação [18 – modificada].

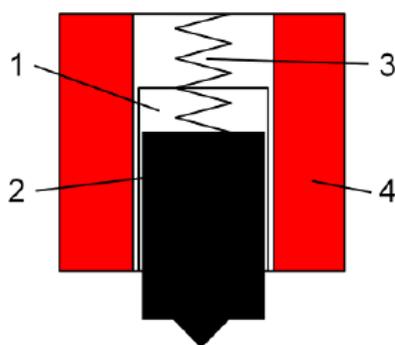
#### 2.5.4 – Válvula Comutadora

Um objetivo comum entre as indústrias é a busca incessante por novas tecnologias que foquem na redução de tamanho, peso, custo e principalmente que não agridam o meio ambiente.

Com este intuito, Nalbach e, Sophie *et. al.*, (2015) propuseram o projeto e prototipagem de uma válvula comutadora hidráulica usando como atuador um fio de SMA. Originalmente, a válvula possui um sistema de atuação eletromagnético e uma mola, que comuta a válvula em dois estágios, aberta e fechada. Após o desenvolvimento da válvula com nova atuação, sua funcionalidade foi testada e comparada à original.

A mudança do sistema de atuação eletromagnética pelo SMA, permitirá redução do tamanho da válvula e no peso dela. A válvula eletromagnética é usada na indústria automotiva e uma possível utilização para a nova válvula usando SMA pode ser em uma plataforma hidráulica em um caminhão. [5]

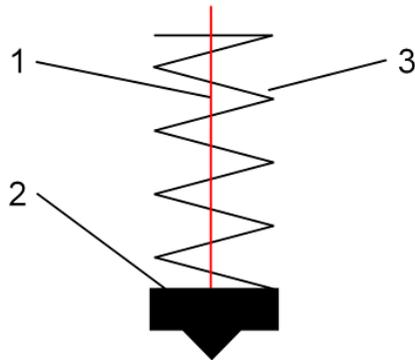
Após a avaliação das forças e requisitos de curso da válvula original, encontrada comercialmente, um novo design usando um fio de SMA foi proposto e construído para que a nova válvula atenda aos mesmos requisitos de performance. Para isso foram avaliados parâmetros como pressão e vazão de fluido entre as duas válvulas. Na Figura 2.19 pode-se ver o arranjo de uma válvula magnética.



**Figura 2. 17** – Arranjo de uma válvula magnética [5].

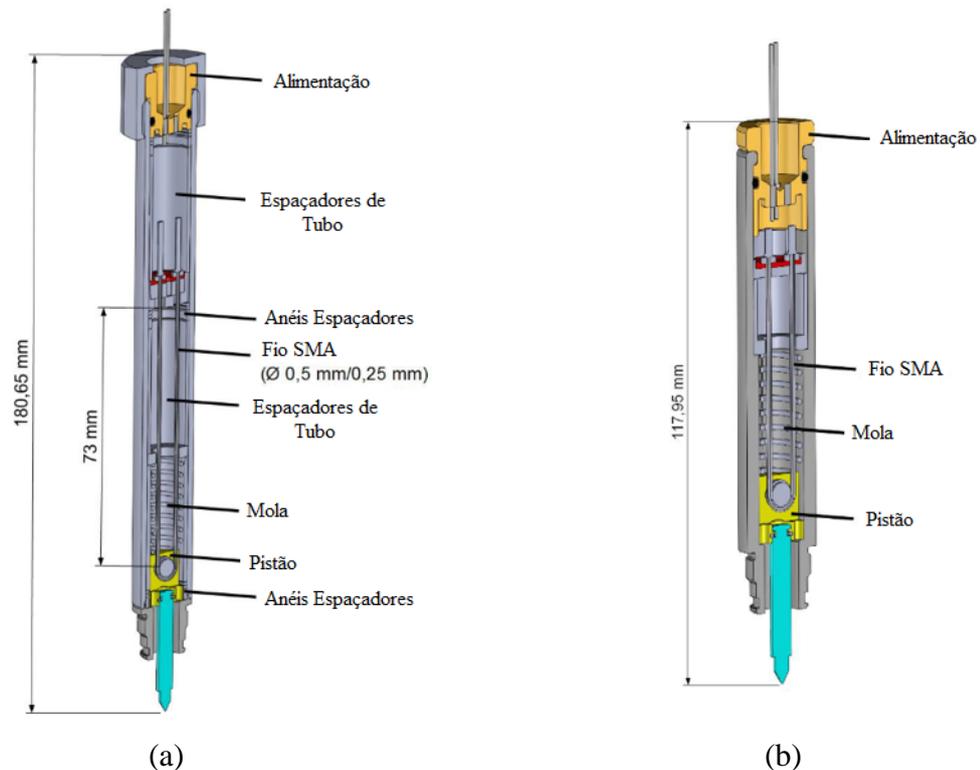
A mola 3 empurra o pistão 2 e o mantém na primeira posição. Para voltar à segunda posição, a força eletromagnética de uma bobina é usada. Quando a bobina 4 é ativada, um campo magnético se forma. A resistência magnética do espaço vazio em 1 é maior que a resistência das outras partes feitas de aço. Para minimizar essa energia, o sistema tenta minimizar a resistência magnética e isso acontece fechando-se o espaço vazio. Assim quando a bobina é ativada, o pistão se move para cima e a válvula abre. [5]

Ambos atuadores, tanto o magnético quando o proposto com SMA, trabalham contra a força da mola. Para ganhar espaço, o fio de SMA foi posicionado passando por dentro da mola, conforme a Figura 2.20. Como não há mais a necessidade de uma bobina eletromagnética, há uma redução significativa em tamanho e peso. O protótipo foi construído com um fio de SMA de 73 mm para que o pistão se deslocasse 2 mm, a deformação chegou a cerca de 3%. [5]



**Figura 2. 18** – Posicionamento do fio de SMA passando por dentro da mola [5].

O fio de SMA é aquecido por efeito Joule e um detalhe interessante adotado no projeto é o curvamento do fio, que permite que as duas extremidades dele fiquem na parte de cima da válvula, onde os conectores se encontram. O modelo em CAD desenvolvido pelos autores do artigo, bem como o dimensionamento da válvula pode ser visto na Figura 2.21a.



**Figura 2. 19** - (a) Modelo de válvula desenvolvida e testada. (b) Possível modificação [5 - modificada].

Depois de testar o desenvolvimento da válvula sob várias condições, pôde ser confirmado que o atuador com memória de forma se mostrou adequado para o uso em aplicações hidráulicas. O uso sob altas pressões, bem como a operação no óleo hidráulico não afetaram a funcionalidade da válvula. Os experimentos performados mostraram que a válvula com SMA consegue alcançar os mesmos deslocamentos e comutatividade da válvula magnética [5]. O design inicial foi baseado na válvula original, com tamanho parecido. Após os experimentos, um potencial desenho de uma válvula avançada é mostrado na Figura 2.21b.

Comparada à uma válvula comutadora hidráulica comercial com atuador magnético, a válvula avançada proposta desenvolvida pelos autores do artigo é menor, o que significa diminuição de peso que pôde ser reduzido em aproximadamente 135 g. Em comparação com a válvula magnética de 290 g, mais da metade do peso poderia ser reduzida.

## 2.6 –Aplicação na Indústria de Óleo e Gás

Ligas com memória de forma são materiais que têm imenso potencial para melhorar significativamente instrumentos e equipamentos usados na indústria de óleo e gás. Além de ser resistente à corrosão, o SMA pode ser uma alternativa leve e sólida em substituição à atuação hidráulica convencional. [9]

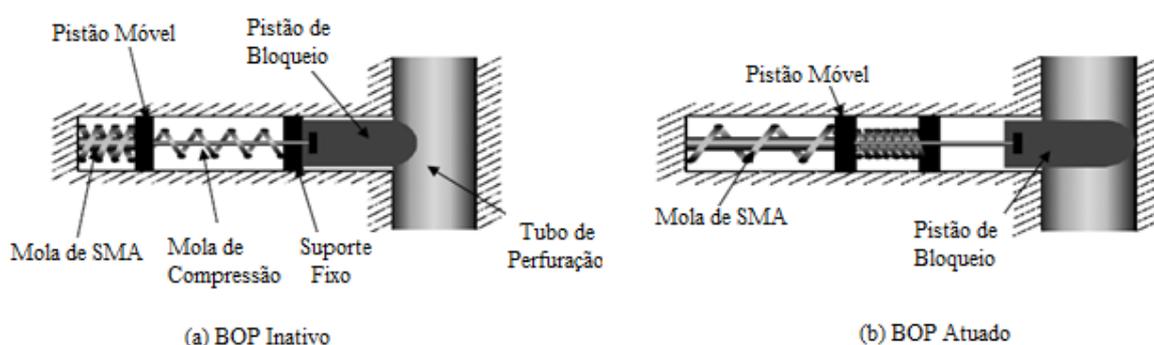
Embora atuadores com SMA não possam ser usados para operações com alta frequência, eles permanecem sendo uma ótima opção para baixas frequências devido à sua alta densidade de potência e atuação controlável em contrapartida aos atuadores convencionais que podem ser mais caros, menos confiáveis e mais volumosos. [9]

Na indústria de óleo e gás, a substituição desses atuadores por SMA só trará vantagens uma vez que é possível reduzir o tempo de trabalho e atuação do sistema.

### 2.6.1 – Blow-out Preventers

G. Song *et. al.*, (2010), analisam o desenvolvimento e aplicação de ligas com memória de forma *offshore* nos chamados Blow-out Preventers que controlam fluido hidráulico pressurizado através de meios eletro-hidráulicos ou puramente hidráulicos. [9] O sistema tem como função permitir o fechamento do poço em qualquer operação e desconexão do poço, deixando-o fechado e isolado, entre outros. Os BOPs puramente hidráulicos podem não ser confiáveis devido a atraso no tempo de resposta, complicações devido à profundidade e temperatura, problemas mecânicos ou danos.

*“A pressão efetiva criada pelo cilindro na BOP reduz drasticamente em proporção à profundidade subaquática do BOP. Isso indiretamente aumenta o número necessário de acumuladores de alta pressão e aumenta a pressão de pré-carga de gás. Como um resultado, os BOP tradicionais são sistemas caros, ineficientes e volumosos. Além disso, o atraso introduzido pela linha de controle hidráulico da plataforma pode ser mais longo do que os padrões API (American Petroleum Institute). Por outro lado, os SMAs podem ser usados para produzir uma nova geração de BOPs, com custo efetivo, mais rápido e com componentes compactos”.* [9, tradução livre]

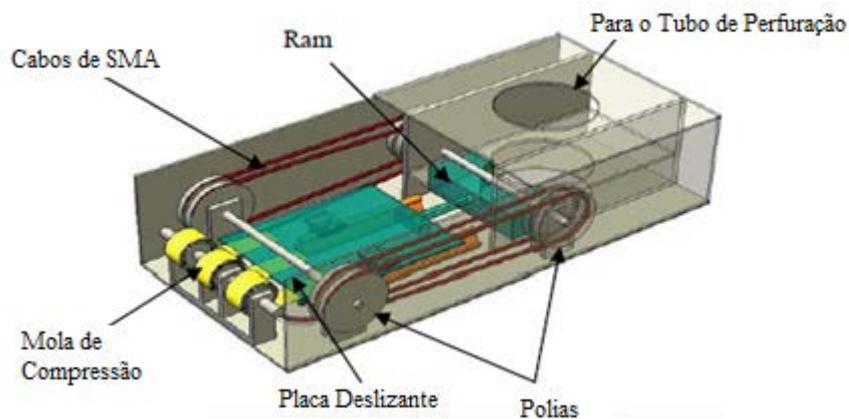


**Figura 2. 20** – Esquema BOP. (a) BOP Inativo. (b) BOP Atuado [9 - modificada].

Existem métodos patenteados que descrevem um BOP controlado por SMA. Em um deles, molas de compressão feitas com materiais com memória de forma são aquecidas e então ativadas e geram força para empurrar um pistão que bloqueia a passagem e fecha o poço, um

esquema pode ser visto na Figura 2.22. Um outro em fase de protótipo, utiliza um fio de SMA para mover um *ram* para a posição desligado e evitar ruptura. Em ambos os casos, o fio é aquecido por Efeito Joule ao passar uma corrente por ele. Quando a corrente cessa, o fio esfria e deforma devido às tensões exercidas por molas que reposicionam o sistema no seu estado original, aberto. [9]

A Figura 2.23 ilustra outra situação onde o uso de fios SMA cria tensão para a atuação do BOP. Quando os fios de SMA são ativados, eles encolhem e movem a placa deslizante em direção à posição fechada. Quando o fio é resfriado, as molas conectadas à placa deslizante puxam-na para trás, abrindo a passagem. [9]



**Figura 2. 21** – Diagrama esquemático de um BOP com fios SMA [9 - modificada].

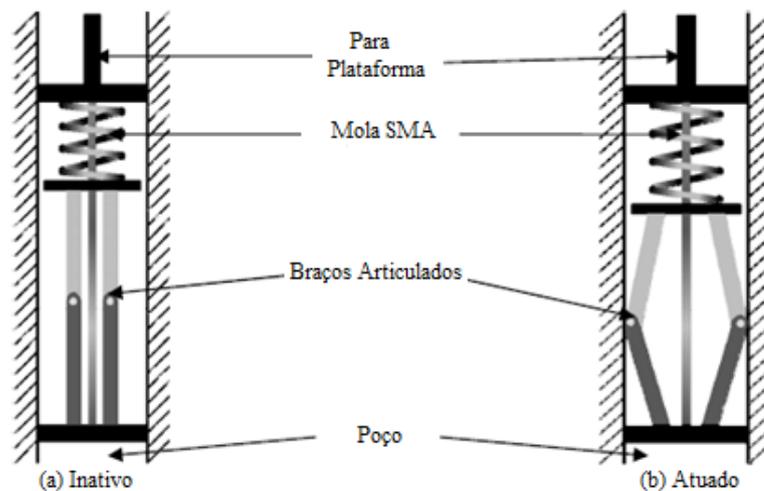
## 2.6.2 – Atuador de Ferramenta de Downhole

*“Na indústria offshore de petróleo e gás, as ferramentas de perfuração são cruciais pois desempenham importantes funções como transportar um sensor para a coleta de dados. Os dados coletados podem ser usados para verificar a formação geológica subsuperficial e hidrocarbonetos arrastados. É possível que essas ferramentas possam ficar presas no poço se a folga inicial entre elas for muito pequena ou se o dispositivo de acionamento falhar. Para*

coletar os dados, as ferramentas devem ser corretamente posicionadas e isto é feito usando-se motores para mover braços de apoio contra as paredes do poço.” [9, tradução livre]

Porém o uso de motores aumenta consideravelmente o peso da ferramenta e ainda existe o risco de falha ou mau funcionamento. Por este motivo, cada vez mais estão sendo estudadas maneiras de substituição de modelos tradicionais por modelos usando memória de forma.

A Figura 2.24 mostra a idealização de um atuador de fundo de poço usando SMA. Quando na profundidade desejada, a mola feita com SMA é aquecida por Efeito Joule e empurra o pistão para baixo, movendo os braços para fora. Os braços por sua vez, aplicam força nas paredes laterais do poço, mantendo o dispositivo no local. Quando a corrente para de aquecer a mola de SMA, uma outra mola empurra o pistão de volta à posição original. [9]



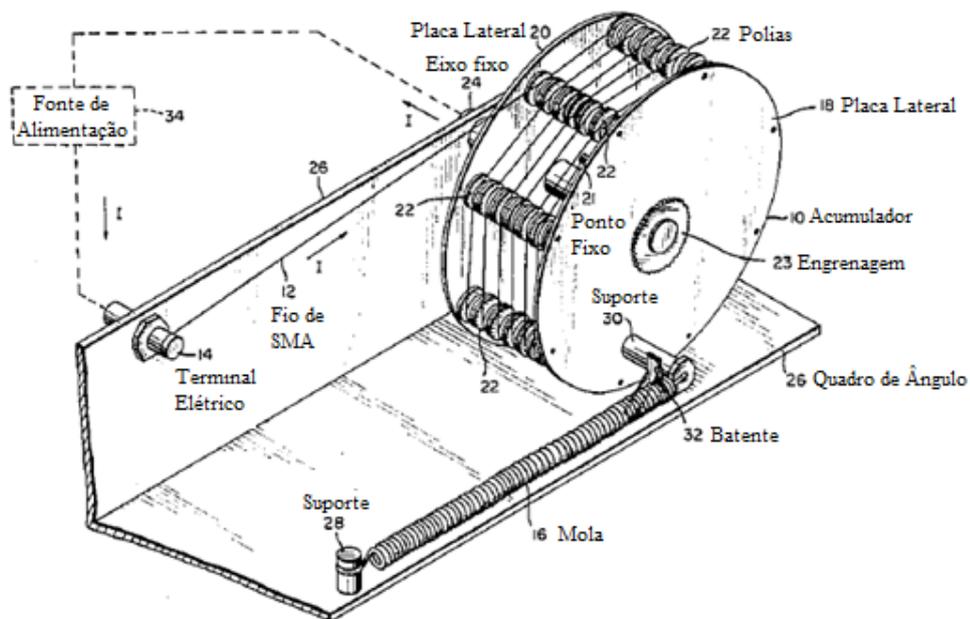
**Figura 2. 22** – Esquematização do dispositivo atuador da ferramenta de *downhole* [9 - modificada].

## 2.7 – Patentes Registradas

### 2.7.1 – Atuador Rotativo usando Liga de Memória de Forma

Desde muito tempo, patentes de mecanismos envolvendo atuadores com memória de forma têm sido registradas. Existem dúvidas sobre o funcionamento destes mecanismos e se efetivamente as ideias foram postas em prática, mas uma vez registrada a patente existe garantia da propriedade da ideia/ mecanismo.

Com data de 9 de agosto de 1988, uma patente de um atuador rotacional usando liga de memória de forma é mostrado na Figura 2.25.



**Figura 2. 23** – Mecanismo de Atuação Rotativa usando Liga de Memória com Forma [10 - modificada].

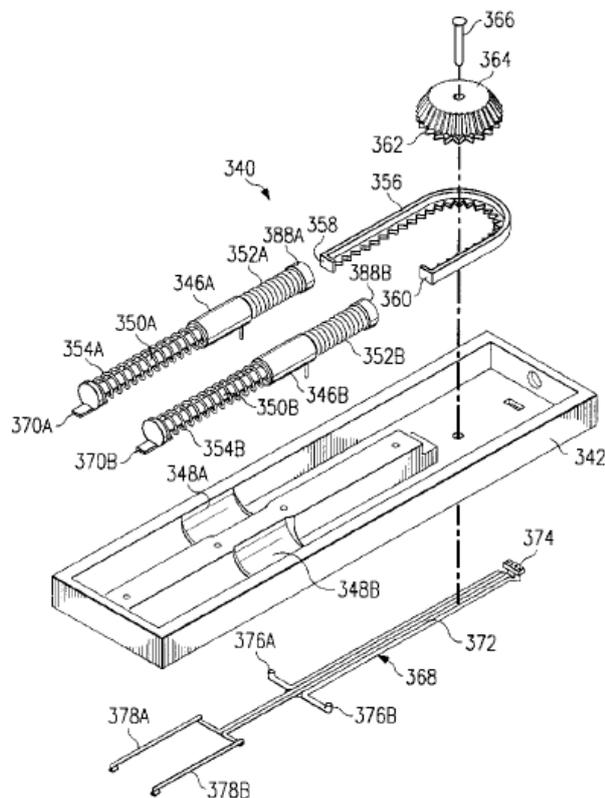
O fio de memória de forma é enrolado em um acumulador onde uma extremidade é fixada em um ponto com um terminal elétrico e a outra extremidade é fixada no próprio acumulador. Quando o fio é aquecido por Efeito Joule, ele contrai e força o acumulador a girar. A mola denominada na figura retirada da patente por 16 , é tensionada quando o fio contrai e faz com que ele retome a posição original quando o aquecimento cessa. O propósito do acumulador é armazenar um comprimento de fio para que ele possa proporcionar um deslocamento considerável.

A patente não especifica valores de comprimento de fio e nem as dimensões do acumulador. Eles devem ser selecionados de acordo com o ângulo de rotação desejado para cada tipo de aplicação.

De acordo com o autor da patente, o mecanismo seria adequado para aplicações aeroespaciais.

### 2.7.2 – Atuador com Memória de Forma

Jeffrey A. Giacomel, (1998), propôs um mecanismo que foi patenteado, para fazer o acionamento de persianas horizontais ou verticais usando memória de forma. A invenção consiste em um pinhão interligado à uma ou duas molas de liga de memória de forma. Uma vista explodida do mecanismo em questão pode ser vista na Figura 2.26.



**Figura 2. 24** – Atuador de persianas com memória de forma [12].

O mecanismo funciona da seguinte maneira, quando uma das molas é aquecida a uma determinada temperatura, ela expande e move o pinhão em um determinado sentido. O pinhão gira e como é acoplado ao mecanismo da persiana, faz com ela abra ou feche. O autor deixa claro que uma ou duas molas de SMA podem ser usadas. A segunda mola poderia ser instalada para girar o pinhão na direção oposta à primeira.

A invenção foi criada para ser implementada em sistemas automáticos de abertura e fechamento de cortinas persianas e conta com a temperatura do ambiente para melhor aquecer ou resfriar o atuador de memória de forma e assim conservar energia usando-a de forma eficiente.

As molas de SMA são representadas na Figura 2.26 pelo número 352A. Quando as condições ambientais indicam que as tiras da persiana devem ser fechadas, a mola é ativada pelo aquecimento proveniente de um circuito elétrico, fazendo com que a cremalheira 356 se movimente e gire o pinhão 362. Quando a corrente cessa, a mola de SMA esfria e é trazida para a posição inicial pela mola 354A e pela haste 350A [12].

## Capítulo 3

### Possíveis Aplicações: Estudo de caso de uma Válvula Esfera

#### 3.1 – Introdução

Por definição, válvulas são acessórios que podem controlar, interromper ou reestabelecer o fluxo em uma tubulação. Além disso, válvulas também são usadas para controle volumétrico, de pressão, temperatura e para fazer o direcionamento de fluidos que escoam em tubulações.

Existem válvulas para todos os tipos de aplicação, sejam elas para atuar em sistemas com alta pressão, ambientes corrosivos, altas temperaturas, tóxicos etc.

As válvulas podem ser classificadas quanto à sua função e à forma de acionamento. Em relação à função, as válvulas podem ser de bloqueio (ou fechamento), de regulagem, válvulas que permitem o fluxo em um só sentido, válvulas que controlam a pressão à jusante e válvulas que controlam a pressão à montante.

Válvulas de bloqueio são usadas apenas nas situações onde se é necessário interromper ou reestabelecer completamente o fluxo. Elas funcionam completamente abertas ou fechadas e por isso também podem ser chamadas de válvulas tipo *on-off*.

Quanto à forma de acionamento, as válvulas podem ser, manuais, motorizadas ou automáticas. As válvulas manuais podem ser acionadas por meio de volantes, alavancas engrenagens e afins, porém seu acionamento depende inteiramente de um operador para executar toda a ação de abertura ou fechamento da válvula (ver Figura 3.1).



**Figura 3. 1** – Válvula de acionamento manual. (fonte: Site *Swagelok*)

Já as motorizadas, podem ser acionadas pneumática, hidráulica ou eletricamente. São dependentes de uma força motriz externa proveniente de um acionador.

As válvulas com acionamento automático funcionam de forma que o próprio fluido escoando pela tubulação acione a válvula, dispensando ação externa. Em uma válvula aberta, fluidos escoam na direção da maior pressão para a menor pressão. Válvulas atuadas utilizam alguma fonte de energia externa para mudar os canais de escoamento [4].

Dentre as válvulas atuadas por motores elétricos, existem as válvulas solenoides que são usadas em praticamente toda indústria [4]. Tendo em vista o grande crescimento da automação nos diversos setores industriais, tornar uma válvula manual automática é um grande avanço. Comercialmente já se nota a inserção de atuadores elétricos, pneumáticos ou hidráulicos em válvulas que antes eram acionadas manualmente.

Alexander Czechowicz, *et. al.* (2015), disseram que SMA é uma variação de atuador com potencial para a automação industrial. Clientes e produtores estão sempre interessados em soluções técnicas e econômicas para as aplicações existentes.

Ligas com Memória de forma representam uma nova forma de atuação, porém seu sucesso depende basicamente do custo do atuador, da habilidade de integrá-lo aos requisitos industriais como as condições ambientais e tensão de alimentação disponível.

Ainda de acordo com Alexander Czechowicz, *et. al.* (2015), SMA é considerado o atuador mais econômico. Além de barato, apresenta características como propriedades

anticorrosivas e de alta qualidade. Comparado aos atuadores usados, os de memória de forma se destacam pela sua simplicidade e versatilidade, uma vez que as configurações mais usadas, utilizam um arranjo de fios e/ou molas para fazer a atuação do sistema.

É importante ressaltar que os atuadores de memória de forma possuem suas limitações, como a quantidade de ciclos de carregamento térmico que são capazes de suportar durante sua vida útil, o que restringe o seu uso.

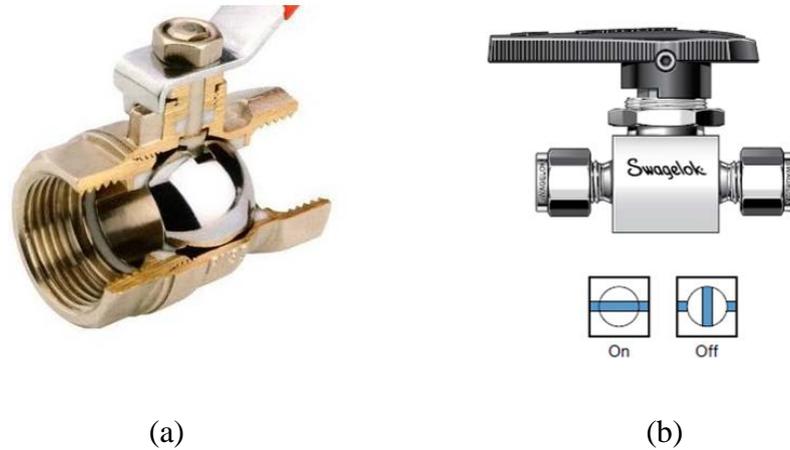
Neste projeto, utilizar-se-á como base para o estudo uma válvula esfera, comumente acionada manualmente e por atuadores elétricos e pneumáticos. O objetivo dos testes que serão realizados e mostrados no capítulo 5, será verificar a viabilidade de se usar fios com memória de forma para desenvolver um atuador e possivelmente em um futuro próximo, substituir os motores de passo elétricos ou os pneumáticos, que ocupam um grande volume e tem um peso considerável.

### 3.2 – Estudo de Caso de uma Válvula Esfera Atuada

Uma válvula esfera, ou *ball valve* em inglês, é uma válvula de retenção cujo mecanismo de vedação pode ser visto na Figura 3.2.

Válvulas de esfera são muito comumente usadas devido ao seu pequeno tamanho, peso, por possuírem uma melhor vedação em comparação com outras válvulas de retenção, são fáceis de serem operadas e causam uma menor perda de carga no sistema. Em relação ao tipo de fluido que elas podem trabalhar, a válvula de esfera é uma opção versátil, pois pode ser usada também para fluidos que tendem a deixar depósitos.

A válvula em questão contém uma esfera vazada em seu interior. Quando a passagem se alinha com a tubulação, como na Figura 3.2a, a válvula encontra-se na posição aberta. Ao girarmos 90°, o corpo da esfera fecha a passagem e interrompe o fluxo do fluido.



**Figura 3. 2** – Válvula de esfera com acionamento manual (a) Posição aberta. (fonte: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAAbjEAA/valvula-emergencia#>) (b) Representação do fluxo com a válvula aberta e fechada. (fonte: Catálogo *Swagelok*).

Na Figura 3.2, pode-se ver que a válvula possui acionamento manual. A válvula esfera é uma das mais utilizadas comercialmente em residências para a abertura e fechamento de tubulações de água pela facilidade de acionamento.

Aplicações industriais desse tipo de válvula também são constantes. Nos dias de hoje, onde o controle e a automação ganham cada vez mais espaço, esse tipo de válvula ganha acionadores ou atuadores para que possam ser acionadas remotamente e não mais manualmente.

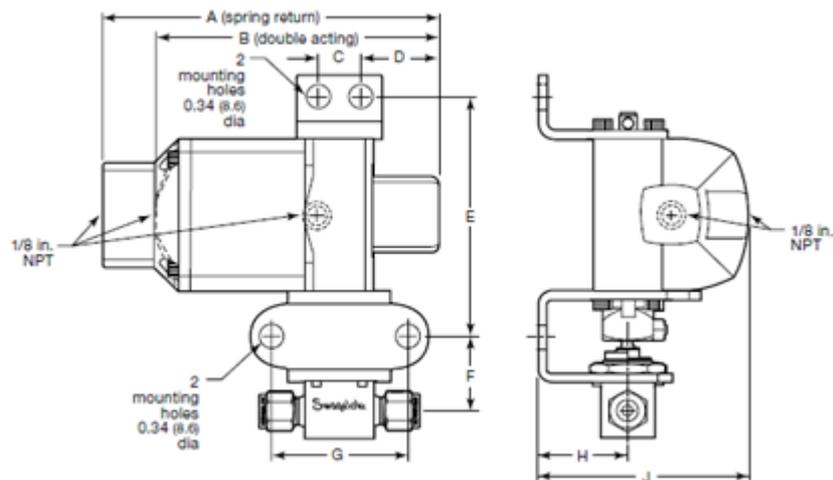
Esses tipos de atuadores podem ser elétricos, hidráulicos ou pneumáticos. Toma-se como exemplo uma válvula esfera do fabricante *Swagelok*. No catálogo do fabricante acha-se tanto as versões manuais deste tipo de válvula como versões usando atuadores elétricos e pneumáticos.



**Figura 3.3** – Válvulas esfera com acionadores pneumáticos [11].

Embora o tamanho do atuador em comparação com o tamanho válvula seja muito maior, o fabricante garante que seus acionadores pneumáticos são compactos, leves e fáceis de montar.

As dimensões do atuador pneumático podem ser vistas na Figura 3.4. A válvula esfera compreende apenas a região destacada na Figura 3.3. Note o tamanho do atuador em comparação com a válvula.



**Figura 3.4** – Dimensões do acionador pneumático [14].

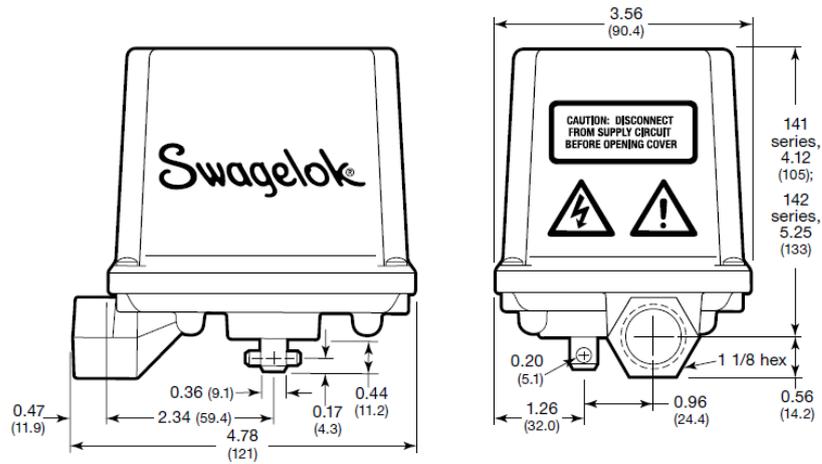
Na Tabela 3.1 é possível ver as dimensões de um atuador pneumático da série de válvulas esfera 43G do fabricante *Swagelok*. É possível observar que o tamanho do atuador é relativamente maior do que a própria válvula em si. A vantagem de um atuador utilizando um arranjo de fios com memória de forma, seria o seu tamanho e o espaço físico ocupado. Na indústria, além da busca pela automação, a busca pelo uso de equipamentos compactos e de peso reduzido também é frequente. O peso de atuadores pneumáticos pode variar de 0,75 kg a 9 kg, dependendo da série de válvulas [14]. Equipamentos mais leves, que usam menos matéria prima são mais baratos e se tornam mais competitivos no mercado.

**Tabela 3. 1** – Tabela de Dimensões do Fabricante *Swagelok* (fonte: Catálogo *Swagelok*)

Série da Válvula	Modelo do Atuador	Dimensões (mm)								
		A	B	C	D	E	F	G	H	J
43G	33	200	150	22,4	43,9	117	29,7	50,8	44,4	103

### 3.3.1 – Válvula esfera com acionamento elétrico

Atuadores elétricos podem ser usados para controlar a posição das válvulas de esfera de instrumentação. Estão disponíveis modelos usando correntes contínua e alternada. Um sinal elétrico é usado para mudar posição da válvula a partir de locais remotos. Limitadores integrais fornecem uma saída sinal da posição da válvula, mesmo entre posições [11]. A Figura 3.5 mostra as dimensões em polegadas e milímetros (entre parênteses) de um atuador elétrico que também pode ser visto na Figura 3.6. O volume ocupado pelo atuador elétrico do fabricante em questão varia entre 1148,5 cm<sup>3</sup> e 1454,8 cm<sup>3</sup>.



**Figura 3. 5** – Acionador elétrico [13].



**Figura 3. 6** – Atuador elétrico *Swagelok* [13]

Na Tabela 3.2 pode-se ver os dados disponibilizados pelo fabricante *Swagelok* para o atuador elétrico de válvulas esfera “2-way”, como também podem ser chamadas as válvulas do estudo.

Tabela 3. 2 – Designações para o atuador *Swagelok* [13].

Tensão Elétrica/ Frequência	Válvula	Corrente de Operação (Ampere)	Tempo aproximado para 90° de atuação (segundos)	Torque de Saída
<b>Atuadores da Série 141</b>				
<b>120V/ 60 Hz</b>	<b>2 way</b>	1,1	2,5	2,8 N.m
<b>220/230/240 V/ 50 Hz</b>		0,5	2,5	
<b>100 V/ 60 Hz</b>		1,2	2,5	
<b>100 V/ 50 Hz</b>		1,1	3,0	
<b>24 V</b>		0,3	2,5	
<b>24 V</b>		0,3	2,5	
<b>Atuadores da Série 142</b>				
<b>120V/ 60 Hz</b>	<b>2 way</b>	1,7	4,0	11,3 N.m
<b>220/230/240 V/ 50 Hz</b>		0,7	4,0	
<b>100 V/ 60 Hz</b>		2,0	4,0	
<b>100 V/ 50 Hz</b>		1,6	4,5	
<b>24 V</b>		0,9	4,0	
<b>24 V</b>		0,9	4,0	

Pode-se notar que o acionador elétrico opera até com 24 V e 0,3A. Porém, embora a corrente necessária para o uso do SMA seja maior, a possibilidade de se ter um atuador menor e bem mais leve também deve ser levada em consideração.

De acordo a Tabela 3.2 com dados extraídos de um dos catálogos do fabricante *Swagelok*, o atuador é capaz de fornecer um torque de saída de até 11,3 N.m para a série de válvulas 43G citada no tópico 3.3 [13]. O capítulo 6 apresentará um comparativo entre os torques alcançados pelo atuador elétrico aqui apresentado e o atuador com memória de forma, a ser estudado nos próximos capítulos.

## Capítulo 4

### Metodologia

#### 4.1 – Metodologia do Projeto

O presente trabalho dará prosseguimento a estudos já realizados nos laboratórios do CEFET/RJ, utilizando um aparato experimental a fim de ensaiar as condições de atuação de uma válvula de bloqueio comercial com acionamento rotativo.

Usando o conceito do *Efeito memória de forma com tensão assistida*, um fio de SMA será carregado com o auxílio de uma mola de aço comum. De forma sucinta, o fio é deformado pela força de uma mola. A mola e o fio de SMA serão tensionados simultaneamente de forma que a mola consiga causar uma deformação no fio. A representação esquemática da metodologia do experimento pode ser vista na Figura 4.1.

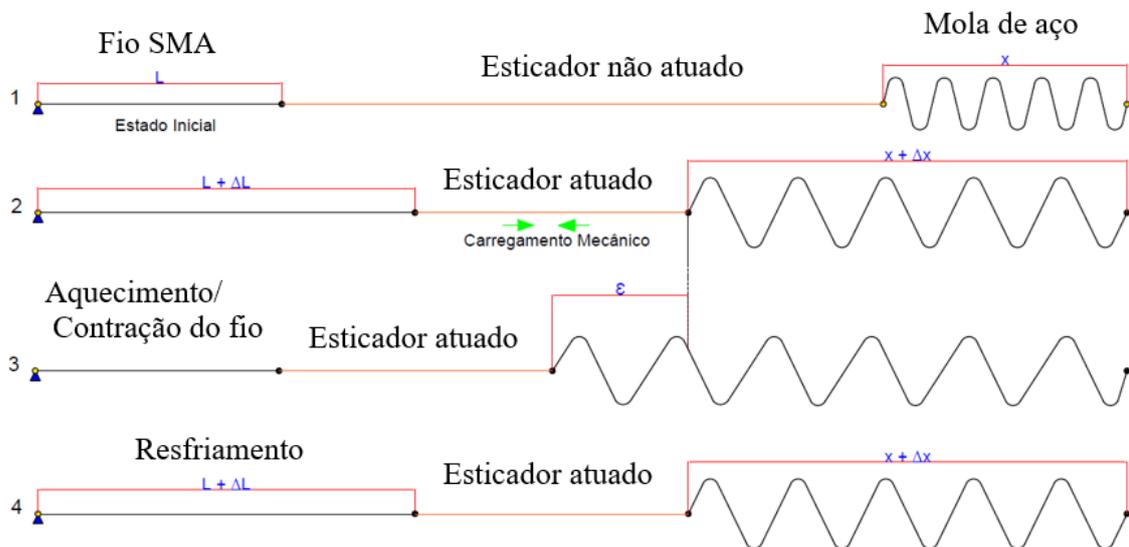


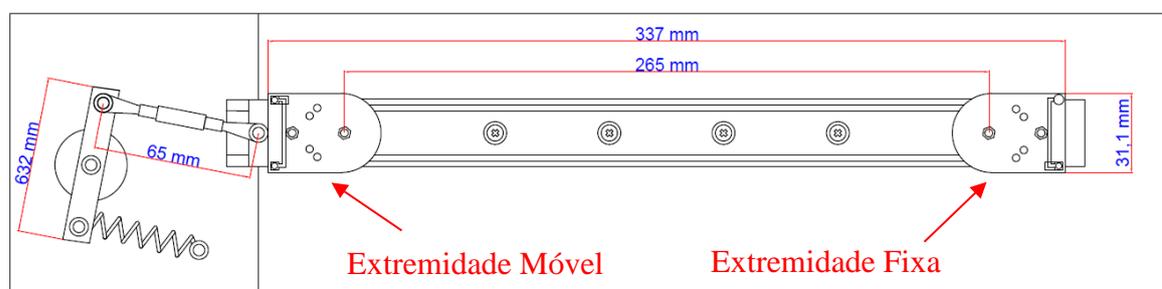
Figura 4. 1 - Representação esquemática da metodologia do experimento [8].

A força elástica da mola juntamente com a tensão exercida por um esticador traciona o fio deformando-o e fazendo com que ele sofra transformação de fase de martensita maclada para a variante não maclada. Aquecendo e resfriando o fio, é possível ensaiar o sistema de atuação que poderá ser utilizado em uma válvula com acionamento rotativo do tipo *on-off*. Ao ser aquecido, o fio recupera a forma original assumindo a sua fase austenítica. Com o resfriamento e a tensão trativa constante, ele assume a fase martensítica não maclada com deformação associada.

O valor de tensão inicial imposto na mola, os detalhes do procedimento experimental e a forma de aquecimento do fio para que haja atuação do sistema serão estudados posteriormente.

## 4.2 – Aparato Experimental

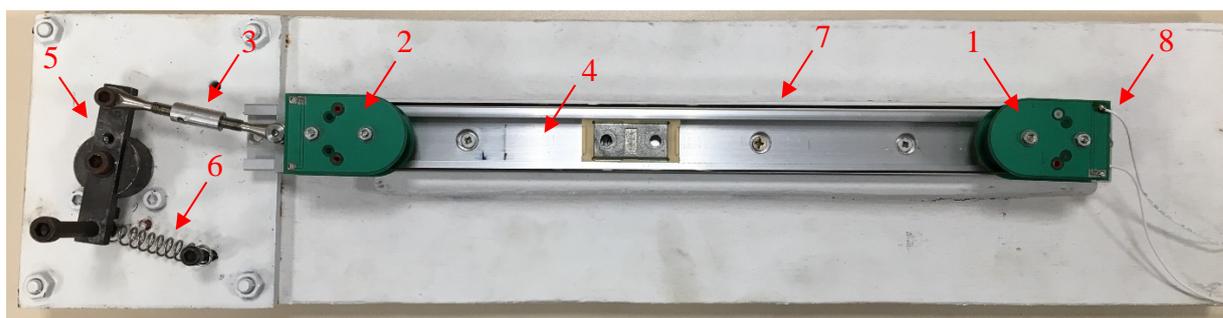
O aparato experimental que será usado para a realização dos ensaios pode ser visto esquematicamente na Figura 4.2. Uma bancada de testes foi montada usando um atuador de SMA desenvolvido pelo fabricante MIGA MOTORS, no estado da Califórnia, EUA. O fio com memória de forma é envolto em roldanas nas extremidades de um trilho onde a extremidade da esquerda é móvel e a da direita, fixa. Uma fonte é utilizada para aquecer o fio e garantir a transformação de fase/ atuação do sistema.



**Figura 4. 2** – Esquematização do Aparato Experimental.

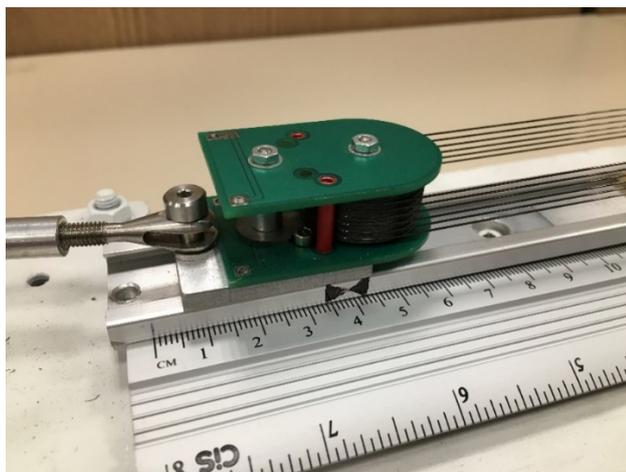
### 4.3 – Funcionamento do Atuador

A bancada de testes é composta por uma base em madeira que suporta um trilho por onde o dispositivo de atuação desliza. A Figura 4.3 é uma foto tirada do atuador estudado.



**Figura 4.3** – Foto do Atuador na Configuração 1

A extremidade 1 é fixada no trilho 4 e permanece imóvel durante todo o experimento. Por meio de uma haste ajustável 3, a extremidade 2 é conectada à haste 5. Na outra ponta da haste 5, uma mola 6 é conectada. O fio de SMA 7 é enrolado num sistema de roldanas que pode ser visto melhor na Figura 4.4. O fio é previamente deformado por meio de carregamento mecânico na extremidade móvel, fazendo com que ele assuma a variante não maclada da martensita. Quando o fio é aquecido, ele sofre transformação para a fase austenítica e contrai, fazendo com que a extremidade 2 se desloque para a direita, movimentando a haste 5 com o objetivo de girar 90° no sentido horário e caracterizando a atuação de uma suposta válvula. O fio com memória de forma é aquecido pelos terminais elétricos em 8. A esta configuração deu-se o nome de Configuração 1.



**Figura 4.4** – Vista da extremidade móvel do atuador.

## 4.4 – Instrumentos Utilizados

Para a realização dos experimentos usando a bancada de testes, foi necessária a utilização de alguns instrumentos de medição e uma fonte de energia elétrica para o aquecimento do fio.

### 4.4.1 – Fonte

A fonte de energia elétrica utilizada para fornecer a corrente necessária para o aquecimento por Efeito Joule do fio de SMA foi o modelo SKFA-03D do fabricante SKILL TEC (ver Figura 4.5). A fonte trabalha com corrente contínua e corrente alternada, podendo ser usada em série ou em paralelo. Para este projeto, será usada corrente contínua passando pelo fio para aquecê-lo.



**Figura 4.5** – Fonte de Alimentação Elétrica

#### 4.4.2 – Multímetro

A fim de conferir os valores apresentados no visor da fonte, foi utilizado um multímetro devidamente calibrado para aquisição dos valores de tensão elétrica provenientes da fonte. O multímetro é do fabricante FLUKE modelo 789. (ver Figura 4.6)



**Figura 4.6** – Multímetro

#### 4.4.3 – Alicate Amperímetro

Pela mesma razão da utilização do multímetro, utiliza-se um alicate amperímetro para conferir se a corrente fornecida e apresentada no visor da fonte condizia com a corrente que efetivamente chegava até os fios de SMA. O alicate amperímetro usado que é mostrado na Figura 4.7 é do fabricante MINIPA modelo ET-4095.



**Figura 4.7** – Alicate Amperímetro

#### 4.4.4 – Câmera Termográfica

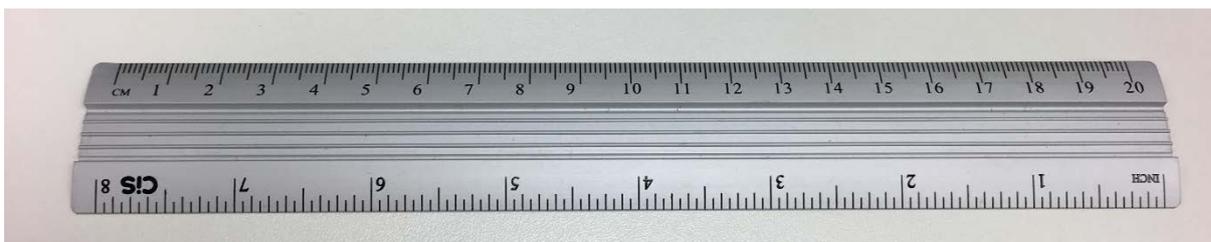
Uma câmera termográfica do fabricante FLUKE, modelo TI 110, foi usada para medir a temperatura do fio durante o aquecimento por Efeito Joule. A câmera usada pode ser vista na Figura 4.8.



**Figura 4. 8** – Câmera Termográfica Fluke (fonte: <http://www.getrotech.com.br/filtros/termografia/fluke-ti110-camera-de-imagens-termicas.html>)

#### 4.4.6 – Deslocamento

A princípio, o deslocamento do sistema é medido usando uma régua graduada comum presa à bancada de testes (ver Figura 4.9).



**Figura 4. 9** – Régua Graduada Comum

#### 4.5 – Cronograma de Ações

Com o aparato devidamente montado, os procedimentos experimentais podem ser realizados. A seguir, mostra-se o plano de ações que consiste em um passo-a-passo para a realização do experimento:

1. Reunir informações sobre o fio usado na bancada de testes;
2. Acionar o atuador na configuração inicial - fazer medições de tempo e deslocamento do sistema;
3. Desmontar o aparato;
4. Fazer o aquecimento do fio sem a presença da mola - medir seu comprimento (dessa forma pode-se obter o quanto o fio foi previamente deformado e qual o seu deslocamento máximo);
5. Desenvolver uma maneira de tracionar o fio do atuador até aproximadamente 8% do tamanho do seu original;
6. Medir o comprimento do fio após o retorno elástico;
7. Aquecer novamente o fio - fazer medições de tempo e temperatura para as quais o material começa e termina a recuperação; desta forma, tem-se as características aproximadas do fio de SMA.
8. Desenvolver um meio de controlar a deformação da mola;
9. Obter o Coeficiente Elástico da mola usada na bancada de testes – Fazer Testes de Tração usando equipamento do fabricante INSTRON; A mola deve exercer força suficiente para deformar o fio de SMA quando ele estiver à temperatura ambiente e não deve ser tão rígida de forma a impedir ou limitar a atuação do fio de SMA.
10. Integrar o sistema fio mola;
11. Atuar o sistema;
12. Medir o comprimento do fio e o deslocamento proporcionado - comparar com os dados adquiridos em (1);
13. Realizar medições de força e corrente consumida pelo atuador em cenários com e sem carga;
14. Determinar parâmetros de projeto do atuador SMA adequados às condições de trabalho;

#### 4.6 – O Experimento

Para a realização dos experimentos é necessário que se tenha informações específicas sobre os componentes envolvidos. As informações sobre o fio, as molas utilizadas e o atuador encontram-se nos tópicos a seguir.

#### 4.6.1 – O Fio de SMA

O fio de níquel-titânio (Nitinol) usado na construção do modelo de atuador é do fabricante DYNALLOY e suas informações encontram-se na Tabela 4.1.

**Tabela 4. 1** – Informações do Fabricante do Fio

<b>Fio de SMA</b>	
Diâmetro do Fio	0,51 mm
Resistência	4,3 $\Omega$
Força de Tração do Aquecimento	3560 g
Força de Deformação no Resfriamento	1424 g
Corrente para 1 segundo de contração	4000 mA
Tempo de Resfriamento (LT Wire – 70°C)	16,8 s
Tempo de Resfriamento (HT Wire – 90°C)	14,0 s

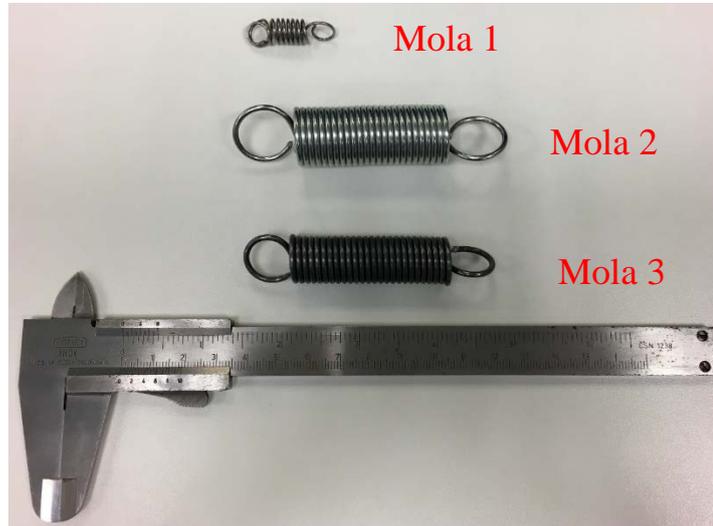
#### 4.6.2 – As Molas

Para a realização dos experimentos, três molas comuns de aço foram utilizadas. A primeira, denominada Mola 1, de comprimento relativamente pequeno em relação às outras, 31,25 mm, possui rigidez aproximada de 2,199 N/mm. A Mola 2 possui comprimento igual a 52,4 mm e a Mola 3, 54 mm. Os valores das rigidezes podem ser vistos na Tabela 4.2.

**Tabela 4. 2** – Rigidezes das Molas

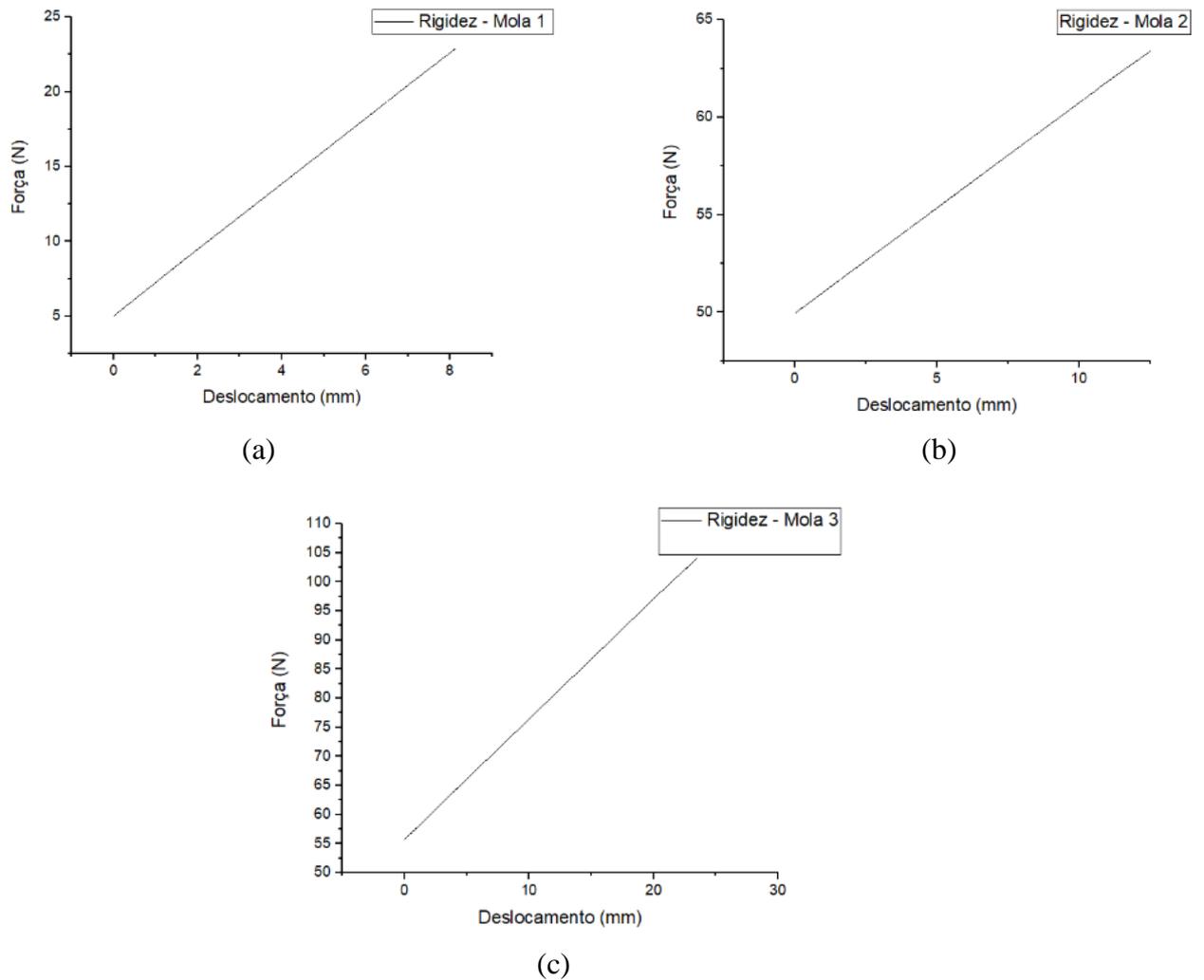
<b>Molas</b>	<b>Rigidezes</b>
Mola 1	2,199 N/mm
Mola 2	1,021 N/mm
Mola 3	2,060 N/mm

A Figura 4.10 mostra as molas envolvidas no experimento.



**Figura 4. 10 – Molas**

Para a aquisição dos valores das rigidezes, as molas foram submetidas a um ensaio em uma máquina universal de tração, do fabricante Instron, modelo 5966, a fim de tornar suas características conhecidas. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.11. Para o ensaio, as molas foram submetidas à uma força de tração que é medida utilizando uma célula de carga de 1 kN. De acordo com a força aplicada, o *software* do equipamento registra o deslocamento desenvolvido e é capaz de fornecer os dados adquiridos. O teste foi realizado no laboratório de Compósitos de Adesivos (LADES) do CEFET/RJ, à temperatura ambiente, utilizando uma taxa de deformação de 0,083 mm/s.



**Figura 4.11** – Curvas de Rigidezes das Molas. (a) Mola 1. (b) Mola 2. (c) Mola 3.

#### 4.6.3 – O Atuador

A patesca onde o fio de memória de forma irá atuar foi desenvolvida pelo fabricante MIGA MOTORS, no estado da Califórnia. As informações disponibilizadas pelo fabricante encontram-se na Tabela 4.3. O modelo vem com uma pré-carga de fábrica desconhecida e o comprimento do fio informado na especificação é referente ao fio já deformado, esticado.

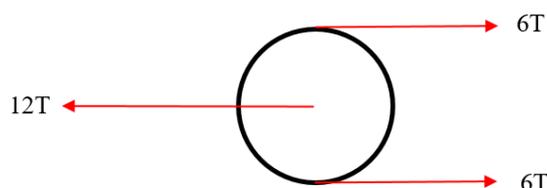
**Tabela 4.3** – Informações do fabricante da patesca

<b>Miga Motor Company ‘HT’ Flexinol Model</b>	
Tensão Inicial, V	60 Volts
Comprimento do Fio de SMA, L	3695,7 mm
Diâmetro do Fio de SMA, D	0,51 mm
Carregamento Máximo do fio, (Load)	41,90 N
Início em Temperatura Ambiente	23 °C
Resistência do Fio, R	18,06 $\Omega$
Corrente, i	3,32 A
Poder de Atuação	199,31 Watts
Poder de Detenção	23,92 Watts
$A_f$	99,3 °C
Tempo de Resfriamento	14.1 s
Tempo de Atuação, T	1,824 s
Velocidade, V	70,9 mm/s
Energia de Atuação	363,546 J
Recuperação	129,35 mm
Força em Milhões de Ciclos	34,85 N

Utilizando as informações do fabricante do fio juntamente com o estudo da geometria do atuador, pode-se ter noção da força necessária para causar a deformação no fio de SMA. A partir dos dados da Tabela 4.1, tem-se que a força exercida pelo fio durante o aquecimento e recuperação da forma é de 3560 g (3,5 kg ou 35,6 N). Isso significa que a mola que traciona o fio não deve exercer uma força maior que esse valor, caso contrário, o fio não será capaz de recuperar a sua forma. Da mesma maneira, a força de deformação durante o aquecimento, informada pelo fabricante do fio é igual a 1424 g (1,42 kgf ou 14,24 N), isso quer dizer que caso a mola exerça uma força menor que esse valor no sistema, ela não será capaz de trazer o fio à sua condição de pré-deformação.

Define-se então dois limites de forças para o experimento. A mola utilizada deverá produzir uma força dentro desse intervalo para que o sistema funcione de maneira correta. Porém, é importante ressaltar que esses dados são referentes ao fio em configuração única. Devido à geometria do aparato em questão, existe uma multiplicação de forças por meio do

sistema de patescas. O esquema na Figura 4.12 mostra o comportamento das forças na extremidade móvel do atuador.



**Figura 4. 12** – Resultante de Forças na patesca (fonte: autor)

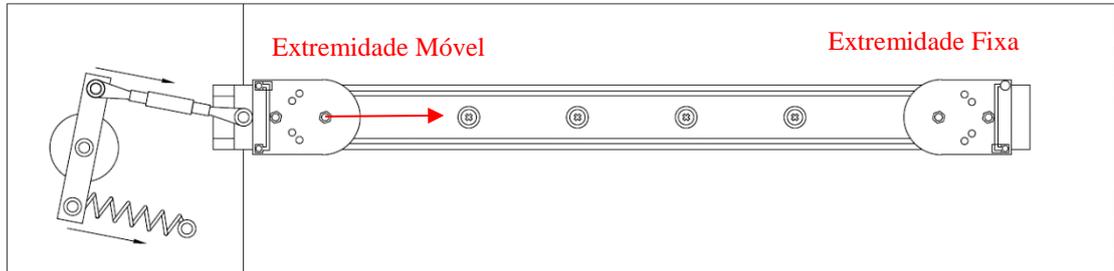
A patesca configura um sistema de roldanas. Como o fio passa seis vezes pela extremidade móvel, tem-se de cada lado,  $6T$ , onde  $T$  representa a tensão no fio. Para que haja equilíbrio, a força resultante do lado esquerdo da roldana deve ser então  $12T$ .

Dessa forma, é necessário multiplicar o valor dos limites estabelecidos acima por 12. O limite de esforço máximo que o fio consegue puxar será então aproximadamente 42 kgf (aproximadamente 420 N) e o limite mínimo de 17,04 kgf (170,4 N).

#### 4.6.3 – Configuração 1

Nesta configuração, a bancada de testes é montada usando a mola de comprimento menor, a Mola 1. Esta configuração já foi apresentada anteriormente e mostrada na Figura 4.3.

Como a pré-carga no fio é desconhecida, inicia-se os testes com uma corrente relativamente baixa para observar o comportamento do fio com memória de forma. O comprimento original do fio, na fase martensítica maclada, sem deformação associada também é desconhecido nesta configuração. Um diagrama de corpo livre mostra as forças atuantes durante o experimento na Figura 4.13. Conforme o fio é aquecido, ele traciona a mola, causando um deslocamento da extremidade móvel para a direita. Quando o fio esfria, a mola comprime e faz com que o fio volte à posição inicial.



**Figura 4.13** – Diagrama de Corpo Livre

#### 4.6.3.1 – Início dos Testes

Como dito anteriormente, os testes foram iniciados com correntes baixas para que se pudesse analisar o comportamento do fio. Mantendo a bancada na Configuração 1, o mecanismo foi alimentado com uma tensão elétrica de 24 V, atingindo valores de correntes entre 1,34 A e 1,54 A devido à mudança de resistividade entre as fases martensítica e austenítica. Os dados recolhidos neste primeiro teste podem ser vistos na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4** – Teste 1 na Configuração 1

Configuração 1 - Teste 1	
Tensão Elétrica	24 V
Corrente	1,37 – 1,57 A
Tempo até início da atuação	3,1 s
Tempo de atuação total	12,13s
Deslocamento (quando atuado)	8 mm
Retorno	8 mm

Como o fabricante do atuador informa que o fio deve receber uma corrente de 3A e 60V para ser atuado, mais testes foram realizados, aumentando-se a tensão elétrica aos poucos até que se atingisse os valores desejados. Os dados recolhidos dos testes podem ser vistos na Tabela 4.5.

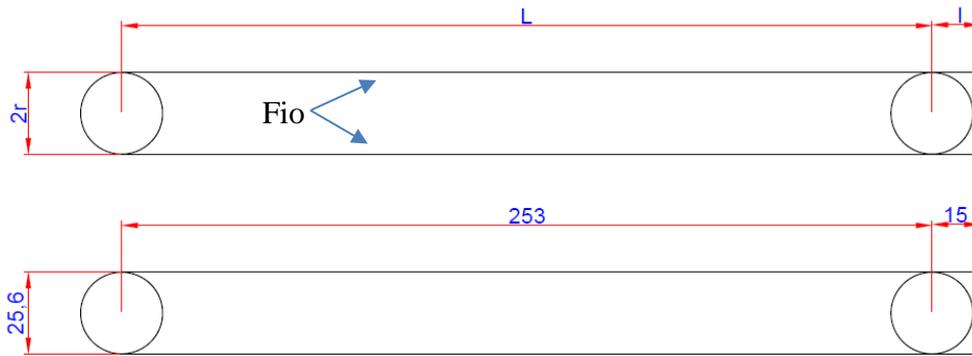
**Tabela 4.5** – Testes 2, 3 e 4 na Configuração 1

Configuração 1 - Teste 2	
Tensão Elétrica	30 V
Corrente máxima	1,89 A
Deslocamento (quando atuado)	10 mm
Retorno	1 mm
Configuração 1 – Teste 3	
Tensão Elétrica	40 V
Corrente máxima	2,57 A
Deslocamento (quando atuado)	3 mm
Retorno	0,5 mm
Configuração 1 – Teste 4	
Tensão Elétrica	60 V
Corrente máxima	3,06 A
Deslocamento (quando atuado)	0 mm
Retorno	0 mm

Analisando os dados obtidos a partir dos testes realizados e observando o sistema, pode-se perceber que quanto mais o fio contrai, menos a mola consegue deformá-lo. Este comportamento se deve ao fato da Mola 1 não estar adequada ao sistema. Embora sua rigidez seja maior que as das outras, seu pequeno comprimento limita a força que ela é capaz de fazer. Sendo assim, conclui-se que a mola não consegue exercer força o suficiente para deformar o fio à temperatura ambiente e não é adequada aos parâmetros deste experimento. Desta forma, o plano de ações definido no tópico 4.5 teve que ser interrompido.

Porém, ao atingir 3 A de corrente informados pelo fabricante do mecanismo, é possível garantir a completa transformação do fio para a fase austenítica. Mede-se a distância entre os centros das roldanas e assim pode-se estimar o comprimento original do fio de SMA

completamente recuperado, que é de 3,50 metros. O cálculo para a estimativa de comprimento pode ser visto após a Figura 4.14 que mostra um esquema para facilitar a sua compreensão.



**Figura 4. 14** – Esquema para cálculo do comprimento do fio (fonte: autor).

No esquema da Figura 4.14, os círculos representam as roldanas por onde passa o fio de SMA. Assim, pode-se calcular o comprimento aproximado da seguinte forma:

$$\text{Comprimento Total} = (2 \times l) + (12 \times L) + (11\pi \times r) \quad (1)$$

O primeiro termo da Equação 1 representa as pontas dos fios nos terminais elétricos. O segundo termo, representa a quantidade de vezes que o fio permanece no trecho reto do atuador. O último termo da equação representa o número de vezes em que o fio passa pelas roldanas. São 6 passagens pela roldana móvel e 5 pela fixa, totalizando 11 vezes.

$$\text{Comprimento Total} = (2 \times 15) + (12 \times 253) + 11\pi \times 1,28) \quad (2)$$

$$\text{Comprimento Total} = 3508,3 \text{ mm}$$

Comparando o valor obtido na Equação 2 com o valor apresentado na Tabela 4.3 para o comprimento do fio, pode-se perceber que há discrepância entre os valores. A informação do

fabricante se refere ao comprimento do fio vindo de fábrica, com uma pré-deformação desconhecida efetuada e não ao comprimento original, sem deformação associada.

De acordo com estudos, uma forma de garantir a completa transformação de fase do fio durante um carregamento mecânico é deformá-lo em torno de 8% do seu comprimento. Para este estudo, será utilizado um limite de 5% de deformação. Sendo assim, o fio de 3508 mm deve ser deformado até atingir um comprimento de 3585 mm. Utilizando a Equação 1 para calcular o comprimento do fio, pode-se agora estimar a distância entre as roldanas, após a deformação.

Sendo assim,

$$3585 = (2 \times 15) + (12 \times L) + (11\pi \times 1,28) \quad (3)$$

$$L = 294,81 \text{ mm}$$

Ou seja, a extremidade móvel deverá ser deslocada 41,81 mm para a esquerda para que os 5% de deformação do fio de SMA sejam atingidos. Porém, existe um fator limitante para que esse deslocamento seja atingido. O trilho por onde deslizam as patescas possui pouca folga para que esse nível de deformação seja atingido. Desta forma, será usado o deslocamento máximo que o trilho permitir.

#### 4.6.2 – Configuração 2

Para a Configuração 2, fez-se necessária a aquisição de novos itens. A mola 2 passou a ser usada e um esticador de cabo de aço foi incorporado ao projeto.

Como a distância entre o pino que fixa a mola na bancada e a extremidade da haste que faz o sistema girar é muito pequena, foram necessários ajustes na bancada para que novos testes com configurações diferentes pudessem ser feitos.

Na Figura 4.15, pode-se observar as mudanças feitas na bancada de testes caracterizando a Configuração 2. O esticador 9 é fixado em um pino 10 e a mola 2, com comprimento maior, 52,5 mm, é adicionada. Por meio do esticador, deve-se tensionar a mola que agirá na haste fazendo com ela gire no sentido anti-horário tracionando o fio que se encontra em seu estado original, deformando-o e fazendo com que ele passe da estrutura martensítica maclada para a variante não maclada.



**Figura 4. 15** – Configuração 2 da Bancada de Testes.

Com a bancada montada, o esticador pôde então ser acionado. Porém, mesmo quase em fim de curso, o fio de memória de forma não sofreu deformação e permaneceu na posição inicial. A mola 2 utilizada, possui coeficiente elástico de 1,021 N/mm e foi deformada cerca de 42,9 mm. Desta forma pode-se ter noção da magnitude da força aplicada, que é de aproximadamente 43,84 N ( $\approx 4,3$  kgf).

Tendo em mãos os limites definidos no tópico 4.6.3, a Mola 2 na Configuração 2 não é capaz de alcançar o limite mínimo de força necessário para deformar o fio. Para que esse limite seja atingido, ou o esticador deve ser substituído por um outro com curso maior a fim de aumentar a deformação da mola e assim aumentar a força exercida por ela, ou uma mola de maior rigidez deve ser usada.

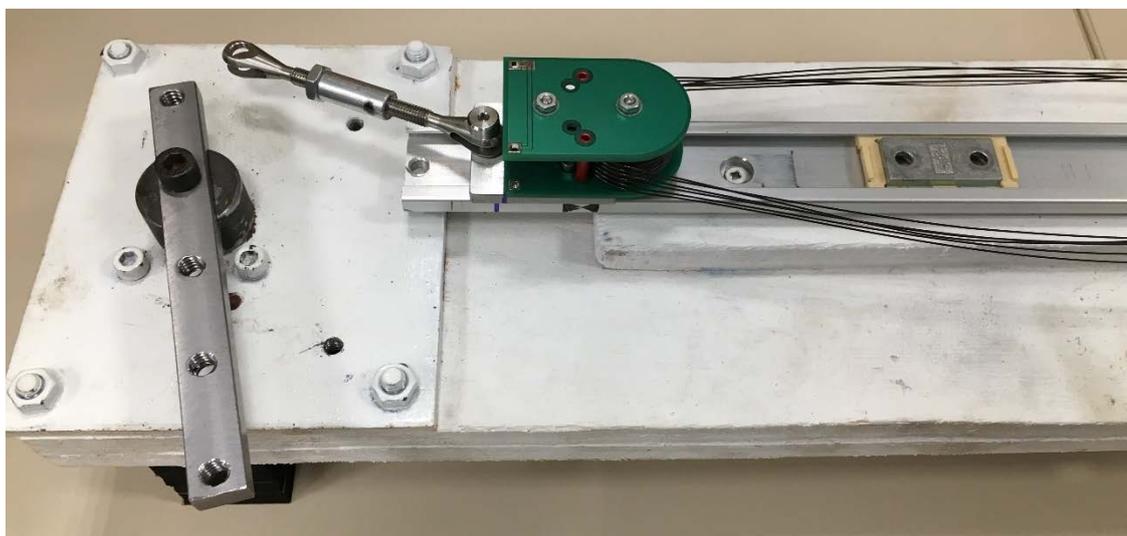
Partindo para a substituição da Mola 2 pela Mola 3, usando a mesma configuração e o mesmo esticador, o aparato é novamente montado. Repetindo o processo, a Mola 3 atingiu uma deformação de 37,2 mm, produzindo uma força de aproximadamente 7,6 kgf ( $\approx 76$  N), porém

também não foi capaz de deformar o fio de SMA visto que esse valor não se encontra entre os limites definidos no tópico 4.6.3.

#### 4.6.4 – Configuração 3

Tendo sido falhas as duas primeiras tentativas para conseguir a deformação do fio de SMA, uma terceira configuração é proposta. Na Figura 4.16 é possível ver que a haste responsável pelo movimento de rotação do mecanismo foi modificada a fim de se formar uma alavanca para multiplicar as forças envolvidas no sistema, diminuindo a deformação das molas a serem utilizadas e garantindo que elas não sofram deformação permanente.

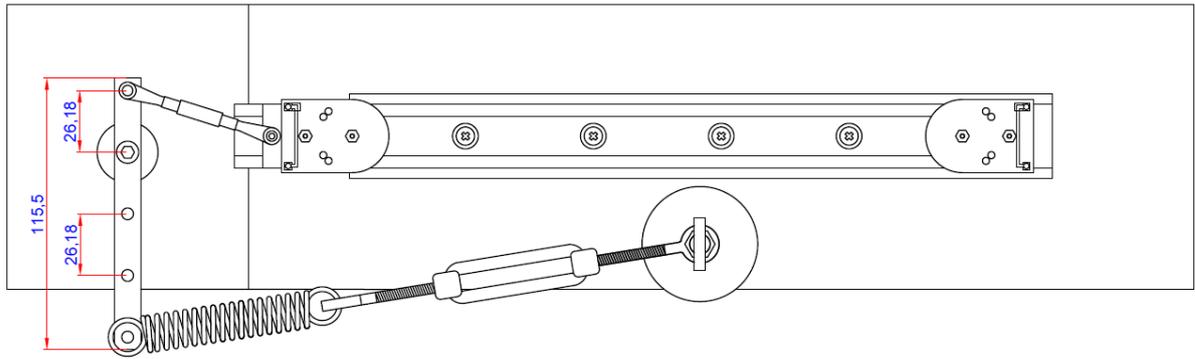
Além disso, pôde-se notar que após a substituição da haste menor pela maior, o mecanismo de rotação parece girar mais livre, com efeitos de atrito minimizados após a desmontagem do aparato.



**Figura 4. 16** – Haste multiplicadora de forças.

A nova haste possui um comprimento total de 115,5 mm e cada furo se encontra a uma distância de 26,18 mm entre centros. Desta forma, pode-se aumentar a força exercida no fio em

até três vezes, para que seja possível a sua deformação. A Figura 4.17 mostra um desenho esquemático da bancada de testes com a haste multiplicadora e suas dimensões.



**Figura 4.17** – Esquemático da bancada com haste multiplicadora de forças.

Usando a Configuração 3, o sistema é remontado utilizando a mola 3, mais rígida, no terceiro e mais distante furo da nova haste mais comprida. Um novo esticador, maior e mais robusto é incorporado à bancada também. A imagem do aparato pode ser vista na Figura 4.18.



**Figura 4.18** – Configuração 3 usando a mola 3.

Da mesma maneira, o sistema é tracionado usando o esticador até que atinja seu limite. A mola é deformada cerca de 120 mm e a força exercida por ela também não é capaz de deformar o fio. Uma força externa desconhecida é necessária para que a extremidade móvel do aparato se movimente para a esquerda, deformando o fio.

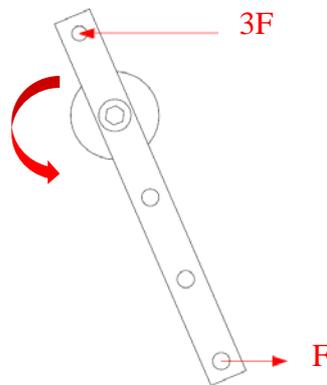
Fazendo uso da Lei de Hooke para um deslocamento de mola de 66 mm e usando o coeficiente elástico da Mola 3, pode-se ver que a força exercida por ela é:

$$F = k \times x \quad (4)$$

$$F = 2060 \times 0,066 \quad (5)$$

$$F = 135,96 \text{ N} \approx 13,6 \text{ kg}$$

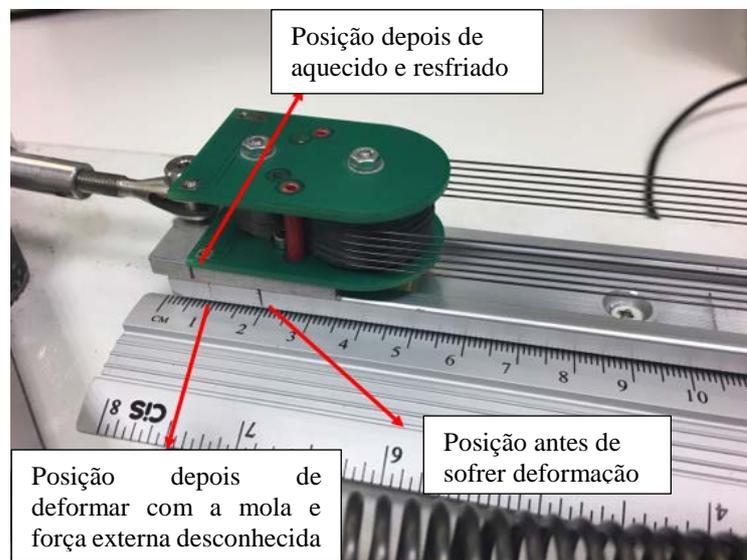
Com a utilização da haste multiplicadora, na outra ponta existe uma força resultante de 407,88 N ou 40,78 kgf. A Figura 4.19 mostra o diagrama de corpo livre da haste e como as forças se comportam. A força em questão não é capaz de deformar o fio todo o conjunto foi tracionado, mesmo ultrapassando o limite calculado a partir dos dados fornecidos pelo fabricante do fio. Isso mostra que existe algum fator que impede que a força exercida pela mola chegue à outra extremidade, deformando o fio de SMA.



**Figura 4. 19** – Diagrama da Haste

Com a mola ainda sob tensão, uma força externa desconhecida é exercida de forma manual na haste a fim de ajudar no processo de deformação do fio. Dessa forma, é possível atingir um deslocamento de aproximadamente 10 mm da extremidade móvel. Enquanto a deformação é produzida, a haste gira no sentido anti-horário, fazendo com que a mola 3 recue e exerça uma força menor no sistema.

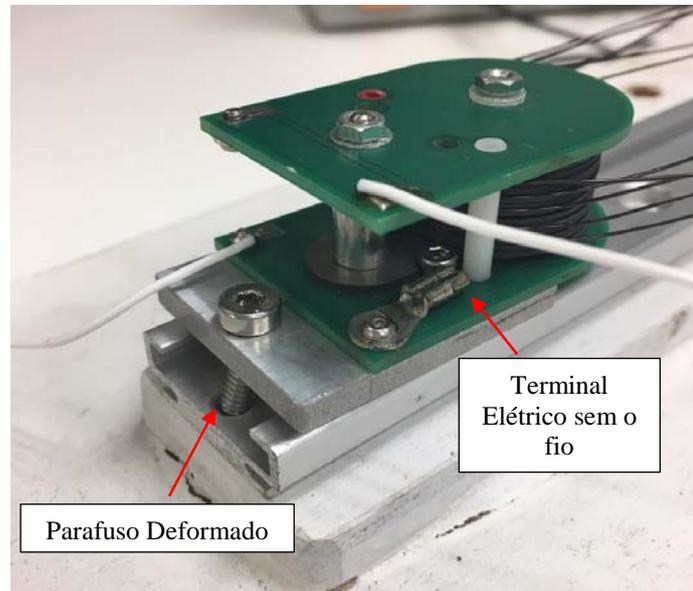
Com o fio deformado, um pequeno pré-teste usando 24V e 1,5 A é realizado. Como já esperado, o fio recupera muito pouco, devido à intensidade da força da mola, movimentando a extremidade móvel apenas 2 mm para a direita e quase não movimentando a haste. Porém, ao resfriar, a mola foi capaz não só de fazer o fio retornar para a posição de início do teste, como conseguiu que ele se deslocasse mais 4 mm. O que mostra que a mola consegue deformar o fio, mas devido a algum outro problema na bancada, a força exercida na haste ainda não está sendo transferida ao fio para realizar a deformação. Pode-se visualizar o acontecimento na Figura 4.20.



**Figura 4. 20** – Resultado do pré-teste da Configuração.

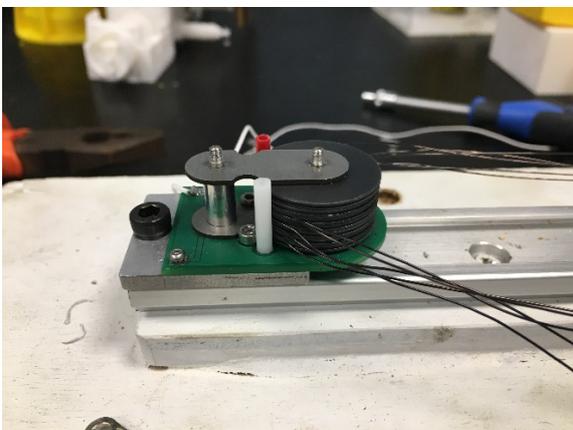
Como depois de resfriado, a mola foi capaz de deformar o fio, um segundo teste é realizado, dessa vez, usando 30 V (1,89 A). Porém, a força exercida pelo fio durante o aquecimento e transformação para a fase austenítica é alta e a união entre o fio e o terminal elétrico não suporta a tensão e se solta. Além disso, o parafuso de fixação que mantém a

extremidade direita imóvel sofre deformação e por pouco também não desprende o sistema. A Figura 4.21 mostra a extremidade depois do ocorrido.



**Figura 4. 21** – Danos causados na estrutura após soltura do *crimp*.

Dessa maneira, é necessário desmontar todo o aparato para fixar o fio nos terminais elétricos e reforçar a estrutura dos trilhos e das patescas. Assim, pode-se ver como o atuador é composto internamente e entendê-lo para melhor utilizá-lo. As Figuras 4.22a e 4.22b mostram o atuador desmontado.



(a)



(b)

**Figura 4. 22** – Atuador desmontado.

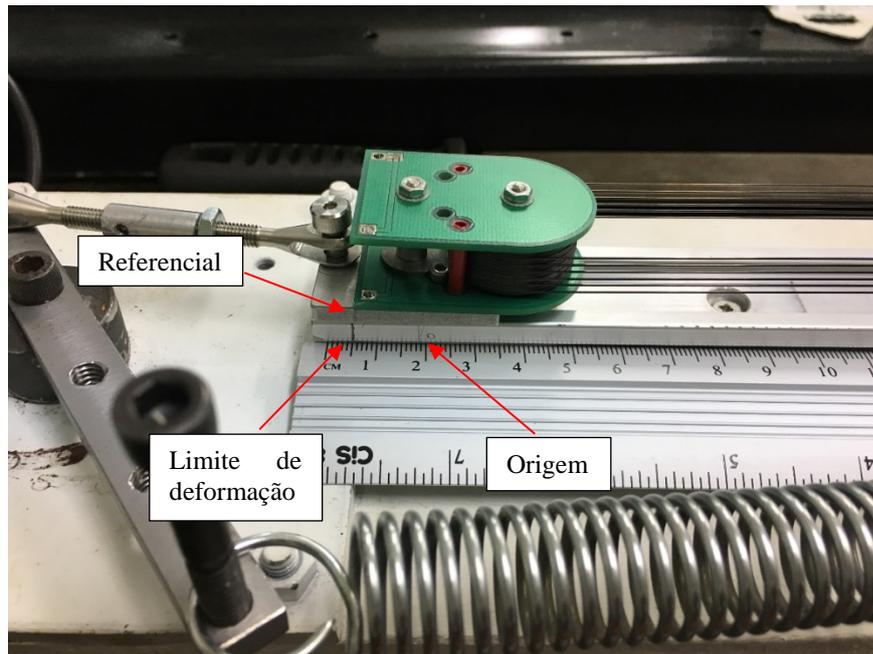
Tendo a estrutura sido reforçada e analisada, e o terminal elétrico do fio refeito, é possível recomeçar os testes. Com o atuador desconectado da mola, são feitas simulações do seu movimento de forma manual, o que permitiu observar que durante a movimentação das patescas para causar a deformação no fio, as roldanas não giram. Sendo assim, a abordagem anteriormente utilizada, de deformar o fio em torno de 5% de seu comprimento total foi descartada e uma nova abordagem, que conta apenas com o comprimento do trecho reto do fio, passa a ser utilizada.

Com a desmontagem, é possível ajustar os parafusos e porcas que prendem as roldanas e verificar o seu funcionamento de forma que não nenhum componente receba um torque maior que o necessário e prenda o sistema, impedindo alguma movimentação. Também é possível verificar a integridade dos eixos e fixadores.

#### 4.6.5 – Nova Abordagem

Como dito anteriormente, para a nova abordagem usada neste projeto, aspectos como a forma usada para causar a deformação inicial do fio e o quanto de deformação será imposta, foram reconsiderados.

A bancada é remontada e o fio aquecido durante alguns segundos até que atingisse seu comprimento original e a menor distância entre os centros das roldanas (253 mm). A deformação a ser causada no fio será então 5% deste valor, totalizando 12,65 mm. Na Figura 4.23 é possível ver a origem, o ponto até onde o mecanismo deve ser levado (Limite de deformação) e um referencial.



**Figura 4. 23** – Montagem da bancada para a nova abordagem.

O ponto referencial é deslocado da origem até o limite de deformação utilizando uma força externa manual, desconhecida para tal. O curso percorrido pela extremidade móvel é de aproximadamente 13,5 mm, mais do que os 5% planejados, porém ainda dentro do limite de 8% de deformação máxima.

Após a deformação, a mola 2 é tracionada até que atinja um comprimento de 89,4 mm. Desta forma,

$$F = k \times x \quad (6)$$

$$F = (1022) \times (89,4 - 54) \quad (7)$$

$$F = 36,18 \text{ N/mm} \approx 3,6 \text{ kgf}$$

Como a haste multiplicadora é usada no terceiro e mais distante furo, a força produzida na outra ponta, que será transmitida ao atuador, será três vezes esse valor. Ou seja, a força a

qual o atuador está sendo submetido equivale a aproximadamente 105,91 N (10,8 kgf). Valor este que se encontra abaixo do limite de forças calculado no tópico 4.6.2, porém não é o valor que deve ser levado em consideração, à princípio. Quando o fio é aquecido e contrai, ele rotaciona a haste e faz com que a mola se deforme ainda mais, produzindo uma força maior que a calculada na Equação 7.

#### 4.6.5.1 – Testes

Com o fio deformado e a mola tracionada, ciclos de aquecimento e resfriamento são realizados a fim de provar a eficácia do atuador. Num primeiro momento, o fio é submetido a um aquecimento com corrente de 1,5 A. Testes posteriores serão realizados usando correntes de 1 e 2A. Os resultados obtidos podem ser vistos no capítulo 5 em mais detalhes.

## Capítulo 5

### Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes envolvendo o aparato com fio de liga de memória de forma.

#### 5.1 – Considerações Iniciais

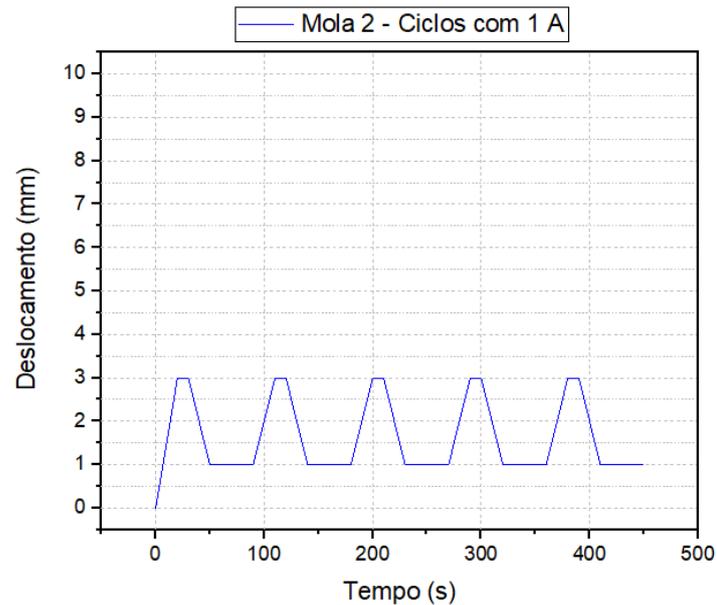
Todos os testes a seguir serão realizados usando a Configuração 3 do atuador e a nova abordagem para a deformação do fio.

Os testes 5, 6 e 7, serão realizados utilizando a mola 2. Os testes 8, 9 e 10, serão feitos com a mola de número 3. A mola de número 1 não será utilizada para a realização dos testes devido ao seu pequeno comprimento, o que limita a força no sistema.

Para todos os experimentos, serão realizados cinco ciclos de aquecimento e resfriamento do fio e observado o comportamento do atuador.

#### 5.2 – Teste 5

O teste de número 5 é realizado usando a Configuração 3 do atuador e a Mola 2, menos rígida. Serão realizados ao todo 5 ciclos de 30 segundos de aquecimento e 60 segundos de resfriamento. A corrente usada para fazer o aquecimento do fio será de 1 A. O gráfico com a curva gerada a partir dos resultados obtidos de deslocamento em cada ciclo pode ser visto na Figura 5.1.



**Figura 5. 1** – Ciclos de Aquecimento e Resfriamento para 1 A.

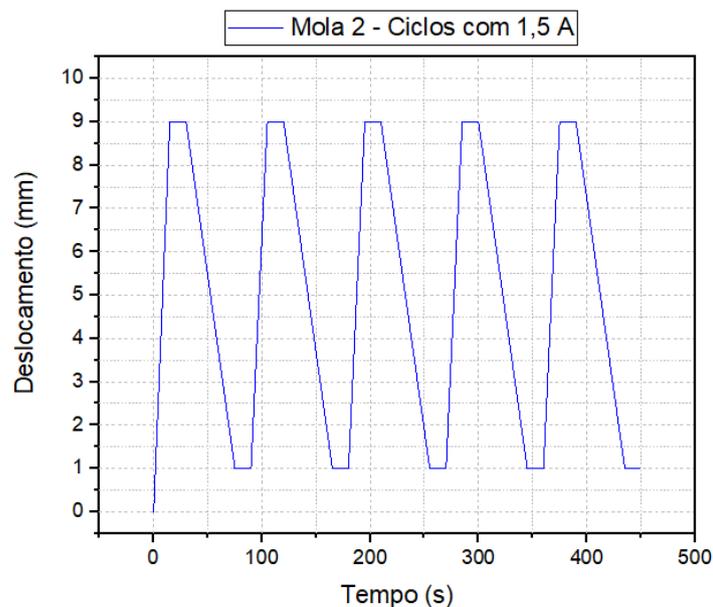
Os dados apresentados no gráfico mostram que o atuador sai de uma origem, atinge um limite máximo de recuperação e retorna até um ponto um pouco antes do original. Em todos os ciclos, o atuador recupera em torno de 2 mm, aproximadamente 15,38 % da deformação inicial aplicada, com exceção do primeiro. Por esta razão, testes com valores maiores de corrente serão realizados a fim de verificar se existe aumento da recuperação com o aumento da corrente e por consequência, da temperatura do fio.

O fio de SMA atinge a sua recuperação máxima em aproximadamente 20 segundos e quando o aquecimento pela passagem de corrente cessa, a mola traciona a extremidade móvel levando-a até um valor próximo do limite de deformação inicialmente imposto, porém, não consegue trazê-lo até o ponto zero no gráfico (ver Figura 5.1). Este fato mostra que 1 A de corrente elétrica é suficiente para elevar a temperatura do fio até um valor entre a temperatura inicial e final de austenitização, não realizando a completa recuperação.

Além disso, o gráfico 5.1 mostra que a mola 2 não consegue fazer com que a extremidade móvel retorne até o ponto inicial de deformação. O que indica que a mola não é adequada ou não foi tracionada suficiente.

### 5.3 – Teste 6

Testes com 1,5 A de corrente elétrica serão efetuados para verificar se o aumento da temperatura no fio causa uma recuperação maior no mesmo. De acordo com as informações do fabricante do fio, a corrente necessária para realizar a completa transformação de fase é de 3 A. Além disso, é importante observar também a velocidade de atuação quando a corrente é aumentada. O gráfico com os ciclos de aquecimento e resfriamento do fio de SMA usando 1,5 A de corrente elétrica pode ser visto na Figura 5.2.



**Figura 5. 2** – Ciclos de Aquecimento e Resfriamento para 1,5 A.

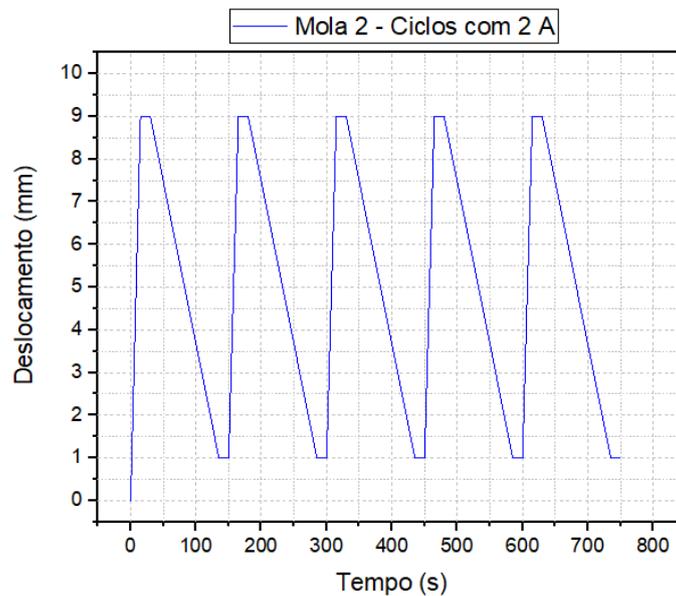
Analogamente ao teste 5, em todos os cinco ciclos realizados, com exceção do primeiro, a extremidade sai do mesmo ponto, atinge um máximo de recuperação e retorna para o mesmo ponto inicial, que não é o ponto de início do experimento.

Com 1,5 A de corrente aplicado, o fio leva em torno de 18,55 segundos para aquecer e se movimentar até o limite máximo de recuperação que se mantém em torno de 8 mm, cerca de 61,53 % da deformação inicial aplicada.

Isso mostra que com o aumento da corrente para 1,5 A, a velocidade de atuação e a recuperação também aumentam. Porém, como a temperatura atingida pelo fio também é maior, em torno de 61 °C, o tempo necessário para que a mola traga a extremidade móvel de volta à posição inicial também aumenta.

#### 5.4 – Teste 7

Utilizando o mesmo princípio que gerou a necessidade de realização do teste 6, será utilizada corrente de 2 A para o Teste 7. Os resultados de deslocamento para cada ciclo são mostrados no gráfico da Figura 5.3.



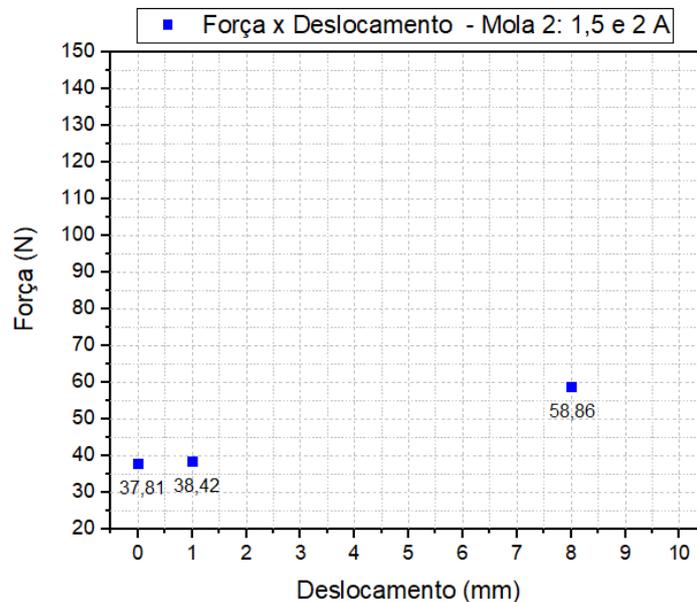
**Figura 5.3** – Ciclos de aquecimento e resfriamento para 2 A.

A Figura 5.3 mostra que nos ciclos realizados com 2 A o atuador é acionado mais rapidamente com o aumento da corrente elétrica. Porém, seu deslocamento se mantém na mesma ordem do deslocamento atingido com 1,5 A, mostrado na Figura 5.2 do Teste 6.

Como fio atinge temperaturas maiores, em torno de  $88^{\circ}\text{C}$ , a mola demora mais tempo para conseguir fazer o fio voltar à posição inicial de deformação. Os ciclos com 2 A foram realizados com 120 segundos de resfriamento, pois a extremidade móvel leva em torno de 105 segundos para atingir a posição de maior deformação novamente.

Dessa forma, para o aumento de corrente de 1,5 A para 2 A, tanto a velocidade de acionamento quanto a de retorno aumentam, embora a recuperação permaneça a mesma.

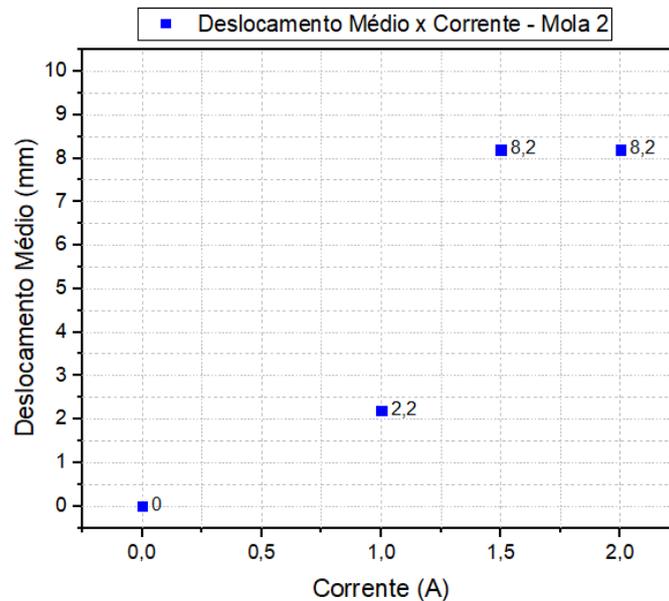
Durante todo o experimento, a extremidade móvel e consequentemente o fio de SMA estão submetidos à força exercida pela mola. O gráfico da Figura 5.4 mostra a força da mola na extremidade mais distante da haste em função do deslocamento realizado pelo conjunto quando o fio é aquecido. Como os deslocamentos para 1,5 e 2 A se mantêm constantes, o gráfico da Figura 5.4 é válido para as duas correntes testadas.



**Figura 5. 4** – Força x Deslocamento para 1,5 e 2 A.

A Figura 5.5 mostra o deslocamento médio atingido para cada valor de corrente elétrica usada nos testes realizados. Note que quando a corrente é aumentada de 1 A para 1,5 A, ocorre um salto na recuperação atingida. Porém, quando aumentada de 1,5 A para 2 A, a recuperação permanece a mesma. Isso mostra que 1,5 A de corrente elétrica é suficiente para elevar a

temperatura do fio até uma temperatura acima da de austenitização final  $A_f$ , para a pré-deformação imposta.



**Figura 5.5** – Deslocamento Médio x Corrente para a Mola 2.

## 5.5 – Teste 8

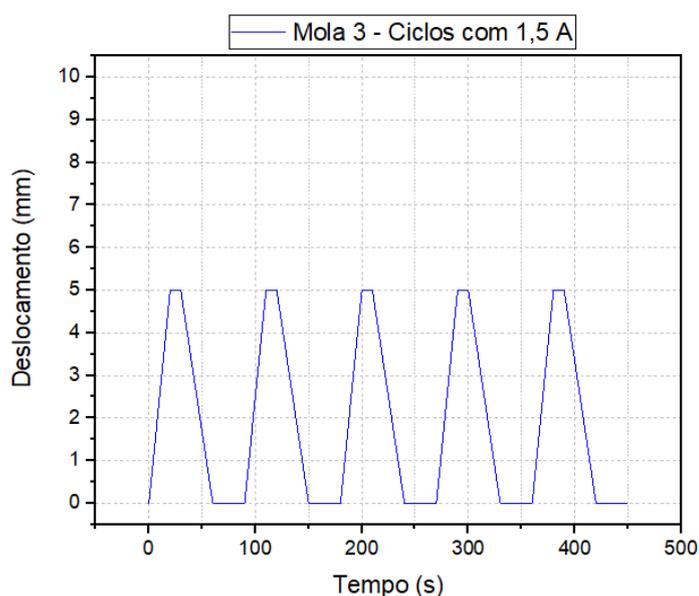
Os testes 8, 9 e 10 serão realizados utilizando a Mola 3.

Para o teste 8, serão realizados ciclos de aquecimento e resfriamento utilizando 1 A de corrente elétrica. O objetivo é observar a influência da rigidez da mola na velocidade de acionamento do atuador. A mola 3 foi pré-carregada efetuando-se uma deformação igual à deformação imposta à mola 2 nos testes 5, 6 e 7.

Com a corrente de 1 A e a Mola 3, não houve acionamento do atuador. A força gerada pela mola foi maior que a força exercida pelo atuador aquecido por efeito Joule com 1 A, o que impossibilitou a atuação do sistema. Desta forma, testes com valores mais altos de corrente devem ser realizados.

## 5.6 – Teste 9

Partindo do mesmo princípio para a realização dos testes com a Mola 2, serão realizados testes com 1,5 A para a Mola 3. Os ciclos de aquecimento e resfriamento podem ser vistos na Figura 5.6.



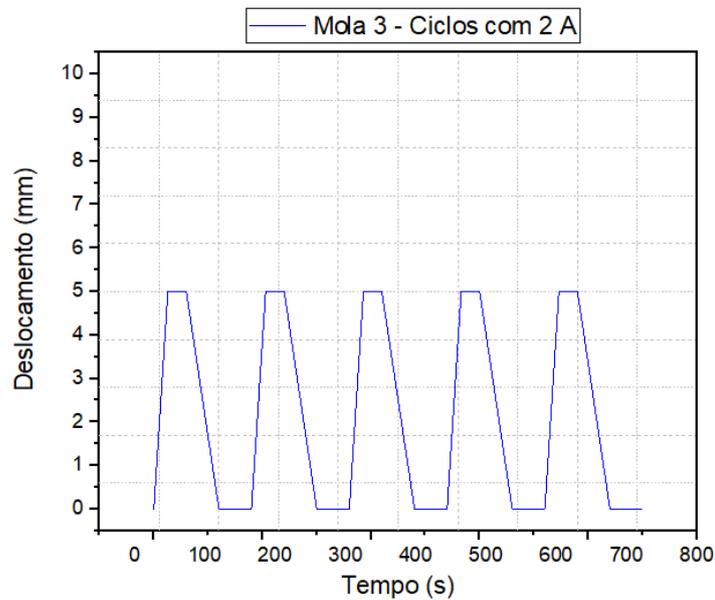
**Figura 5. 6** – Ciclos de aquecimento e resfriamento para 1,5 A.

Analisando o gráfico é possível observar que para todos os cinco ciclos realizados, a extremidade móvel do atuador atinge um limite máximo de recuperação durante o aquecimento e quando resfriado, retorna exatamente para a posição inicial de pré-deformação. Comparando os dados com os obtidos para o mesmo teste utilizando a Mola 2, pode-se perceber que embora a recuperação e deslocamento gerado durante o aquecimento sejam menores, em torno de 38,46% , por conta da maior força produzida pela mola 3, essa mola é capaz de fazer com que a extremidade móvel do atuador retorne à posição inicial, fazendo com que todos os ciclos tenham exatamente o mesmo deslocamento durante todo o experimento.

Comparando com os resultados obtidos para a Mola 2, a Mola 3 se mostra mais adequada ao sistema, uma vez que mantém os deslocamentos constantes durante todos os ciclos realizados, pois garante o retorno completo da extremidade móvel.

### 5.7 – Teste 10

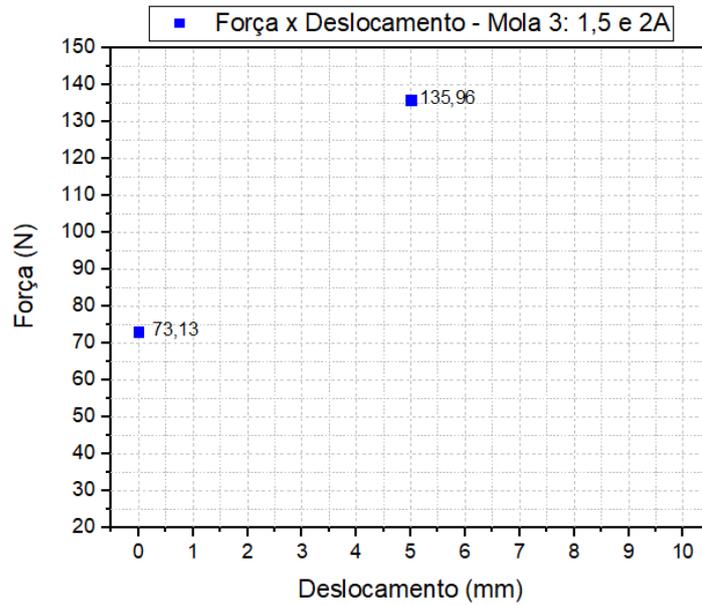
O teste de número 10 foi realizado com 2 A de corrente elétrica e os ciclos de aquecimento e resfriamento podem ser vistos na Figura 5.7.



**Figura 5.7** - Ciclos de aquecimento e resfriamento para 2 A.

De forma análoga aos resultados obtidos com a Mola 2, o deslocamento gerado durante a recuperação do atuador de SMA para 1,5 A e 2 A se mantém constante, aumentando apenas a velocidade de atuação e de retorno da extremidade móvel à posição inicial.

O gráfico da Figura 5.8 mostra as forças desenvolvidas pela Mola 3 para os deslocamentos alcançados pela extremidade móvel do atuador. Como os deslocamentos para as correntes de 1,5 A e 2 A se mantém constantes, as forças para as duas situações também permanecem constantes.



**Figura 5. 8** – Força x Deslocamento para 1,5 e 2 A.

Com finalidade comparativa, o gráfico da Figura 5.9 apresenta os resultados dos deslocamentos médios atingidos em função dos valores de corrente elétrica aplicada no fio para as duas molas. Pode-se perceber que como a Mola 2 oferece menos resistência ao sistema, ela permite recuperações maiores e mais rápidas do fio de SMA para as mesmas correntes usadas nos testes com a Mola 3. Em contrapartida, a Mola 2 não garante o completo retorno à posição inicial, o que certamente é um problema quanto à atuação em válvulas.

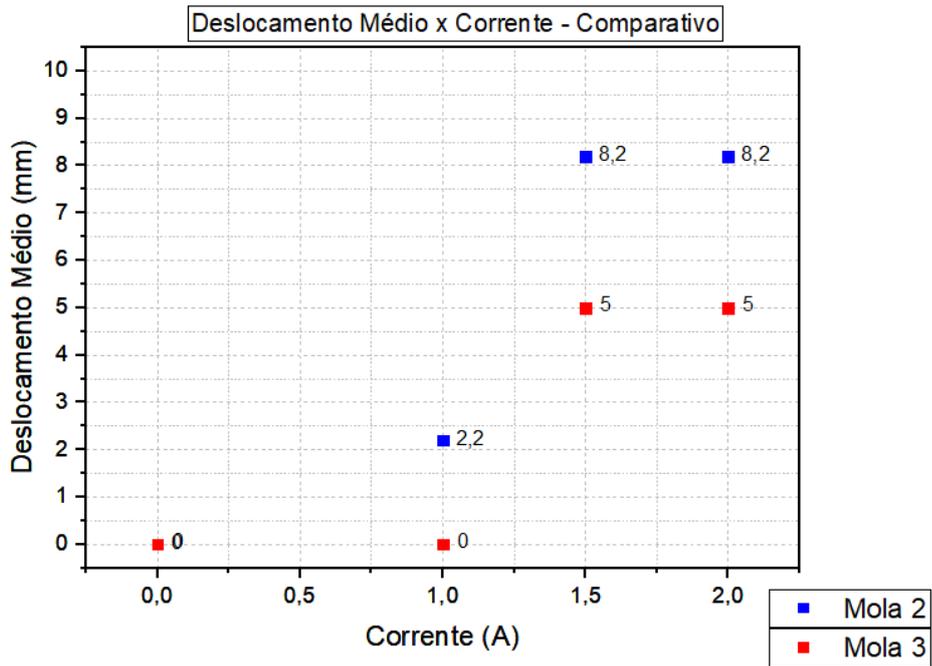


Figura 5. 9 - Deslocamento Médio x Corrente para as Molas 2 e 3.

A Figura 5.10 mostra a comparação entre a força exercida pela mola e as correntes usadas nos testes.

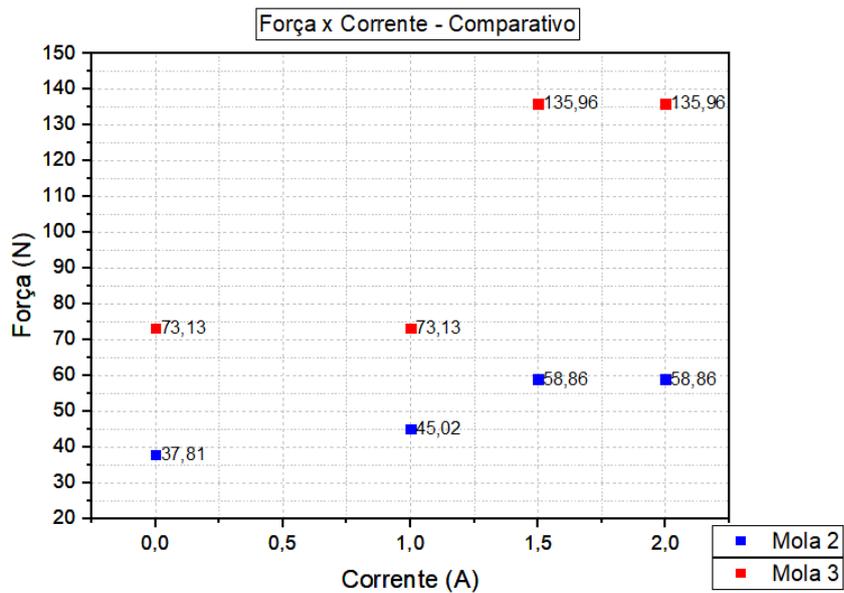


Figura 5. 10 - Gráfico Força x Deslocamento para as Molas 2 e 3.

A Mola 3, mesmo alcançando deslocamentos menores, consegue exercer uma força maior que a Mola 2 para todos os valores de corrente usados.

## 5.8 – Notas e Observações

Durante a realização dos experimentos envolvendo o atuador baseado em ligas de memória de forma, alguns pontos foram observados.

Um dos grandes problemas encontrados durante os experimentos é a solda da extremidade do fio de SMA dos terminais elétricos. Uma crimpagem mal feita pode corromper o sistema de atuação fazendo com que o fio se solte dos terminais depois de um certo número de ciclos submetido à altas cargas de tração.

Com a crescente aplicação dos materiais com memória de forma, conectar o fio de SMA aos outros componentes do sistema é de extrema importância para o desenvolvimento de aplicações. Estudos mostram que o material com memória de forma é difícil de ser unido a outros materiais de uso comum e por este motivo, uniões mecânicas são mais usadas [15].

Para cada um dos testes realizados, contabilizou-se o tempo para o resfriamento do fio. O fio de SMA realiza troca térmica relativamente rápida com o ambiente. Porém, para os testes envolvendo 2 A de corrente elétrica, onde a temperatura atinge valores de até 88°C, o tempo de resfriamento mostrou-se maior do que o apresentado na Tabela 4.3 fornecido pelo fabricante da patesca. Acelerar a troca térmica por meio de convecção forçada seria uma solução para redução do tempo de resfriamento.

## Capítulo 6

### Conclusões

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões do projeto a partir dos experimentos e estudos realizados.

#### 6.1 – Conclusões do Estudo

É notável a crescente aplicação de Ligas com Memória de Forma nos diversos campos da indústria atual. A alta versatilidade do material com propriedades únicas e incomparáveis têm sido estudada e utilizada com sucesso em diversos campos de aplicação. Embora sua utilização requeira conhecimento específico sobre o material, sua empregabilidade e capacidade de substituir sistemas de atuação com alta confiabilidade atrai a atenção para a sua utilização.

Para a utilização de SMA, é necessário que se realize um estudo de caracterização termomecânica a fim de tornar suas características conhecidas para então iniciar o processo de aplicação. O funcionamento do atuador depende do correto entendimento das características do material que podem variar de acordo com os parâmetros utilizados, como temperatura e carregamento mecânico.

Neste estudo, observou-se que quando submetidas correntes até 1,5 A, quanto maior a corrente elétrica imposta ao fio de SMA, para o mesmo carregamento aplicado, maior o deslocamento/ recuperação promovido. Acima de 1,5 A, para a pré - deformação efetuada neste projeto, a taxa de recuperação se mantém fixa.

Também é possível observar que as rigidezes das molas utilizadas nos experimentos influenciam diretamente na velocidade de atuação do aparato, devido à magnitude da força que exercem no sistema. Quanto maior a pré-carga na mola, menor o deslocamento da extremidade,

para o mesmo valor de corrente usada. Os resultados mostraram boa capacidade de recuperação para a Mola 2, em torno de 61,53 % e de 38,46 % para a Mola 3.

O atuador em questão produz pequenos deslocamentos quando levado em consideração o comprimento de fio utilizado e não foi capaz de desenvolver o curso necessário de aproximadamente 38 mm, para a atuação de uma válvula *2-way* e girar a haste em 90°. Melhorias no aparato, como aumento do comprimento do trilho para desenvolver maiores deformações e conseqüentemente maiores deslocamentos devem ser feitos em estudos futuros de forma a atingir o curso desejado para a completa atuação de uma válvula com acionamento rotativo.

Todavia, o atuador estudado mostrou o quão eficiente um sistema de patescas pode ser quando se deseja multiplicar as forças. A configuração utilizada mostrou que sua capacidade de gerar forças é alta, chegando a produzir um torque de 10,99 N.m, valor bem próximos dos valores de torque fornecidos por atuadores elétricos comerciais e apresentados no capítulo 3. Conclui-se então que o sistema de patescas é ideal quando se deseja produzir valores consideráveis de força em pequenos deslocamentos.

O atuador com liga de memória de forma, mesmo com a necessidade de ajustes, ocupa um volume equivalente a 70% e pesa 28% do atuador elétrico comercial estudado. Dessa forma, ainda é possível ter uma margem considerável para os ajustes para que se obtenha os deslocamentos necessários para a atuação da válvula esfera comercial.

Além disso, a característica apresentada durante os testes com a Mola 3, mostrou que o fio de SMA pode já ter passado por um “treinamento”, quando ao final de cada ciclo não foram observadas mudanças irreversíveis e permanentes que causam modificações macroscópicas no material ao final de cada carregamento [15].

## 6.2 – Sugestões para Estudos Futuros

Durante o estudo realizado, algumas limitações impediram que os dados do atuador fossem colhidos da melhor e mais precisa forma. Neste tópico, serão apresentadas sugestões para que em estudos futuros, sejam implementadas melhorias no aparato experimental e na aquisição de dados.

Para este projeto, instrumentos de medição com pouca precisão foram utilizados. Como sugestão, a utilização de instrumentos calibrados e precisos para a medição dos deslocamentos e temperatura trará mais confiabilidade e precisão nos resultados.

Além disso, a utilização de uma célula de carga com sistema de aquisição de dados se faz válida, uma vez que neste projeto, as forças envolvidas no sistema foram calculadas de acordo com o deslocamento desenvolvido pelas molas e também baseado nos dados do fabricante do fio de SMA.

Se faz interessante a realização de modificações na base, aumentando o trilho por onde desliza a extremidade móvel do atuador, a fim de estudar o comportamento do atuador com deslocamento máximo. Reforçar os elementos de fixação envolvidos também é outro ponto que deve ser ressaltado.

## Referências Bibliográficas

1. LAGOUDAS, D.C., 2008. **Shape Memory Alloys: Modeling and engineering Applications**. Springer, New York, NY, USA.
2. MOHD JANI, Jaronie; *et al.* **A review of shape memory alloy research, applications and opportunities**. Available online 17 December 2013.
3. MEGNIN, C., KOHL, M., 2014, **Shape Memory Alloy Microvalves for a Fluidic Control System**, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol 24, pp 1 -10.
4. CZECHOWICZ, Alexander; LANGBEIN, Sven, 2015. **Shape Memory Alloy Valves**. Springer, Switzerland, SWI.
5. NALBACH, Sophie; MOTZKI, Paul; SEELECKE, Stefan, 2015. **SMA-Based Hydraulic Switching Valve**, Proceedings of ASME 2015 Conference on Smart Materials, Colorado, USA.
6. H. WU, Ming; McD SCHETKY, L., 2000. **Industrial Applications for Shape Memory Alloys**, Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California, P.171-182.
7. SUN, L.; M. HUANG, W; DING, Z. *et al*, 2011. **Stimulus-responsive Shape Memory materials: A Review**, Elsevier, Available online 8 May 2011, P. 577-640.
8. TERÇO, H; MATOS, F. **Acionamento Inteligente de Válvula Offshore por Liga com Memória de Forma**. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2018.
9. SONG, G.; PATIL, D.; KOCUREK, C. *et al*, 2010. **Applications of Shape Memory Alloys in Offshore Oil and Gas Industry: A Review**. Earth and Space 2010:

- Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, ASCE, P. 1551- 1567.
10. Bloch, Joseph T., inventor, The Boeing Company, Assignee. **Rotary Actuator Utilizing a Shape Memory Alloy**. United States Patent US 4 761 955. Jul. 16, 1987.
  11. Swagelok Catalog. **One-Piece Instrumentation Ball Valves**. Disponível em: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-02-331.pdf>. Acesso em: 20/10/2018.
  12. Giacomel, Jeffrey A., inventor. **Shape Memory Alloy Actuator**. United States Patent 5 816 306. Oct. 6,1998.
  13. Swagelok Catalog. **Electric Actuators 141 and 142 Series**. Disponível em: <https://www.swagelok.com/downloads/WebCatalogs/EN/MS-01-35-E.pdf>. Acesso em: 04/11/2018.
  14. Swagelok Catalog. **Swagelok Ball Valve Actuation Options**. Disponível em: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/EN/MS-02-343.PDF>. Acesso em: 04/11/2018.
  15. RAO, A., SRINIVASA, A., REDDY, J. **Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators**. Springer, 2015.
  16. LACERDA, J; DAMIÃO, M; AI, R. **Desenvolvimento de uma Válvula Inteligente Utilizando Materiais com Memória de Forma como Atuação**. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2015.
  17. FOGOROS, R. **The Problem with Using Stents**. Disponível em: <https://www.verywellhealth.com/the-problem-with-stents-1745935>. Acesso em: 08/06/2018.

**18. Monostable Shape Memory Alloy Microvalves.** Disponível em:  
<http://www.imt.kit.edu/877.php>. Acesso em: 05/06/2018.