

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

**Desenvolvimento de uma válvula inteligente  
utilizando materiais com memória de forma  
como atuação**

Julio Cesar Lacerda  
Mateus Brandão Damiano  
Rodrigo de Almeida Ai

Prof. Orientador: Luciana Loureiro da Silva Monteiro  
Prof. Co-orientador: Pedro Manuel Calas Pacheco

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2015**

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

**Desenvolvimento de uma válvula inteligente  
utilizando materiais com memória de forma  
como atuação**

Julio Cesar Lacerda  
Mateus Brandão Damião  
Rodrigo de Almeida Ai

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: Luciana Loureiro da Silva Monteiro  
Prof. Co-orientador: Pedro Manuel Calas Pacheco

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2015**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S586 Lacerda, Julio Cesar  
Desenvolvimento de uma válvula inteligente utilizando materiais  
com memória de forma como atuação / Julio Cesar Lacerda,  
Mateus Brandão Damião [e] Rodrigo de Almeida Ai.—2015.  
72f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.

Bibliografia : f. 70-72

Orientadora : Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Coorientador : Pedro Manuel Calas Pacheco

1. Engenharia mecânica. 2. Ligas com memória de forma. 3.  
Atuadores. 4. Método dos elementos finitos. I. Damião, Mateus  
Brandão. II. Ai, Rodrigo de Almeida. III. Monteiro, Luciana Loureiro  
da Silva (Orient.). IV. Pacheco, Pedro Manuel Calas (Coorient.). V.  
Título.

CDD 621

## RESUMO

A utilização dos chamados materiais inteligentes tem crescido consideravelmente nos últimos anos, ocupando um importante espaço nos projetos de sistemas mecânicos. As Ligas com Memória de Forma, SMAs, do inglês *Shape Memory Alloys*, vêm sendo usadas para o acionamento de dispositivos de controle em diferentes aplicações.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma válvula para controle de fluxo, fazendo uso de fios SMA, como atuador.

Simulações numéricas e experimentais foram realizadas para prever o comportamento dos fios de SMA a serem instalados na válvula.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Atuadores, Materiais Inteligentes.

## **ABSTRACT**

The use of so-called smart materials has grown considerably in recent years, occupying an important place in the mechanical system designs.

Shape Memory Alloys, SMAs, have been used for drive control devices in different applications.

The objective of this study was to develop a valve for flow control, making use of Shape Memory Alloy wires, SMA wires.

Numerical and experimental simulations were performed to predict the behavior of shape memory wires to be installed in the valve.

**Keywords:** Shape Memory Alloys, Actuators, Smart Materials

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de agradecer a Deus, aos nossos familiares, amigos, colegas de curso e aos nossos orientadores pela ajuda e suporte na conclusão desta importante fase de nossas vidas. Nosso muito obrigado.

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1</b> .....	7
<b>Introdução</b> .....	7
1.1 Motivação .....	7
1.2. Objetivos .....	8
1.3. Organização do Trabalho .....	8
<b>Capítulo 2</b> .....	9
<b>Ligas de Memórias de Forma</b> .....	9
2.1. Comportamento da estrutura cristalina .....	9
2.2. Efeitos da liga .....	11
2.2.1. Efeito de memória de forma.....	11
2.2.2. Efeito de Pseudoelasticidade.....	13
<b>Capítulo 3</b> .....	15
<b>Aplicações de Ligas com Memória de Forma</b> .....	15
3.1. Atuadores de válvulas .....	15
3.2. Atuadores na indústria .....	22
3.2.1 Aeronáutica .....	22
3.2.2. Robótica .....	23
3.2.3. Médica.....	24
3.3. Outras aplicações .....	25
<b>Capítulo 4</b> .....	26
<b>Modelo Numérico</b> .....	26
4.1 Introdução .....	26
4.1.1. Descrição do modelo constitutivo de memória de forma.....	26
4.1.2. Desenvolvimento do modelo numérico baseado no método de elementos finitos... 30	
<b>Capítulo 5</b> .....	33
<b>Metodologia</b> .....	33
5.1. Fio SMA utilizado.....	33
5.2. Descrição do Aparato utilizado para a Caracterização .....	35

5.3. Descrição dos Ensaios Experimentais.....	37
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>41</b>
<b>Resultados.....</b>	<b>41</b>
6.1. Memória de forma <i>one-way</i> .....	41
6.2. Memória de forma com Tensão Assistida (Constante).....	44
6.3. Memória de forma com Tensão Assistida (variável).....	50
<b>Capítulo 7.....</b>	<b>53</b>
<b>Concepção de Atuação da Válvula.....</b>	<b>53</b>
7.1. Geometria da válvula.....	53
7.2. Sistema de vedação.....	58
7.3. Processo de montagem.....	59
7.4. Princípio de funcionamento do atuador inteligente.....	62
7.5. Cálculo da Força de uma Válvula com Atuador SMA.....	63
7.5.1. Deformação Inicial da Mola.....	66
7.5.2. Cálculo da Força de Arrasto.....	67
<b>Capítulo 8.....</b>	<b>69</b>
<b>Conclusões.....</b>	<b>69</b>
<b>Capítulo 9.....</b>	<b>70</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>70</b>



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Deformação da estrutura cristalina em uma liga de memória de forma.....	10
FIGURA 2: (a) Temperaturas de transformações de fase e (b) Evolução da fração volumétrica de martensita em função da temperatura. ....	11
FIGURA 3: Efeito de memória de forma. ....	12
FIGURA 4: Efeito de memória de forma com tensão assistida. ....	13
FIGURA 5: Curva Tensão-Deformação pseudoelástica. ....	14
FIGURA 6: Atuador SMA linear simples (Huang, 2002). ....	16
FIGURA 7: Tipos básicos de atuadores SMA (Huang, 2002).....	16
FIGURA 8: Carga constante x deslocamento da liga NiTi resfriada e aquecida. ....	17
FIGURA 9: Carga constante atuando na mola SMA.....	17
FIGURA 10: Força externa x deslocamento em liga SMA fria e quente. ....	18
FIGURA 11: Força externa atuando junto com a mola SMA.....	18
FIGURA 12: Mola de compressão SMA.....	19
FIGURA 13: válvula de transmissão atuada SMA. ....	19
FIGURA 14: Válvula de desvio aberta (www.jagg.com). ....	20
FIGURA 15: Válvula de desvio fechada (www.jagg.com.br). ....	20
FIGURA 16: válvula gaveta atuada SMA. ....	21
FIGURA 17: Micro atuador SMA. ....	21
FIGURA 18: Modelo básico de uma asa de avião com flap.....	23
FIGURA 19: Flap com fios de SMA. ....	23
FIGURA 20: Mecanismo de um braço mecânico acionado por SMA.....	24
FIGURA 21: Filtro de Simon. Evolução da sua forma durante o aquecimento(Fernandes, 2003).....	24
FIGURA 22: Dispositivo tipo “garra” (Chaitanya & Dhanalakshmi ,2014). ....	25
FIGURA 23: Modelo de elementos finitos para o atuador fio SMA acoplado com mola convencional.....	32
FIGURA 24: Temperatura x Deformação. ....	34
FIGURA 25: HBM Spider8 .....	35

FIGURA 26: Transdutor de Posição GEFRAN, modelo PY2-F-25-S. ....	36
FIGURA 27: Fonte de Alimentação HY3003E-3. ....	36
FIGURA 28: Diagrama esquemático simplificado do aparato experimental com tensão assistida SATWME. ....	37
FIGURA 29: Aparato com mola conectada ao fio SMA. ....	39
FIGURA 30: Desenho esquemático do teste durante um ciclo térmico. ....	40
FIGURA 31: Comparação numérico-experimental. (a) carregamento mecânico em função do tempo e (b) corrente elétrica em função do tempo. ....	41
FIGURA 32: Comparação numérico-experimental da curva tensão x deformação. ....	42
FIGURA 33: Temperatura estimada numericamente em função do tempo. ....	42
FIGURA 34: Evolução da temperatura e deformação em função do tempo. ....	43
FIGURA 35: Evolução das frações volumétricas em função do tempo. ....	43
FIGURA 36: Evolução temporal dos carregamentos mecânico e elétrico. ....	44
FIGURA 37: Evolução temporal da deformação e corrente elétrica. ....	44
FIGURA 38: Evolução temporal da deformação (numérica e experimental). ....	45
FIGURA 39: Evolução temporal da temperatura. ....	45
FIGURA 40: Comparação numérico-experimental. (a) carregamento mecânico em função do tempo e (b) corrente elétrica em função do tempo. ....	46
FIGURA 41: Evolução temporal da deformação. ....	46
FIGURA 42: Evolução temporal da temperatura. ....	47
FIGURA 43: tensão x deformação x temperatura. ....	47
FIGURA 44: Comparação numérico-experimental. (a) carregamento mecânico em função do tempo e (b) corrente elétrica em função do tempo. ....	48
FIGURA 45: Evolução temporal da deformação. ....	48
FIGURA 46: Evolução temporal da temperatura. ....	49
FIGURA 47: Comparação entre todos os resultados obtidos com diferentes valores de carga mecânica (constante ao longo do ensaio) e corrente elétrica. ....	49
FIGURA 48: Resultados de força, corrente e deformação em função do tempo para ensaios com a mola com constante elástica de 708,9 N/m para testes realizados com (a) 1A, (b) 1,5A e (c) 2,0A. ....	51
FIGURA 49: Comparação entre os resultados com diferentes molas obtidos com diferentes valores de corrente elétrica. ....	52
FIGURA 50: Montagem da válvula com fio SMA e mola elástica (Fonte: autor). ....	54

FIGURA 51: Pistão vazado com cavas para passagem de fluido (Fonte: autor). .....	54
FIGURA 52: Vista em corte do pistão vazado dentro do cilindro da válvula (Fonte: autor). ....	55
FIGURA 53: Detalhe das 4 hastes expostas que transferem força para o pistão (Fonte: autor). 56	
FIGURA 54: Camisa da válvula com as cavas para as hastes (Fonte: autor). .....	56
FIGURA 55: Detalhe das roldanas de nylon que suportam os fios de memória de forma (Fonte: autor).....	57
FIGURA 56: Flange de união entre válvula e tubulação (Fonte: autor). .....	57
FIGURA 57: Vista em corte dos O’rings que garantem vedação dinâmica (Fonte: autor). .....	58
FIGURA 58: Detalhes dos O’rings que garantem vedação no fechamento da válvula (Fonte: autor).....	58
FIGURA 59: Vista em corte da camisa mostrando a base em ângulo (Fonte: autor). .....	59
FIGURA 60: Locais onde deve ser encaixados os O’rings (Fonte: autor). .....	60
FIGURA 61: Encaixe do pistão com os o’ rings na camisa (Fonte: autor). .....	60
FIGURA 62: Detalhe da cava da camisa alinhado com o furo da haste do pistão (Fonte: autor).....	61
FIGURA 63: Detalhe do flange e da válvula unidos com um O’ring (Fonte: autor). .....	61
FIGURA 64: Válvula pré montada (Fonte: autor). .....	62
FIGURA 65: Diagrama simplificado da atuação do sistema fio SMA-mola convencional. ....	63
FIGURA 66: Pistão Vazado (Fonte: autor).....	64
FIGURA 67: Gráfico Alongamento x força do sistema Fio SMA conectado a mola 2.....	65
FIGURA 68: Força, corrente e deslocamento do Fio SMA conectado a mola 2.....	66
FIGURA 69: Curva tensão deformação da Mola 2.....	66

## LISTA DE TABELA

TABELA 1: Parâmetros usados no modelo .....	30
TABELA 2 - Especificação do Fio de NiTi utilizado no projeto, segundo fabricante. (Fonte: <a href="http://www.dynalloy.com">http://www.dynalloy.com</a> ). .....	34
TABELA 3: Massas usadas na calibração da Célula de Carga.....	35
TABELA 4: Resultados na calibração da Célula de Carga.....	36
TABELA 5: Condições dos experimentos.....	39
TABELA 6: Detalhes das molas utilizadas.....	40

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A utilização dos chamados materiais inteligentes tem crescido consideravelmente nos últimos anos, ocupando um importante espaço no projeto de sistemas mecânicos. Esta classe de materiais, usualmente utilizada como sensores e atuadores nos chamados sistemas inteligentes, possui características adaptativas, modificando sua forma ou propriedade físicas a partir da imposição de um campo elétrico, magnético, temperatura ou carregamentos mecânicos.

O termo ligas com memória de forma (do inglês *Shape Memory Alloy* - SMA) é aplicado ao grupo de materiais metálicos que demonstram a habilidade de recuperar sua forma original mesmo após sofrerem deformações relativamente grandes, como imposição de um campo de temperatura e/ou de tensões, através de transformações de fase induzidas no material.

O sucesso da aplicação de materiais inteligentes no acionamento de dispositivos faz com que novas possibilidades se abram para utilização nas mais diversas áreas. Com as descobertas de reservas no pré-sal, as distâncias entre plataformas e poços se tornam cada vez maiores devido as grandes profundidades dos novos poços. Este, por exemplo, é um cenário bastante atraente para a utilização de materiais inteligentes, já que o acionamento de válvulas convencionais em grandes distâncias gera uma série de problemas que devem ser levados em consideração, como atraso de resposta e falhas nos cabos de controle elétricos ou hidráulicos.

Neste trabalho, propõe-se desenvolver um modelo de válvula com atuação inteligente utilizando ligas com memória de forma para controle de fluxo.

## 1.2. Objetivos

O trabalho ora proposto tem como objetivo o desenvolvimento de um conceito de atuação inteligente utilizando ligas com memória de forma visando o projeto de uma válvula para controle de fluxo. Para este fim, será realizado um estudo numérico-experimental do dispositivo que tem a função de restringir a vazão e manipular a queda de pressão através de um mecanismo de estrangulamento.

## 1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos. Após esta introdução, o segundo capítulo faz uma descrição fenomenológica do comportamento termomecânico das SMAs.

Em seguida, o capítulo 3 apresenta as diversas aplicações das ligas, bem como uma revisão da literatura sobre estes dispositivos, procurando identificar e estudar novas concepções que utilizam materiais inteligentes como atuadores.

No capítulo 4 é feita a descrição do modelo constitutivo capaz de capturar o comportamento termomecânico das SMAs utilizado para fazer a correlação numérico-experimental e em seguida o modelo numérico baseado em elementos finitos utilizando o software comercial Abaqus para a simulação do princípio de atuação utilizado no projeto da válvula.

No capítulo 5 é feita a descrição da metodologia utilizada no projeto mostrando os testes experimentais.

No capítulo 6 são apresentados resultados obtidos experimentais e de correlação numérico experimental através da modelagem de um fio de SMA por meio da validação do modelo provenientes de resultados experimentais disponíveis na literatura. No capítulo 7 é feita a descrição do projeto mostrando a concepção de atuação da válvula.

Por fim, no capítulo 8 mostra-se as conclusões e será indicada a proposta final para a sequência do trabalho em questão, que será a execução dos experimentos, fabricação e testes de atuação.

## Capítulo 2

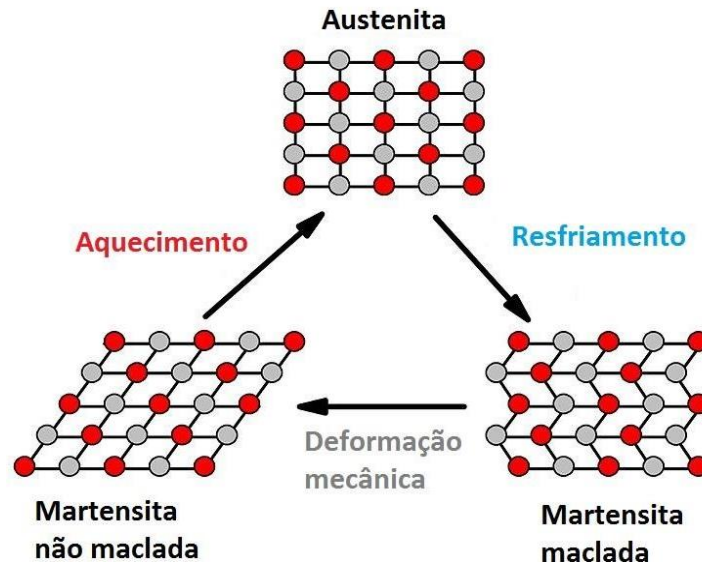
### Ligas de Memórias de Forma

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

#### 2.1. Comportamento da estrutura cristalina

Diferentemente das ligas de Fe-C, que na fase martensítica possui uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) e na fase austenítica, cubica de face centrada (CFC), onde o carbono precisa migrar dentro da estrutura. Nas ligas de memória de forma não existe migração de átomos na microestrutura, a transformação ocorre apenas pela reorganização dos átomos. Isso faz com que esse efeito nas ligas SMA não dependam do tempo, apenas de um estímulo termomecânico adequado. Estes estímulos podem resultar em uma estrutura de martensita maclada, quando induzida por temperatura, e a não maclada, induzida por tensão (trativa ou compressiva). Com o aumento da temperatura, retornamos à forma cubica de face centrada, fase austenítica.

O comportamento da estrutura cristalina em relação aos estímulos termomecânicos pode ser definido pela sequência mostrada em Figura 1.

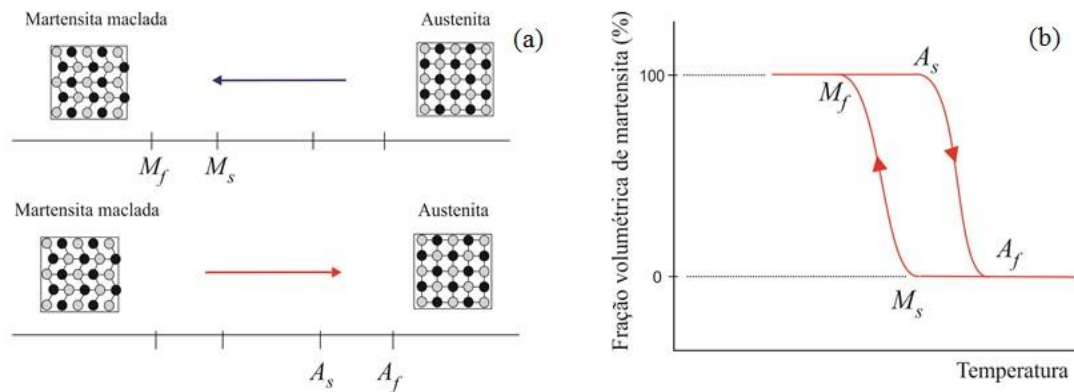


**Figura 1:** Deformação da estrutura cristalina em uma liga de memória de forma.

As transformações de fase podem ser caracterizadas utilizando-se as temperaturas em que o processo de mudança na estrutura cristalina do material inicia e termina, livre de tensões. Definindo-se:  $A_s$ , temperatura a partir da qual começa a transformação  $M \rightarrow A$ ;  $A_f$ , temperatura em que termina a transformação  $M \rightarrow A$ ;  $M_s$ , temperatura em que inicia a transformação inversa  $A \rightarrow M$ ; e  $M_f$ , temperatura em que termina a transformação  $A \rightarrow M$ .

Vale lembrar que se o material estiver em uma temperatura acima de  $A_f$  sem a presença de carga, ele é completamente austenítico. Da mesma forma, se o mesmo se encontrar em uma temperatura abaixo de  $M_f$ , mesmo com a presença de carga, ele é completamente martensítico. Estes processos podem ser vistos na Figura 2.





**Figura 2:** (a) Temperaturas de transformações de fase e (b) Evolução da fração volumétrica de martensita em função da temperatura.

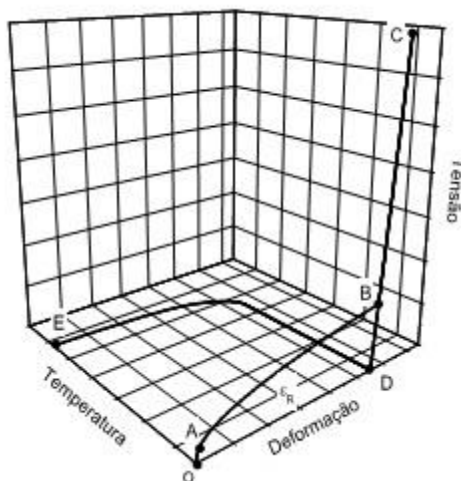
Diferentes fenômenos termomecânicos podem ser observados nestes materiais, apresenta-se agora os principais efeitos.

## 2.2. Efeitos da liga

### 2.2.1. Efeito de memória de forma

Vamos inicialmente considerar uma amostra de SMA com sua estrutura martensítica, obtida a partir do resfriamento da mesma a uma temperatura inferior a  $M_f$ . Com a aplicação de um carregamento mecânico obtém-se, inicialmente, uma resposta elástica vista no segmento OA, até que a tensão crítica de transformação de fase seja alcançada. Ocorre, então, o processo de reorientação da martensita resultando na variante martensítica associada a tensão, trecho AB, a partir da qual o material volta a se comportar elasticamente até a amostra ser descarregada em CD. Para retornar a geometria original da amostra, é necessário aquecê-la a uma temperatura superior a  $A_f$  trecho DE, promovendo, assim, a recuperação da deformação residual induzida por tensão, como mostra a Figura 3. Tipicamente, deformações de até 8% ou até mesmo de 11% podem ser recuperadas.

Esta “lembrança”, que estes materiais apresentam, é resultado das transformações martensíticas termoelásticas. Elas são fenômenos independentes do tempo, mas que dependem da temperatura e que demonstram forte reversibilidade (Wayman & Duerig, 1990).

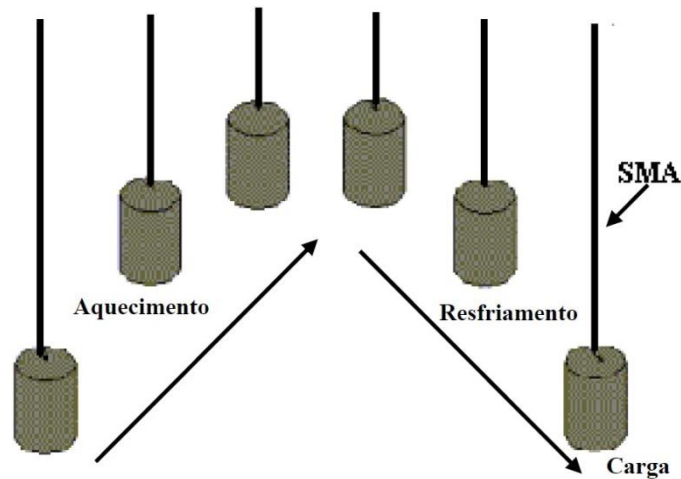


**Figura 3:** Efeito de memória de forma.

Esta transformação ocorre dentro de uma escala das temperaturas que variam de acordo com as propriedades químicas de cada liga (Rogers, 1993).

Outra forma de ativação muito utilizada em dispositivos, que pode ser realizada somente através de ciclos de aquecimento/resfriamento, se baseia no efeito de memória de forma com tensão assistida, ou SATWME, do inglês *Stress Assisted Two Way Memory Effect*.

Este, por sua vez, consiste em um efeito de memória de forma reversível, porém sem estar livre de tensão. Um exemplo simples pode ser visto na Figura 4 e ocorre da seguinte forma: O fio SMA na fase martensítica é sujeito a uma carga constante, o que induz o aparecimento da variante martensítica não-maclada além de apresentar uma deformação residual. Ao aquecer o fio a uma temperatura acima de  $A_f$ , o fio sofre a transformação de fase para austenita, o que provoca a diminuição de seu comprimento e consequentemente a atuação desejada. Quando o fio é resfriado, ao invés de retornar à sua fase martensítica com variante maclada (efeito de memória de forma), o mesmo retorna à variante induzida por tensão (não-maclada) se deformando. Como consequência, a atuação é obtida realizando somente ciclos térmicos.



**Figura 4:** Efeito de memória de forma com tensão assistida.

### 2.2.2. Efeito de Pseudoelasticidade

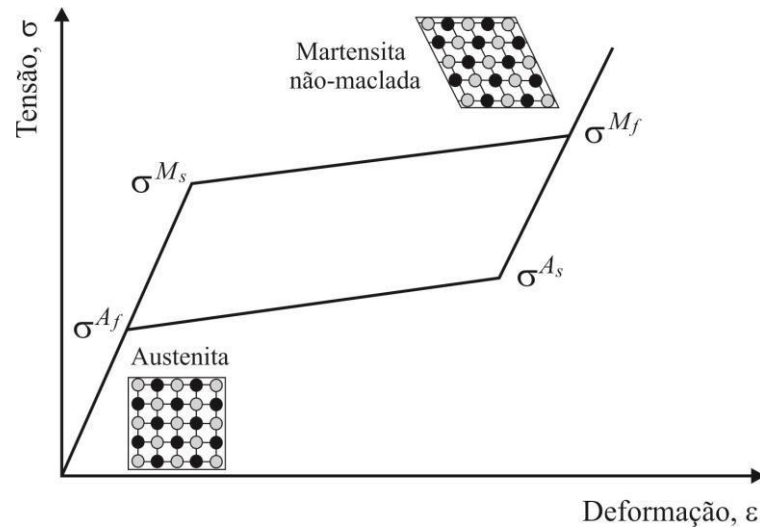
A pseudoelasticidade pode ser vista em SMAs a uma temperatura superior a  $A_f$ , ao aplicarmos um carregamento mecânico onde suas deformações são provenientes de transformações martensíticas induzidas por tensão e por reorientação da estrutura cristalina. Numa configuração livre de tensões, apenas a austenita é termodinamicamente estável acima de  $A_f$ , logo a martensita formada, na ausência de tensões, é instável. (Delaey et al., 1974).

Esta característica das SMAs tem forte dependência em relação às temperaturas características de transformação.

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

A Figura 5 mostra o efeito pseudoelástico. Ao submeter o material a uma tração mecânica, observa-se um comportamento elástico até uma determinada tensão ( $\sigma^{Ms}$ ). A partir daí observa-se uma deformação relativamente elevada com pequena variação da tensão, após atingir  $\sigma^{Mf}$  o material volta a se comportar de modo elástico. Ao retirar a carga da liga, retorna ao seu estado inicial, percorrendo uma histerese atingindo as tensões

críticas  $\sigma^{As}$  e  $\sigma^{Af}$ , respectivamente. A área delimitada pela histerese expressa a densidade de energia dissipada durante o processo e a deformação resultante pela aplicação da carga é recuperada com o descarregamento.



**Figura 5:** Curva Tensão-Deformação pseudoelástica.

Segundo Paiva, 2004, é importante ressaltar que existe um limite para a recuperação dessas deformações. Este limite é representado pelo limite elástico da fase obtida após a transformação, a partir de onde o material passa a se deformar plasticamente e essa deformação pode não ser mais recuperada.

## Capítulo 3

### Aplicações de Ligas com Memória de Forma

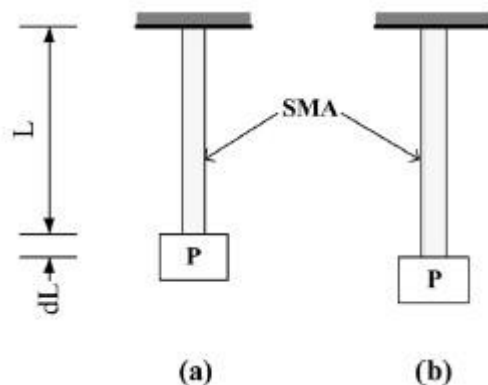
As ligas com memória de forma são úteis em diversas situações quando trabalham como atuadores, alterando a forma, rigidez, posição, frequência natural, e outras características mecânicas, em resposta a temperatura ou tensão. O potencial dessas ligas na condição de atuadores vem sendo ampliado em diversas áreas científicas, como por exemplo, em sistemas eletromecânicos, controle de vibrações, indústria civil, aeronáutica e também na medicina. (Aquino,2011)

O comportamento ímpar das ligas de NiTi no que se refere as suas características termomecânicas permitiram um avanço das mais variadas tecnologias. Hoje em dia essas ligas têm aplicações bem sucedidas nas mais diversas áreas. Neste capítulo são apresentadas uma revisão bibliográfica sobre sua aplicação em diversas áreas principalmente como atuadores de válvulas.

#### 3.1. Atuadores de válvulas

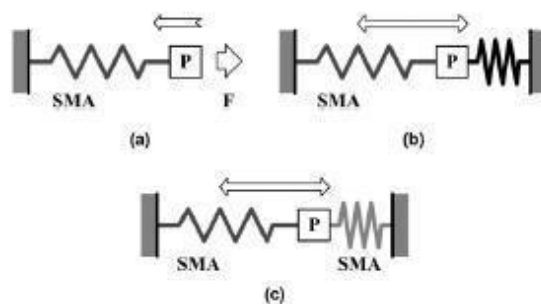
Atuadores convencionais tais como motores hidráulicos e pneumáticos promovem grandes perdas de energia, têm grande volume e pesadas massas para o sistema de atuação. Novas tecnologias e materias estão atraindo atenção para que se desenvolvam sistema mais leves e com grande poder de atuação. (Mavroidis,2007)

Com base neste cenário, as ligas SMA conquistam seu lugar no desenvolvimento de válvulas com uma atuação mais suave, capacidade e espaço físico. Huang, 2002, apresentou os tipos básicos de atuadores SMA em seu trabalho. A figura 6(a) mostra um fio SMA a alta temperatura em seu comprimento normal enquanto a figura 6(b) a baixa temperatura, com o fio tensionado e deformado dL.



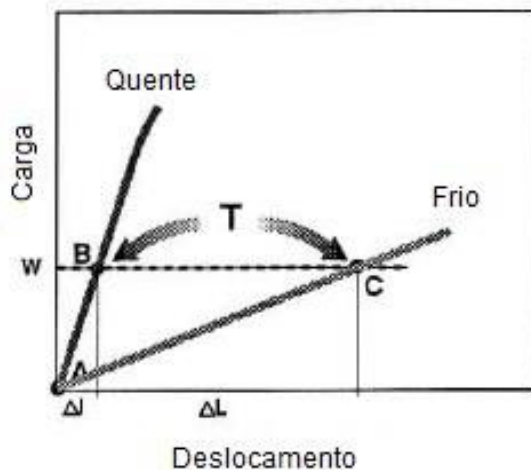
**Figura 6:** Atuador SMA linear simples (Huang, 2002).

A figura 7 ilustra alguns tipos de atuação. Figura 7(a) atuador do tipo one-way, a figura 7(b) com a presença de uma mola elástica e a figura 7(c) apresenta um atuador antagônico com elementos SMA. Os dois últimos são conhecidos como atuadores two-way.

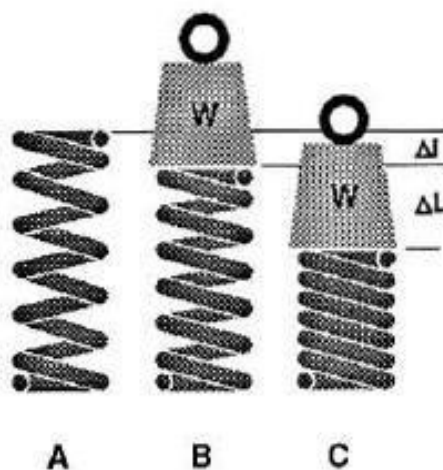


**Figura 7:** Tipos básicos de atuadores SMA (Huang, 2002).

Stoeckel & Waram, 1991 fizeram um estudo sobre utilização de ligas NiTi como sensores e atuadores com carga constante e com força externa no sistema. Como um exemplo do comportamento de um atuador SMA com carga constante, a Figura 8 mostra as curvas de força / deformação de uma mola SMA helicoidal, a temperaturas altas e baixas e a Figura 9 a configuração da mola em diferentes estágios. A forma de alta temperatura da mola sem carga é  $L_0$  (A). Se a mola é carregada com uma carga constante  $W$  na condição austenítica (a temperaturas acima de  $\square\square$ ) a mola é comprimida ao longo de A - B com o deslocamento  $\Delta l$ . Após arrefecimento abaixo de  $\square\square$  a mola se converte em martensita. Agora a carga  $W$  comprime a mola para o ponto C com o deslocamento  $\Delta L$ . A seguir, ciclos de aquecimento / arrefecimento entre os pontos B e C são executados.

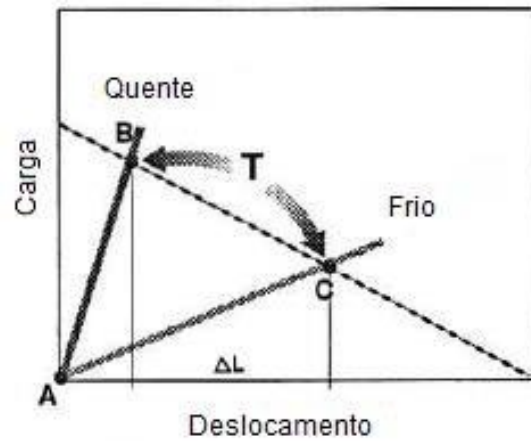


**Figura 8:** Carga constante x deslocamento da liga NiTi resfriada e aquecida.

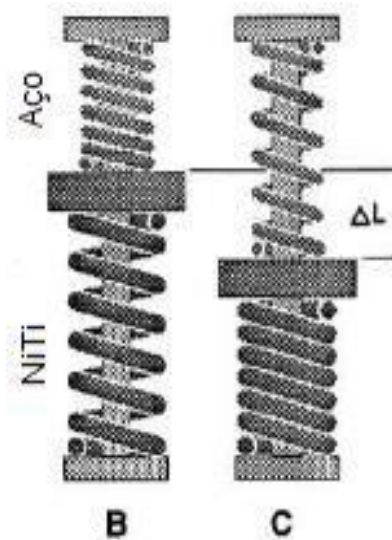


**Figura 9:** Carga constante atuando na mola SMA.

Se for usada uma mola elástica para atuar junto com a mola SMA no sistema de atuação, a curva de força / deformação para esta mola tem que ser sobreposta às características austeníticas e martensíticas da mola SMA. Em altas temperaturas (na condição austenítica) a mola SMA é forte o suficiente para comprimir a mola de aço. No entanto, a baixas temperaturas (no estado martensítico) a mola de aço é capaz de comprimir a mola SMA (Figuras 10 e 11). As chamadas TVR springs (molas termo variáveis) tem sido utilizadas com sucesso como sensores-atuadores nas áreas de compensação térmica, acionamento térmico e proteção térmica.



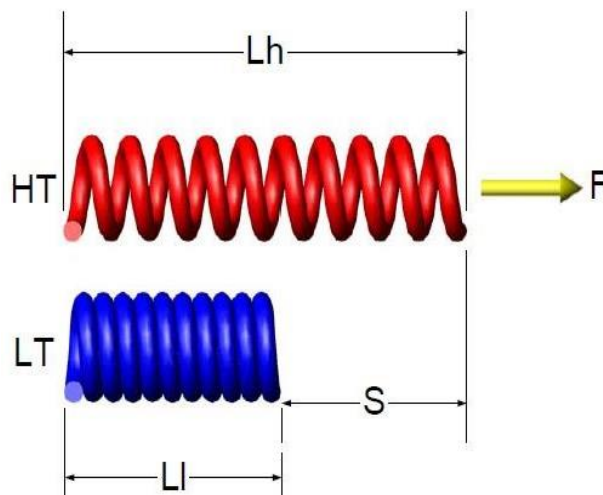
**Figura 10:** Força externa x deslocamento em liga SMA fria e quente.



**Figura 11:** Força externa atuando junto com a mola SMA.

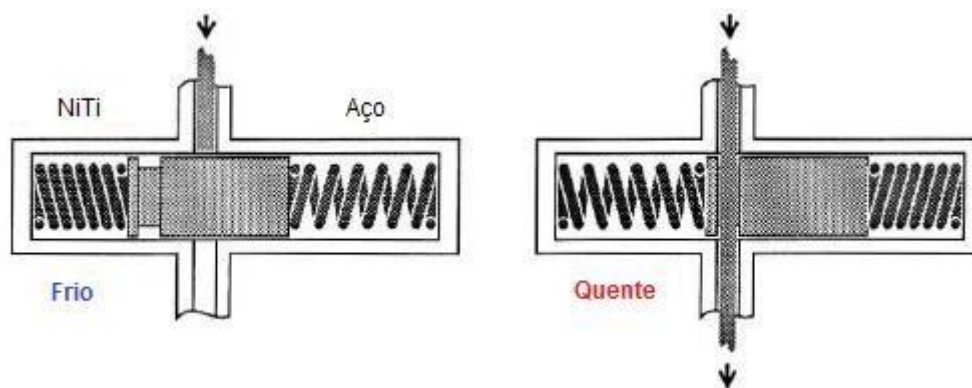
Esse cenário foi ilustrado na Figura 12 abaixo por Anadón, 2009, onde a baixa temperatura (LT) a mola é comprimida e quando é aquecida (HT) ela se estende fazendo uma força  $F$  de atuação.





**Figura 12:** Mola de compressão SMA.

Outro exemplo, que pode ser visto na Figura 13, foi apresentado por Mohd et al, 2014 no qual o dispositivo de Liga NiTi é utilizado na atuação de válvulas de transmissão automática em veículos da Mercedes-Benz. O dispositivo trabalha a uma posição fechada a frio, e quando a temperatura do sistema alcança a adequada, o sistema é atuado passando para a configuração aberta.

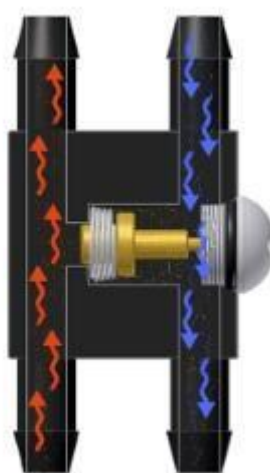


**Figura 13:** válvula de transmissão atuada SMA.

Outro exemplo são as válvulas by-pass ou simplesmente válvulas de desvio, também utilizam ligas NiTi, como pode ser observado nas Figuras 14 e 15. A baixas temperaturas, a pressão no sistema hidráulico de uma transmissão automática é maior, devido a maior viscosidade do óleo. Em temperaturas normais o óleo vai tomar o caminho de menor resistência e passar pela cavidade da válvula invés de ir para o radiador. Em temperaturas elevadas, a mola SMA atua fechando a válvula e o óleo vai direto para o radiador.

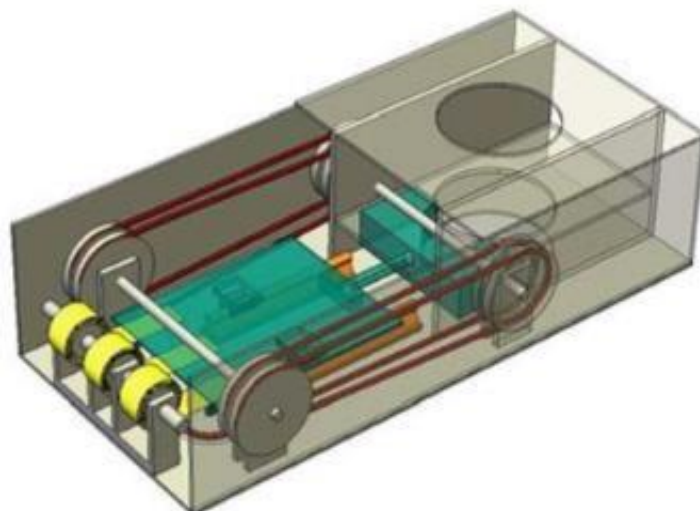


**Figura 14:** Válvula de desvio aberta ([www.jagg.com](http://www.jagg.com)).



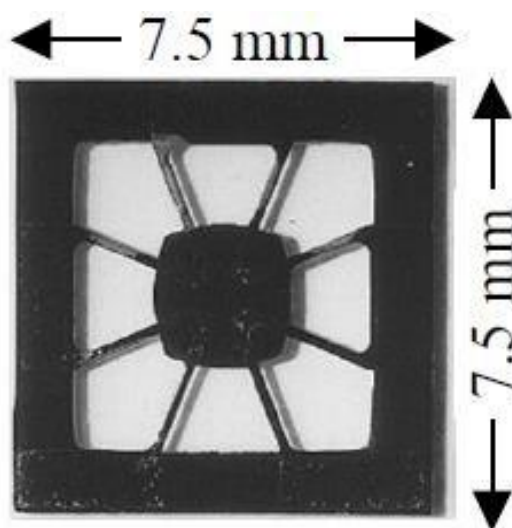
**Figura 15:** Válvula de desvio fechada ([www.jagg.com.br](http://www.jagg.com.br)).

Ma et al., 2006 desenvolveram um protótipo de gaveta de BOP (BlowOut Preventers). O conjunto BOP é constituído de válvulas de grande porte e inúmeros dispositivos, cujas finalidades principais são conter e controlar o fluxo do poço. Por se tratar de um sistema de segurança seu acionamento deve ter uma resposta rápida. A aplicação proposta por Ma et al., conseguiu um fechamento da gaveta mais rápido que 15 segundos e assim se adequando ao determinado pelas normas API (American Petroleum Institute) e NORSOK Standard. Seu funcionamento consiste no efeito de memória de forma reversível e acionamento por aquecimento tanto por corrente elétrica ou indiretamente por produtos químicos. A figura 16 mostra uma ilustração do protótipo.



**Figura 16:** válvula gaveta atuada SMA.

Lai et al., 2001 fizeram um estudo de um micro atuador, que pode ser visto na figura 17, para ser usado em micro válvulas compostas de um padrão circular de fios de NiTi ligando uma ilha de Silício, que funciona como elemento de vedação, a um quadro externo também de Silício. Com atuação de uma mola fazendo uma força externa na ilha de Si e assim deformando o padrão circular de NiTi (martensítico) a válvula encontra-se na posição fechada. Quando se aquece o padrão circular, ele volta a sua forma normal vencendo a força da mola e abrindo a válvula.



**Figura 17:** Micro atuador SMA.

## **3.2. Atuadores na indústria**

De uma maneira geral, as SMAs apresentam uma resistência à fadiga inferior quando comparadas a outras ligas usadas nas indústrias. Entretanto, as SMAs são capazes de gerar grandes forças de restituição com um consumo de energia relativamente baixo, o que é uma característica que as diferenciam em diversas aplicações. (Castilho & Silva, 2011)

Esse poder de restituição, pode gerar uma gama de aplicações nos diversos ramos da indústria, podendo substituir acionamentos de mecanismos tradicionais.

Existem diversas aplicações possíveis das SMA, e em diversas áreas têm-se desenvolvido tecnologias afins. Dentre os campos de aplicação, destaca-se algumas áreas mais expressivas, são elas: medicina, engenharia aeroespacial e na robótica.

### **3.2.1 Aeronáutica**

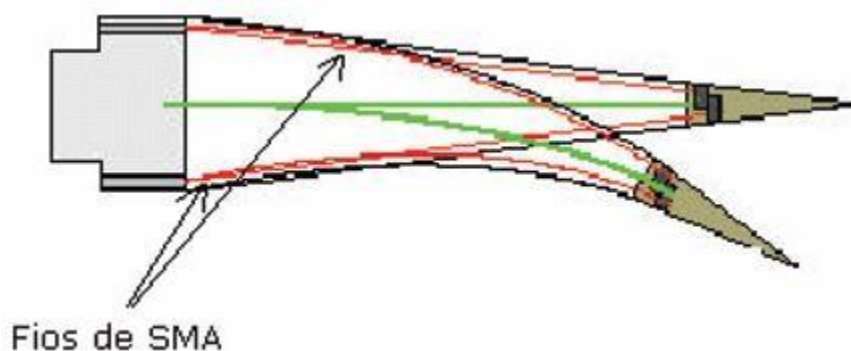
Os flaps são estruturas móveis, encontradas nas asas de aeronaves, que fazem com que ocorra o ganho ou perda de altitude além da mudança de direção da aeronave. Se aumentar a eficiência do acionamento do flap, isso influenciará diretamente na eficiência da manobra da aeronave. Estas estruturas comumente utilizam sistemas hidráulicos acionados por bombas, válvulas e atuadores, causando impactos diretos em fatores cruciais para projetos de aeronaves, o peso e o custo, no qual se elevam.

Visando o contorno desses problemas citados acima, dentre algumas alternativas na indústria aeroespacial está o acionamento do flap por meio de SMA. A Figura 18 mostra a forma básica de um flap das asas, com o sistema hidráulico conectado ao atuador. Com o uso das SMA, as asas poderiam ter a configuração mostrada na Figura 19, o que possibilita o projeto de sistemas mais otimizados em relação ao custo, ao peso e à eficiência (Asundi, 1996).



**Figura 18:** Modelo básico de uma asa de avião com flap.

No sistema mostrado na Figura 19, fios de SMA são acoplados na parte superior e na inferior do flap que por sua vez deve ser feito de um material flexível e resistente que acompanhe a mudança de forma dos fios. Associado a um sistema de aquecimento por corrente elétrica dos fios de SMA, a geometria do flap pode ser controlada.



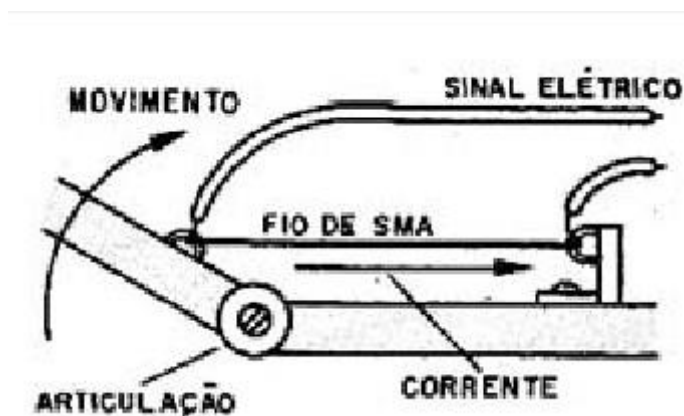
**Figura 19:** Flap com fios de SMA.

### 3.2.2. Robótica

Dispositivos capazes de se movimentar para frente e para trás como um braço, são mais comuns na robótica. Muitas vezes os projetos dos braços não possuem um compromisso com a delicadeza do movimento, porém em alguns casos se busca um movimento articulado o mais próximo possível do movimento de um braço humano.

Sistemas articulados e movidos por motores, apesar de muito utilizado, não reproduzem com tanta fidelidade o movimento humano. Além do ruído do motor, a necessidade de lubrificação, a velocidade limitada de acionamento e resposta são alguns dos problemas que devem ser considerados.

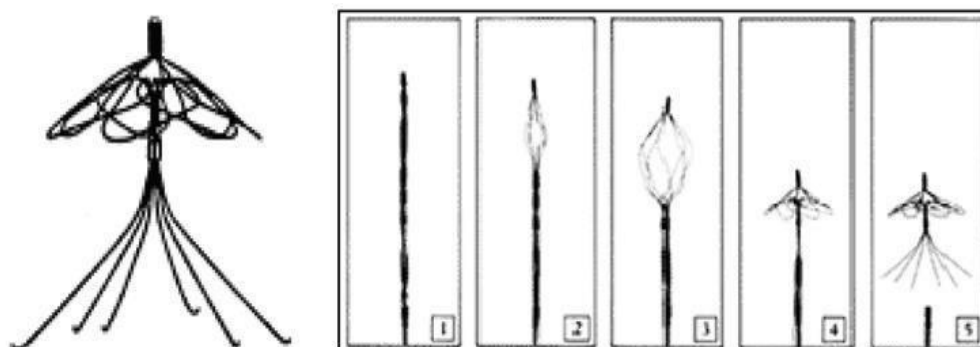
As características de elasticidade dos fios SMA são ideais para serem usadas como “Fibras Musculares” e combinados com articulações de modo a fazer acionamentos de dispositivos que vão simular um braço mecânico com funcionamento mais próximo da realidade humana como mostrado na figura 20.



**Figura 20:** Mecanismo de um braço mecânico acionado por SMA.

### 3.2.3. Médica

Uma das aplicações de SMA na medicina consiste em um filtro de coágulos sanguíneos desenvolvido por Simon. Um fio de NiTi é previamente deformado para assumir uma forma que lhe permita ser fixado às paredes internas das veias. Primeiramente este filtro é deformado expondo-o à baixa temperatura, de modo a poder ser inserido na veia pretendida junto com uma solução salina que o mantém resfriado e ao ser submetido ao calor do corpo humano, ele retoma a configuração original, conforme a Figura 21.

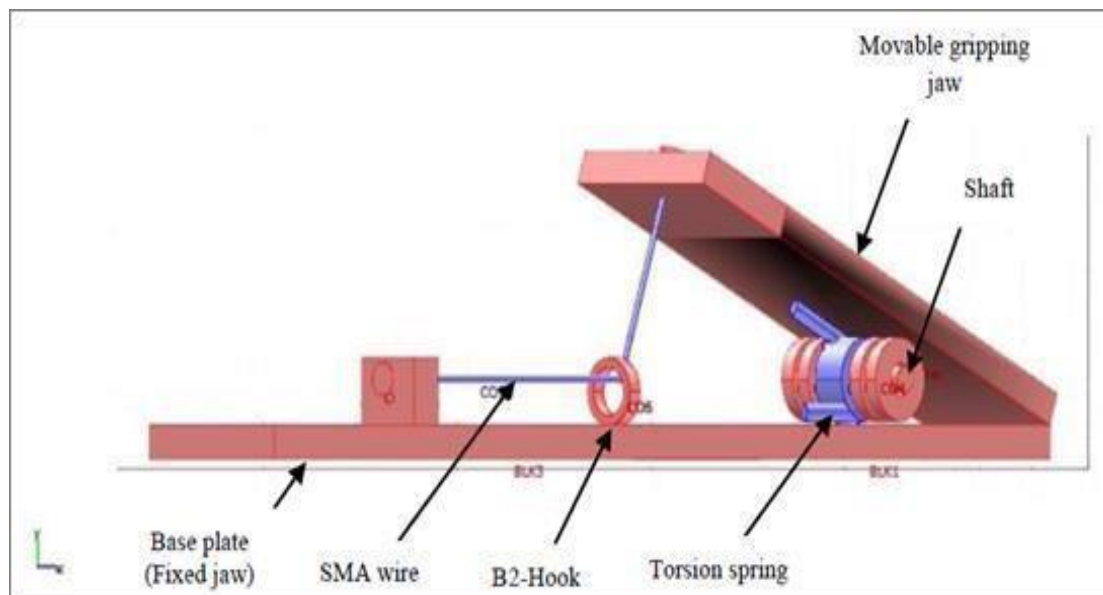


**Figura 21:** Filtro de Simon. Evolução da sua forma durante o aquecimento (Fernandes, 2003).

### 3.3. Outras aplicações

Chaitanya & Dhanalakshmi, 2014 desenvolveram um dispositivo tipo “garra” utilizando atuação com um fio NiTi. O princípio de funcionamento é atuar o sistema aquecendo o fio SMA, que vai voltar a sua forma inicial fazendo com que se converta o deslocamento linear do fio em deslocamento angular da parte móvel do pegador. Essa abertura ocorre pois a força exercida pela retração do fio supera a força da mola de torção.

Uma ilustração do dispositivo pode ser vista na Figura 22.



**Figura 22:** Dispositivo tipo “garra” (Chaitanya & Dhanalakshmi ,2014).

## Capítulo 4

### Modelo Numérico

#### 4.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento de um modelo constitutivo para as ligas com memória de forma com a finalidade de obter uma correlação numérico-experimental e posteriormente simular o comportamento do dispositivo.

A despeito das inúmeras aplicações das SMAs, as teorias constitutivas utilizadas para descrever seu comportamento termomecânico ainda se encontram em desenvolvimento através de diferentes modelos encontrados na literatura (Paiva and Savi, 2006). O comportamento das SMAs é bastante complexo envolvendo o acoplamento entre fenômenos térmicos de transformação de fase e mecânicos. (Tanaka,1990; Savi et al, 2002).

##### 4.1.1. Descrição do modelo constitutivo de memória de forma

A necessidade de uma análise mais precisa do comportamento termomecânico das SMAs tem tornado cada vez maior o interesse no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descrevê-lo de forma adequada, permitindo explorar todo seu potencial. A modelagem destas ligas possui duas abordagens distintas. A primeira, microscópica, tem um enfoque e leva em consideração aspectos metalúrgicos das ligas. A segunda abordagem, macroscópica, apresenta uma preocupação com os aspectos fenomenológicos. (Pacheco et al., 2003).

Dentro dessa linha, no presente trabalho, utilizaremos um modelo com restrições internas proposto por Savi et al. (2002). Este modelo é baseado no modelo de Fremmond (Savi et Al., 2002) e descreve o comportamento termo mecânico das ligas com memória de forma.

O modelo utilizado difere de seu original pois além de representar as frações volumétricas de duas variantes martensíticas não macladas ( $\beta_1$  associada a tração e  $\beta_2$  associada a compressão) e uma fase austenítica ( $\beta_3$ ), inclui uma variante associada a



martensita maclada ( $\beta_4$ ) que representa a transformação de fase devido a variação da temperatura. Somado a isso, o novo modelo leva em conta a assimetria tensão-compressão, o efeito das deformações plásticas, dependência da taxa de carregamento e o acoplamento entre transformação de fase e plasticidade. O modelo é apresentado de forma resumida a seguir retirando-se os termos referentes à plasticidade, pois as simulações não tratam desse fenômeno.

$$\sigma = E\varepsilon - (\alpha^T + E\alpha_h^T)\beta_1 + (\alpha^C + E\alpha_h^C)\beta_2 - \Omega(T - T_0) \quad (1)$$

O modelo assume a energia livre de Helmholtz para cada fase, sendo:

$$\beta_1 : \rho\psi_1(\varepsilon_e, T) = \frac{1}{2}E_M\varepsilon_e^2 - \alpha_h^T\varepsilon_e - \Gamma_1 - \Omega_M(T - T_0)\varepsilon_e \quad (2)$$

$$\beta_2 : \rho\psi_2(\varepsilon_e, T) = \frac{1}{2}E_M\varepsilon_e^2 - \alpha_h^C\varepsilon_e - \Gamma_2 - \Omega_M(T - T_0)\varepsilon_e \quad (3)$$

$$\beta_3 : \rho\psi_3(\varepsilon_e, T) = \frac{1}{2}E_A\varepsilon_e^2 - \Gamma_3 - \Omega_A(T - T_0)\varepsilon_e \quad (4)$$

$$\beta_4 : \rho\psi_4(\varepsilon_e, T) = \frac{1}{2}E_M\varepsilon_e^2 - \Gamma_4 - \Omega_M(T - T_0)\varepsilon_e \quad (5)$$

$$\Lambda_1 = -L_0^T + \frac{L^T}{T_M}(T - T_M) \quad (6)$$

$$\Lambda_2 = -L_0^C + \frac{L^C}{T_M}(T - T_M) \quad (7)$$

$$\Lambda_3 = -L_0^A + \frac{L^A}{T_M}(T - T_M) \quad (8)$$

$$E = E_M + (E_A - E_M)\beta_3 \quad (9)$$

$$\Omega = \Omega_M + (\Omega_A - \Omega_M)\beta_3 \quad (10)$$

Nas equações  $\varepsilon_e$  é referente a parte elástica da deformação, representada por  $\varepsilon_e = \varepsilon - \alpha_h^T\beta_1 + \alpha_h^C\beta_2$ ,  $T$  é a temperatura,  $T_0$  a temperatura de referência. As funções que  $E$  e  $\Omega$ , representam o módulo elástico e o coeficiente de expansão térmica, respectivamente possuem um índice subscrito para cada fase do material, sendo  $A$  para austenita e  $M$  para martensita. Os parâmetros  $\alpha_h^T$  e  $\alpha_h^C$  são parâmetros associados ao tamanho vertical do laço de histerese à tração e à compressão, respectivamente. Os

parâmetros  $L^T$ ,  $L^C$  e  $L^A$  estão relacionados à tensão crítica para transformação de fase. Definindo-se que há uma mistura entre as fases, é possível relacioná-las da seguinte forma  $\beta_4 = 1 - \beta_1 - \beta_2 - \beta_3$  e escrever uma função geral da energia livre de Helmholtz como:

$$\tilde{\psi}(\varepsilon_e, T) = \sum_{k=1}^3 \beta_k \psi_k + \tilde{J}_\Pi(\beta_1, \beta_2, \beta_3) + \tilde{J}_\Xi(\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\beta}_3), \quad (11)$$

sendo  $\tilde{J}_\Pi$  e  $\tilde{J}_\Xi$  funções indicatrizes relativas aos conjuntos convexos  $\Pi$  e  $\Xi$  que fornecem as relações de coexistência entre as fases e suas variantes e restrições de transformações de fase não observadas experimentalmente. Para maior detalhamento das funções indicatrizes ver Savi et al. (2002). Com a função de Energia Livre de Helmholtz generalizada e as relações provenientes das funções indicatrizes pode-se determinar as equações constitutivas que descrevem a evolução temporal do material da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \eta_1 \dot{\beta}_1 = & \alpha^T \varepsilon - \Lambda_1 - \left[ 2\alpha_h^T \alpha^T + E(\alpha_h^T)^2 \right] \beta_1 + \\ & + (\alpha_h^C \alpha^T + \alpha_h^T \alpha^C + E\alpha_h^T \alpha_h^C) \beta_2 + \alpha_h^T [E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \eta_2 \dot{\beta}_2 = & -\alpha^C \varepsilon - \Lambda_2 - (\alpha_h^T \alpha^C + \alpha_h^C \alpha^T + E\alpha_h^T \alpha_h^C) \beta_1 + \\ & + \left[ 2\alpha_h^C \alpha^C + E(\alpha_h^C)^2 \right] \beta_2 + \alpha_h^C [E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \eta_3 \dot{\beta}_3 = & -\frac{1}{2} (E_A - E_M) (\varepsilon - \alpha_h^T \beta_1 + \alpha_h^C \beta_2)^2 + \Lambda_3 + \\ & + (\Omega_A - \Omega_M) (T - T_0) (\varepsilon - \alpha_h^T \beta_1 + \alpha_h^C \beta_2) \end{aligned} \quad (14)$$

Os parâmetros  $\eta_i$  com  $i=1,2, 3$  regulam a velocidade de transformação de fase e reorientação de variantes.

Conforme será descrito no capítulo 5, o fio SMA possui pequeno diâmetro o que impossibilitou medidas diretas de temperatura. Neste trabalho faz-se uso de equações de transferência de calor para estimar as temperaturas obtidas nos ensaios experimentais que são resultantes dos carregamentos térmicos obtidos através do efeito Joule (Camara, 2007). A expressão que fornece a evolução temporal da temperatura em função das variáveis envolvidas no problema está apresentada a seguir:

$$\dot{T} = \frac{1}{\rho c} (\text{Conv} + \text{Acp}^{\text{Int}} + \text{Acp}^{\text{ter}} + \text{Acp}^{\text{elet}}) \quad (15)$$

$$\text{Conv} = -hA(T - T_{\infty}) \quad (16)$$

$$\text{Acp}^{\text{Int}} = -(B_1\dot{\beta}_1 + B_2\dot{\beta}_2 + B_3\dot{\beta}_3) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{Acp}^{\text{ter}} = \Omega(\dot{\varepsilon} - \alpha_h^T \dot{\beta}_1 + \alpha_h^C \dot{\beta}_2)T - \frac{T}{T_M}(L^T \dot{\beta}_1 + L^C \dot{\beta}_2 + L^A \dot{\beta}_3) + \\ + T(\Omega_A - \Omega_M)(\varepsilon - \alpha_h^T \beta_1 + \alpha_h^C \beta_2)\dot{\beta}_3 \quad \text{para } T > T_M \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Acp}^{\text{ter}} = \Omega(\dot{\varepsilon} - \alpha_h^T \dot{\beta}_1 + \alpha_h^C \dot{\beta}_2)T + T(\Omega_A - \Omega_M)(\varepsilon - \alpha_h^T \beta_1 + \alpha_h^C \beta_2)\dot{\beta}_3 \\ \text{para } T \leq T_M \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{Acp}^{\text{elet}} = Ri^2/Al \quad (20)$$

onde  $h$  é o coeficiente de convecção,  $A$  é a área da seção reta do elemento e  $T_{\infty}$  é a temperatura do ambiente exterior ao elemento. O termo  $\text{Conv}$  está associado as trocas de calor por convecção,  $\text{Acp}^{\text{Int}}$  é resultado da dissipação intrínseca do material e o  $\text{Acp}^{\text{ter}}$  relaciona o acoplamento entre as variáveis temperatura e  $B_1, B_2, B_3$  que são as forças termodinâmicas associadas as frações volumétricas  $\beta_1, \beta_2$  e  $\beta_3$  respectivamente. O termo  $\text{Acp}^{\text{elet}}$  é referente a contribuição do efeito Joule, sendo  $i$  a corrente,  $l$  o comprimento da amostra e  $R$  a resistência. A resistência é dada por  $R = R_M + (R_A - R_M)\beta_3$ , sendo  $R_M$  e  $R_A$  a resistência da fase martensítica e austenítica, respectivamente.

As propriedades e parâmetros adotados no trabalho são obtidos através da caracterização experimental do material através de ensaios de tração. O fio utilizado nos ensaios experimentais possui diâmetro de 0.378 mm e comprimento de 100 mm. Os valores adotados para as diversas propriedades necessárias ao modelo estão relacionados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Parâmetros usados no modelo

$E_A$ (GPa)	$\varepsilon_R$	$L$ (MPa)	$\eta_1^C$ (MPa.s)
65.0	0.035	20.0	0.1
$E_M$ (GPa)	$T_A$ (K)	$L_0$ (MPa)	$\eta_3^C$ (MPa.s)
25	302.5	0.1	0.1
$\Omega_A$ (kPa/K)	$T_M$ (K)	$L^A$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
740	272	900	6450
$\Omega_M$ (kPa/K)	$T_F$ (MPa)	$L_0^A$ (MPa)	$c$ (J/kg.K)
170	450	0.1	600
$\alpha_h^T$ e $\alpha_h^C$ (MPa)	$R_A$ ( $\mu\Omega/m$ )	$R_M$ ( $\mu\Omega/m$ )	$h$ (W/m <sup>2</sup> .K)
125	8.3	0.76	45.0

O modelo foi implementado na linguagem Fortran e após a calibração, o mesmo foi utilizado para fazer a correlação numérico-experimental do atuador SMA com tensão assistida constante (descrição dos ensaios no capítulo 5). Porém, utilizou-se um modelo numérico baseado em elementos finitos para simular o atuador fio SMA conectado com uma mola convencional, conforme a descrição abaixo.

#### 4.1.2. Desenvolvimento do modelo numérico baseado no método de elementos finitos

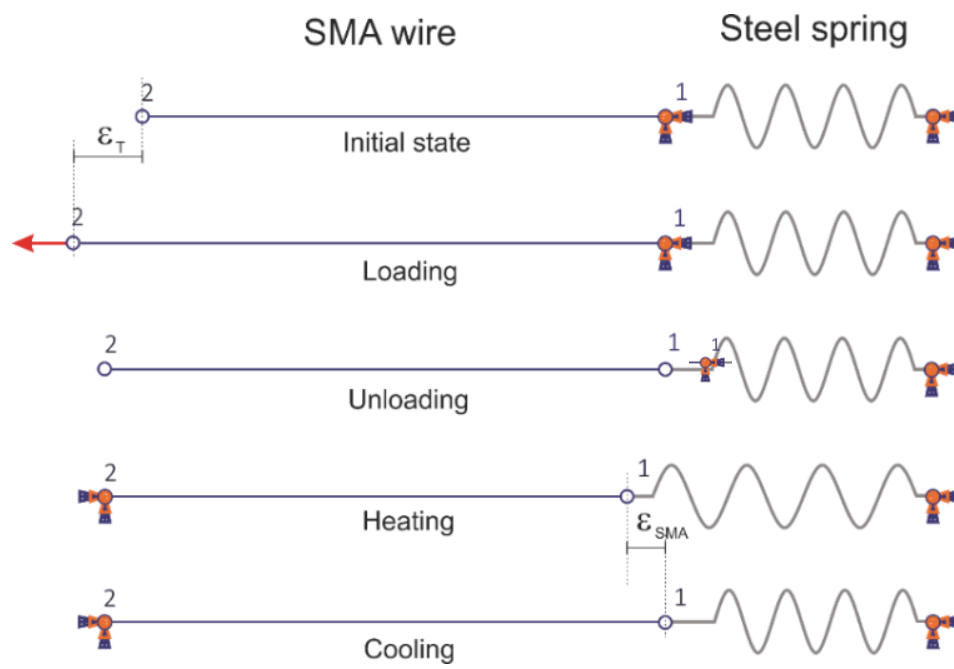
O método dos elementos finitos, tradicionalmente utilizado no projeto e análise de estruturas, tem sido amplamente utilizado na modelagem de diversos componentes de SMA (Bandeira et al., 2005). Este método é utilizado neste trabalho considerando o modelo constitutivo desenvolvido anteriormente para descrever o comportamento termomecânico das SMAs. Para ter a capacidade de analisar geometrias mais complexas, será utilizado um modelo numérico baseado no método de elementos finitos com o software comercial ABAQUS.

No programa de elementos finitos Abaqus, os modelos constitutivos de materiais podem ser implementados através de uma sub-rotina externa escrita em linguagem de programação FORTRAN e denominada UMAT (*user material subroutine*). A sub-rotina UMAT é utilizada em cada ponto de integração de cada elemento da malha de elementos

finitos que modela a estrutura. O cálculo é realizado em cada iteração de cada incremento de tempo em que são realizados os cálculos computacionais. O Abaqus fornece o estado do material no início do incremento descrito pela tensão antiga utilizando a variável de tensão (STRESS) e a variável de deformação antiga (STRAIN). A sub-rotina atualiza ao final do incremento, para todos os pontos de integração, as tensões e a matriz jacobiana de transformação do modelo constitutivo ( $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ ), temperatura, bem como os valores das variáveis internas, como as frações volumétricas das fases e variantes. A sub-rotina utilizada no presente trabalho foi desenvolvida por Bandeira et al. (2005).

Com o objetivo de investigar um atuador composto de um fio SMA acoplado a uma mola convencional, o fio de memória de forma foi modelado com comprimento de 100 mm e diâmetro de 0.38 mm. Utilizou-se um elemento de treliça T2D2 para discretização com um único elemento. A mola convencional de aço foi simulada utilizando o elemento de mola linear da biblioteca do Abaqus com a constante elástica obtida nos ensaios experimentais.

As condições de contorno e carregamentos mecânicos e térmicos empregados são mostrados na Figura 23. Primeiramente, o fio se encontra no estado martensítico com variante maclada. Utiliza-se dois engastes nas extremidades da mola, e em seguida é feito um carregamento mecânico no fio SMA com os mesmos valores utilizados experimentalmente (ponto 2) e posteriormente realiza-se a descarga mecânica. Este pré-carregamento mecânico garante a reorientação para a variante não-maclada, e dependendo do valor do carregamento mecânico, podemos ter reorientação total ou parcial. Após esta etapa, o fio encontra-se deformado. Em seguida, remove-se o engaste entre o fio SMA e a mola convencional (ponto 1) e coloca-se o engaste no ponto 2. Emprega-se o carregamento térmico aquecendo o fio SMA. O aumento da temperatura faz com que, ao se atingir a temperatura do início de transformação de fase para austenita, o fio tente retornar ao comprimento inicial carregando a mola. Já ao se resfriar o fio (assistido de uma força restituidora proveniente da mola) o material retorna a variante não-maclada, aumentando seu comprimento. Este efeito pode ser repetido indefinidamente através dos ciclos térmicos no fio. Ao longo das simulações variou-se a constante elástica das molas para analisar o efeito na força e deslocamento do atuador.



**Figura 23:** Modelo de elementos finitos para o atuador fio SMA acoplado com mola convencional.

## Capítulo 5

### Metodologia

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento dos testes experimentais, bem como o material, descrição dos equipamentos e procedimentos experimentais.

#### 5.1. Fio SMA utilizado

Os fios de SMA, quando submetidos a temperaturas ou tensões não ideais, podem sofrer deformações permanentes e podem apresentar fadiga. Para tanto é necessário conhecer suas características de trabalho.

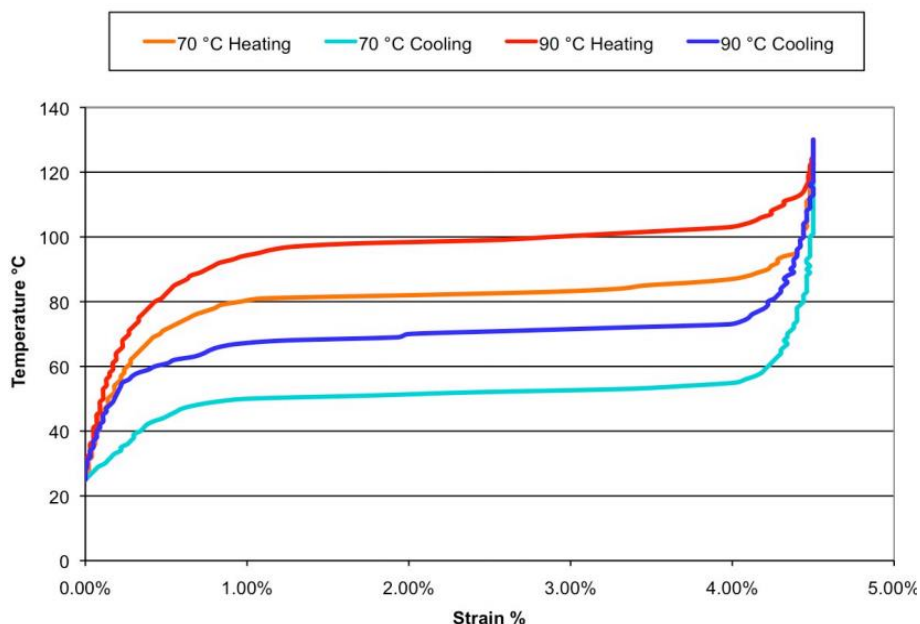
O fio utilizado no projeto foi o FLEXINOL® Actuator Wire, com diâmetro de 0,38 mm, do fabricante DYNALLOY, Inc. De acordo com o fabricante, a utilização segura para os fios como atuadores é garantida até uma tensão de 172 Mpa. Ainda assim informa que tensões superiores podem ser utilizadas. Como o fio utilizado nos experimentos possui 0,38 mm de diâmetro, tem-se:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (21)$$

$$172 \text{ MPa} = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (22)$$

$$F = 19,50 \text{ N} \quad (23)$$

Logo, este experimento terá como objetivo de alcançar forças em torno de 20N. Também é dito pelo fabricante, que a temperatura onde a fase austenítica se inicia varia de 70°C a 90°C, sob 172 Mpa de tensão como mostra a figura 24.



**Figura 24:** Temperatura x Deformação.

Como a temperatura está diretamente ligada à densidade de corrente imposta ao fio, deve-se seguir cuidadosamente as restrições do fabricante para que não se faça uso incorreto do material. As especificações estão mostradas na Tabela 2

**Tabela 2** - Especificação do Fio de NiTi utilizado no projeto, segundo fabricante.

(Fonte: <http://www.dynalloy.com>).

Diâmetro (polegadas)	0,015
Diâmetro(mm)	0,380
Força Nominal Recomendada ( $\times 10^{-3}$ kgf)	2004
Resistência ( $\mu\Omega/m$ )	8,3
Corrente Elétrica para acionamento (mA)	2250

Além destas informações obtidas do fabricante, uma outra propriedade é importante conhecimento para o estudo e utilização dos fios como atuadores do dispositivo proposto. A capacidade de deformação e recuperação da forma dos fios. Com isto, realizou-se a caracterização mecânica do fio NiTi.



## 5.2. Descrição do Aparato utilizado para a Caracterização

Diferentes parâmetros que são: tensão ou força, deformação e corrente elétrica, serão utilizados para a determinação de dados importantes para o dimensionamento do atuador, além da calibração do modelo numérico.

Para a aquisição dos dados, foi utilizado o equipamento de aquisição HBM Spider8 usando como interface e armazenamento de dados, o software Catman 4.5 (Figura 25):



**Figura 25:** HBM Spider8

Para determinar força exercida no fio, utilizou-se uma célula de carga de tração do Tipo S de 5 kgf de Força Nominal. Foram feitas pesagens, em balança de precisão, para uma série de anilhas que foram utilizadas como peso morto para realizar a calibragem da Célula de Carga (Tabela 3).

**Tabela 3:** Massas usadas na calibração da Célula de Carga

Anilha	Massa (g)
Anilha 1	964
Anilha 2	1011
Anilha 3	1051
Anilha 4	1067
Anilha 5	1091
Anilha 6	1091

Depois deste procedimento, foram feitas pesagens com as anilhas conectadas à Célula de Carga. O resultado das pesagens com as anilhas para a calibração do sensor, são apresentados na tabela 4 abaixo:

**Tabela 4:** Resultados na calibração da Célula de Carga.

Massa Anilha (g)	Anilha + gancho (g)	Carga em Newton (N)	mv/V	Relação N/V
1011	1106	10,84986	0,4585	23,66382
2015	2110	20,6991	0,878	23,57528
3249	3344	32,80464	1,394	23,53274
4260	4355	42,72255	1,812	23,57757
5264	5359	52,57179	2,234	23,53258

Para aquisição do deslocamento, utilizou-se um Transdutor de Posição GEFRAN, modelo PY2-F-25-S, com curso de 0 a 25 mm (Figura 26).

**Figura 26:** Transdutor de Posição GEFRAN, modelo PY2-F-25-S.

Para realizar o acionamento do fio através da imposição de uma corrente elétrica, fez-se o uso de uma Fonte de Alimentação HY3003E-3, ver Figura 27.

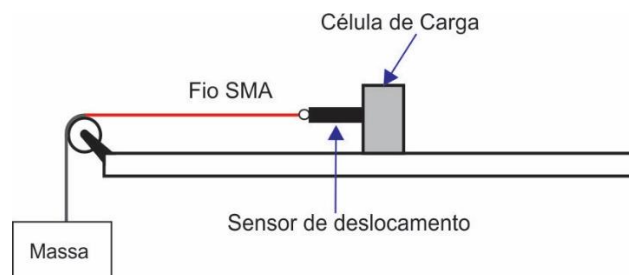
**Figura 27:** Fonte de Alimentação HY3003E-3.

A aquisição dos diferentes parâmetros que são: força, deformação e corrente elétrica, serão utilizados para a determinação de dados importantes para o dimensionamento do atuador, além da calibração do modelo numérico.

### 5.3. Descrição dos Ensaio Experimentais

O primeiro ensaio realizado foi o de caracterização mecânica do fio através de curvas tensão x deformação. Massa até 5kg foi adicionada gradualmente e após a descarga mecânica, o fio aquecido através de corrente elétrica até 3A (memória de forma).

Em seguida, para o estudo de diferentes concepções de atuação a partir do efeito de memória de forma com tensão assistida SATWME (*Stress-Assisted Two-Way Memory Effect*), realizou-se um conjunto de testes com carga mecânica constante através de “peso morto” conectado ao fio durante os ciclos térmicos, afim de estabelecer os valores mínimos e máximos carga mecânica e corrente elétrica que devem ser usados para se obter atuação do dispositivo (ver diagrama esquemático na Figura 28).



**Figura 28:** Diagrama esquemático simplificado do aparato experimental com tensão assistida SATWME.

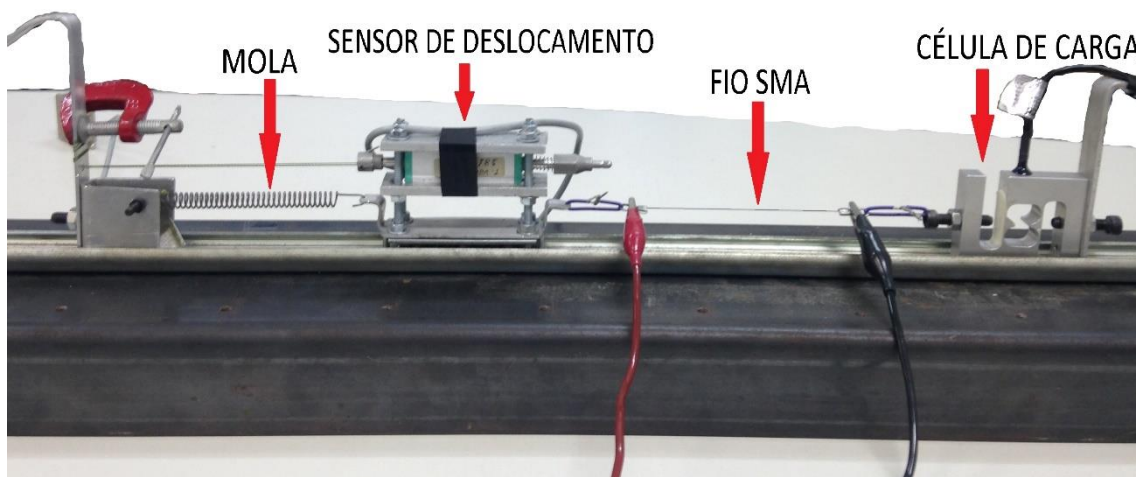
Nestes ensaios, inicia-se com o fio apresentando sua estrutura 100% de martensita maclada a temperatura ambiente. Com a aplicação de carregamento mecânico por “peso morto”, o fio se deforma passando por uma transformação total ou parcial (dependendo do valor da carga mecânica) para martensita não-maclada. Com passagem de corrente elétrica, induz-se a elevação da temperatura do fio por efeito Joule. Ao ser aquecido, o fio contrai devido à sua transformação para austenita. Com o resfriamento até a temperatura ambiente, ocorre nova transformação de fase da austenita para martensita e dependendo do valor da carga mecânica a variante induzida é a martensita não-maclada. Os testes foram realizados variando as massas em 0,5 kg, percorrendo o intervalo de 0,5

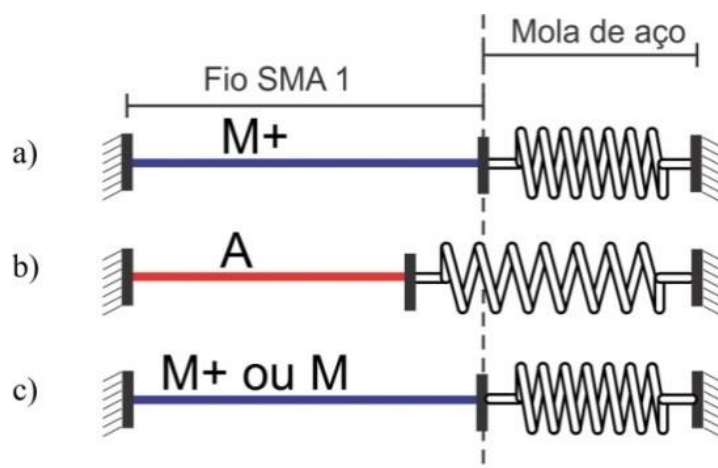
kg até 2,5 kg e a corrente elétrica variando 0,5 A, percorrendo o intervalo de 0,5 A até 2,5 A, como mostra a Tabela 5.

Em seguida, realizou-se um conjunto de testes utilizando um sistema que consiste de uma mola convencional conectada ao fio SMA, o aparato experimental utilizado está mostrado na Figura 29). O dispositivo permite um ajuste de tensão inicial através dos parafusos no suporte dos fios. O fio SMA inicialmente martensítico é carregado mecanicamente passando para a variante martensita não-maclada (parcial ou totalmente dependendo da carga mecânica) e a após o descarregamento o fio apresenta uma deformação residual devido à mudança de variante martensítica. Posteriormente, é feito o aquecimento do fio realizado através de corrente elétrica provocando uma diminuição do elemento aquecido devido à transformação de fase e provoca um tensionamento da mola de aço com constante elástica conhecida. A Figura 30 apresenta o comportamento do dispositivo durante o ciclo térmico. O aquecimento (vermelho) e resfriamento (azul) do fio durante os ciclos e o fio tem sua fase/variante representada como  $M^+$ , M e A, ou seja martensita induzida por tensão de tração, martensita induzida por temperatura e austenita respectivamente. Os testes foram realizados com 3 molas de aço com diferentes constantes elásticas. Os ciclos térmicos foram realizados com diferentes valores de corrente elétrica 1,0 A, 1,5 A e 2,0 A.

**Tabela 5:** Condições dos experimentos.

Condição	Massa (kg)	Corrente (A)
1	0,5	0,5
2	0,5	1,0
3	0,5	1,5
4	0,5	2,0
5	0,5	2,5
6	1,0	0,5
7	1,0	1,0
8	1,0	1,5
9	1,0	2,0
10	1,0	2,5
11	1,5	0,5
12	1,5	1,0
13	1,5	1,5
14	1,5	2,0
15	1,5	2,5
16	2,0	0,5
17	2,0	1,0
18	2,0	1,5
19	2,0	2,0
20	2,0	2,5
21	2,5	0,5
22	2,5	1,0
23	2,5	1,5
24	2,5	2,0
25	2,5	2,5

**Figura 29:** Aparato com mola conectada ao fio SMA.



**Figura 30:** Desenho esquemático do teste durante um ciclo térmico.

As constantes elásticas das molas foram caracterizadas através de ensaios de tração na INSTRON modelo 5966, comandado pelo software Bluehill-3. Detalhes podem ser vistos na Tabela 6.

**Tabela 6:** Detalhes das Molas utilizadas.

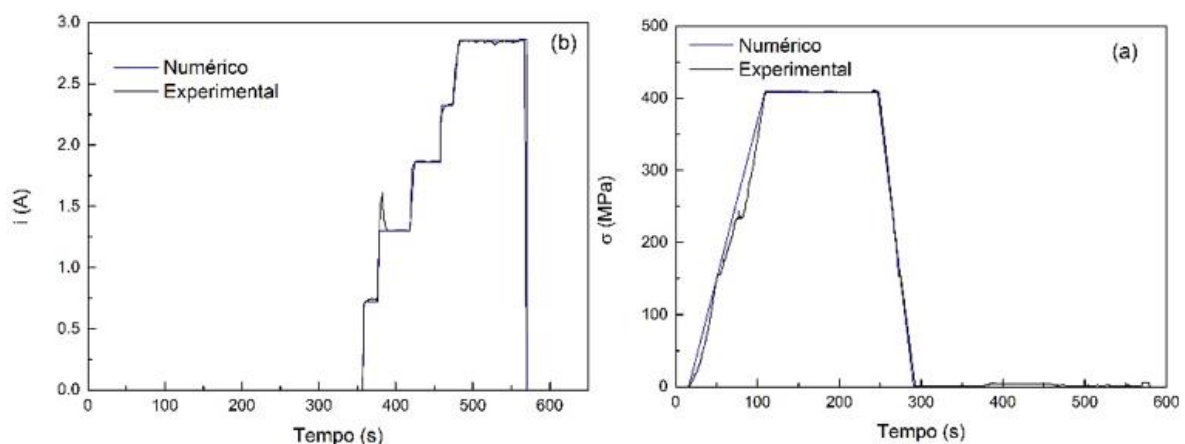
Mola	Comprimento (mm)	Diâmetro da Mola (mm)	Constante elástica (N/m)
1	33,14	8,12	708,9
2	33,28	12,2	1017,7
3	26,48	12,26	341,4

## Capítulo 6

### Resultados

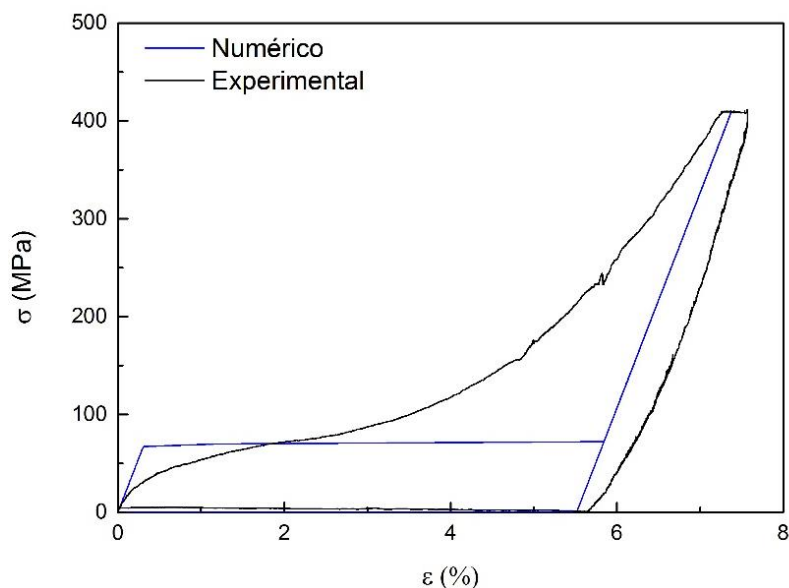
#### 6.1. Memória de forma *one-way*

Inicialmente são apresentados os resultados do ensaio de memória de forma que consiste em um ensaio de tração com carga máxima de 5kg a temperatura ambiente, seguido de aquecimento utilizando corrente elétrica até 3A (detalhes do teste podem ser vistos no capítulo 5). Visando estabelecer a calibração do modelo numérico apresentado no capítulo 4, foram utilizados os parâmetros mostrados na Tabela 1 para reproduzir os ensaios experimentais. As simulações foram realizadas com as entradas de tensão e de corrente conforme mostra a Figura 31.



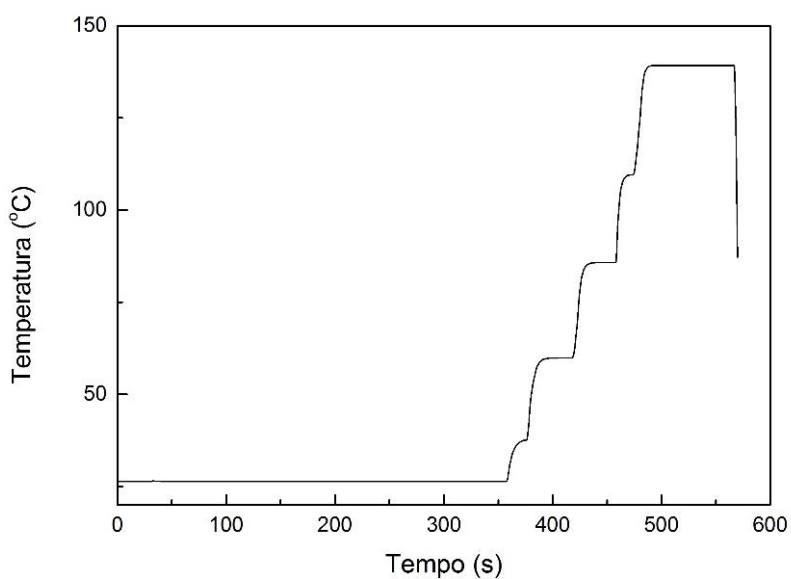
**Figura 31:** Comparação numérico-experimental. (a) carregamento mecânico em função do tempo e (b) corrente elétrica em função do tempo.

A Figura 32 mostra a comparação entre as curvas tensão x deformação numérica e experimental. Os resultados numéricos foram obtidos com os parâmetros apresentados na Tabela 1.



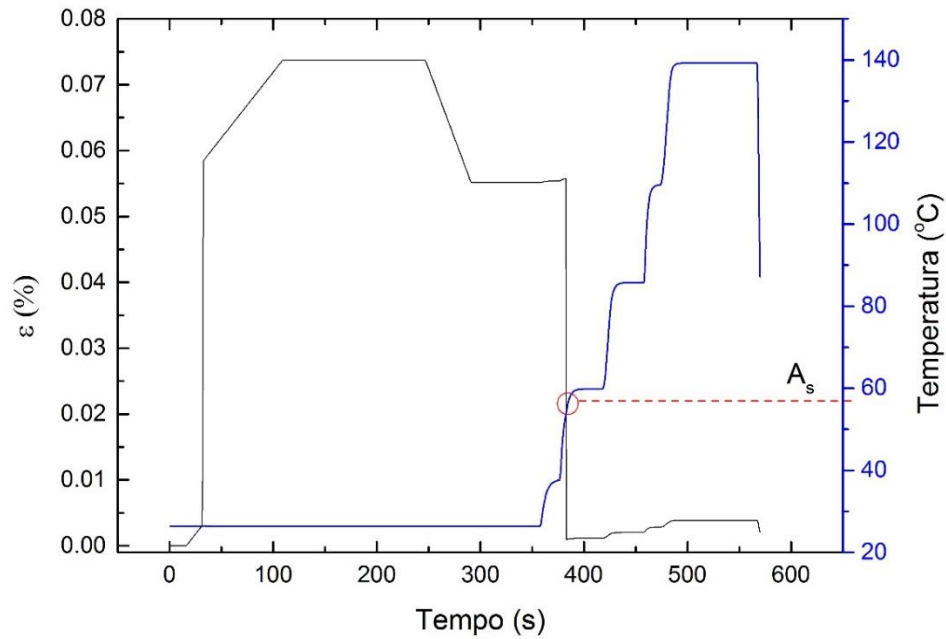
**Figura 32:** Comparação numérico-experimental da curva tensão x deformação.

Como não foi possível fazer medidas diretas de temperatura, utilizou-se o modelo numérico para estimar a temperatura do fio através da Equação (15). A Figura 33 mostra a temperatura em função do tempo. Apesar de não apresentarmos uma técnica para verificação dos resultados de temperatura obtidos numericamente, observou-se que a temperatura de início de transformação de fase para austenita ficou em torno de 58°C (ver Figura 34), próxima ao que o fabricante informou no datasheet do material, que é em torno de 70°C a 90°C.



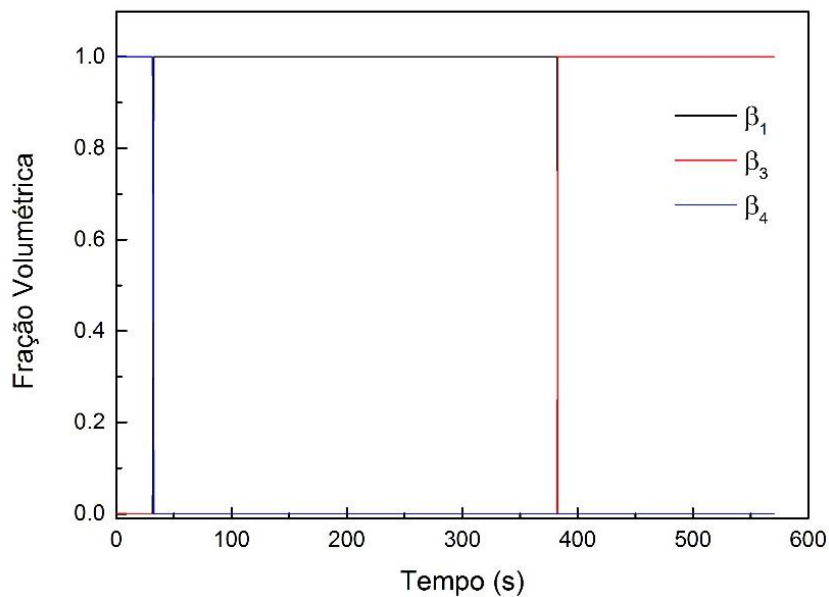
**Figura 33:** Temperatura estimada numericamente em função do tempo.





**Figura 34:** Evolução da temperatura e deformação em função do tempo.

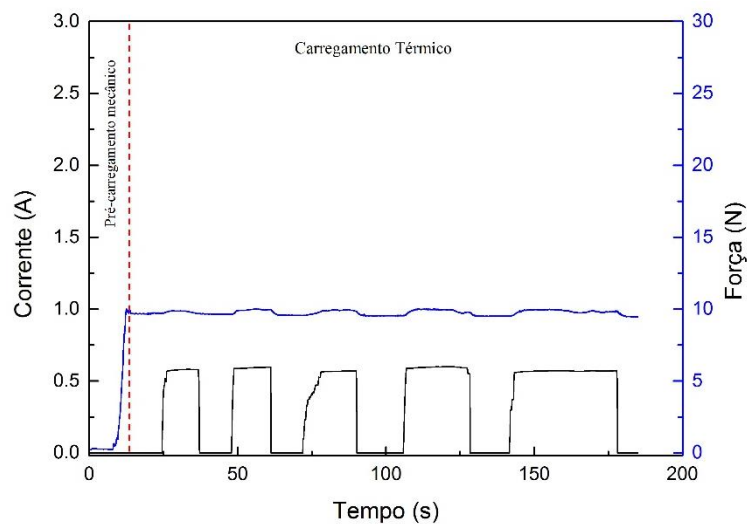
A figura 35 mostra a evolução das frações volumétricas  $\beta_1$  (martensita induzida por tração),  $\beta_3$  (austenita) e  $\beta_4$  (martensita induzida por temperatura). É possível ver que a reorientação da variante martensítica ( $\beta_4 \rightarrow \beta_1$ ) foi completa com o carregamento mecânico imposto e a transformação de fase para austenita também foi completa com o carregamento térmico utilizado ( $\beta_1 \rightarrow \beta_3$ ).



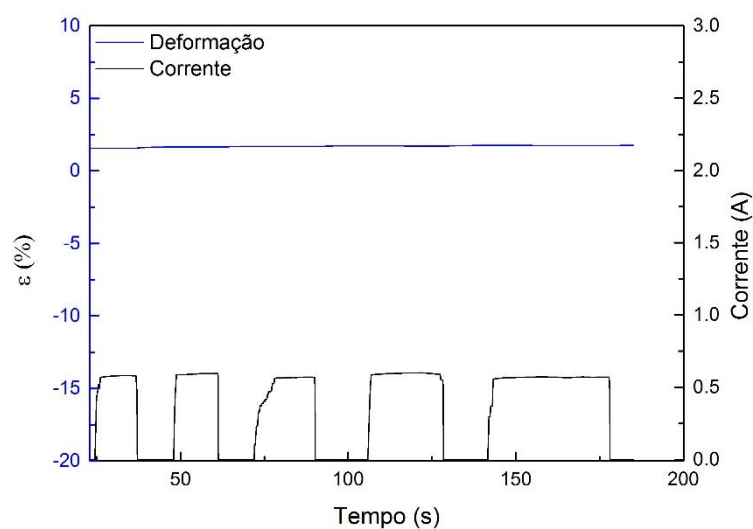
**Figura 35:** Evolução das frações volumétricas em função do tempo.

## 6.2. Memória de forma com Tensão Assistida (Constante)

Apresenta-se agora a os resultados de alguns ensaios realizados com carga mecânica constante durante os ciclos térmicos (procedimentos experimentais apresentados no capítulo 5). A Figura 36 mostra os carregamentos empregados no fio SMA. O fio a temperatura ambiente (martensítico) é carregado com força constante de aproximadamente 10N e subsequentemente são realizados cinco ciclos térmicos através da variação de corrente elétrica de 0 até aproximadamente 0.6A. A Figura 37 mostra a evolução temporal da deformação e da corrente elétrica imposta. Durante os ciclos térmicos, não é possível obter a recuperação da deformação inicial imposta pelo carregamento mecânico.

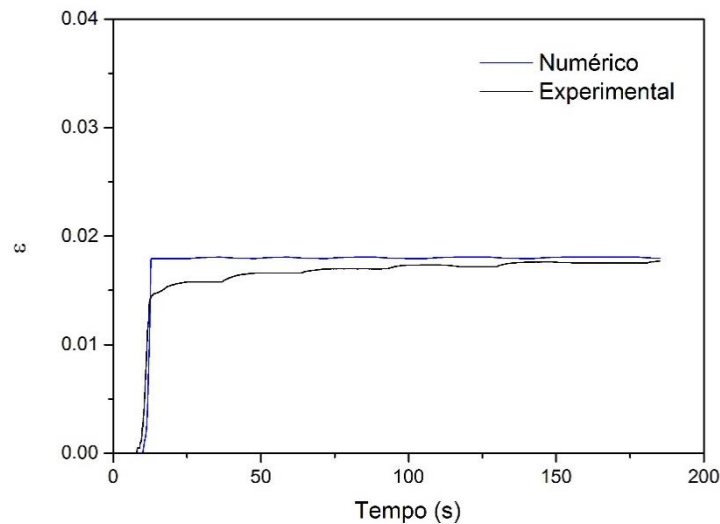


**Figura 36:** Evolução temporal dos carregamentos mecânico e elétrico.

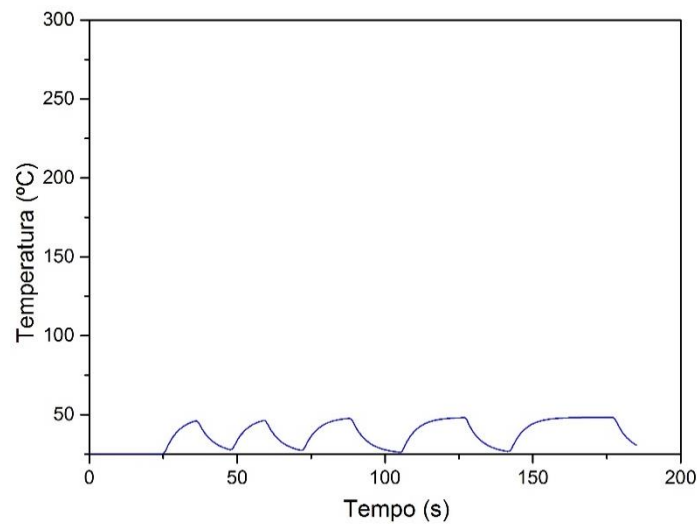


**Figura 37:** Evolução temporal da deformação e corrente elétrica.

A Figura 38 mostra a comparação numérico experimental da deformação em função do tempo, vê-se um bom acordo entre os resultados. O fato de não se obter deformação durante os ciclos de carregamentos térmicos pode ser explicado através da Figura 39, uma vez que a corrente empregada elevou a temperatura do fio até aproximadamente 50°C, temperatura abaixo da temperatura de transformação de fase para austenita.

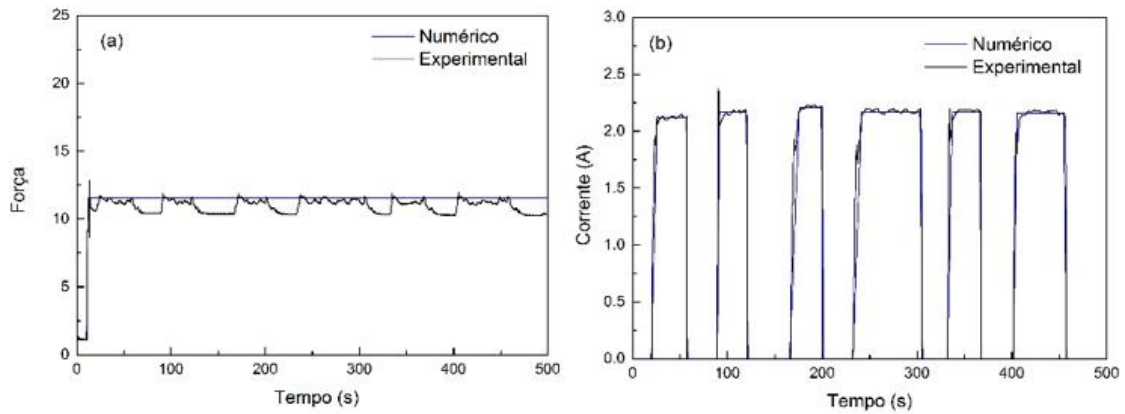


**Figura 38:** Evolução temporal da deformação (numérica e experimental).



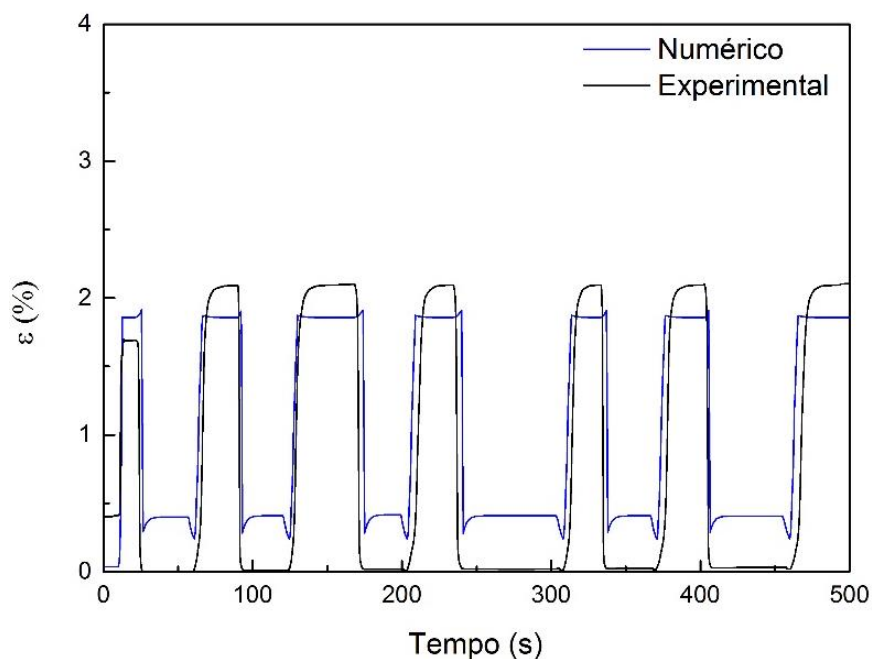
**Figura 39:** Evolução temporal da temperatura.

A Figura 40 mostra o carregamento mecânico com força constante de aproximadamente 10N e subsequentemente são realizados cinco ciclos térmicos através da variação de corrente elétrica de 0 até aproximadamente 2.0A.

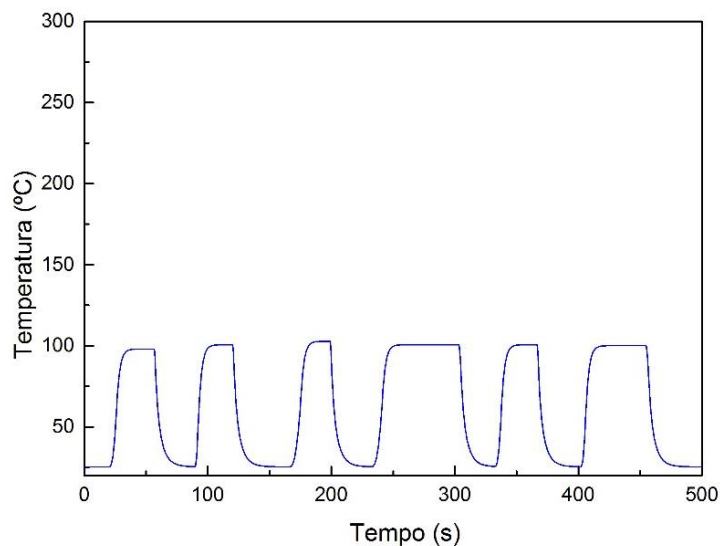


**Figura 40:** Comparação numérico-experimental. (a) carregamento mecânico em função do tempo e (b) corrente elétrica em função do tempo.

A Figura 41 mostra a evolução temporal da deformação. Desta vez é possível notar que a corrente empregada foi suficiente para atuar o dispositivo, resultando em uma deformação de aproximadamente 2%. A carga mecânica no sistema tem baixo valor e não é suficiente para reorientar completamente o material para a variante martensítica não-maclada, o que resulta em uma deformação mais baixa do que a esperada para as SMAs. A Figura 42 mostra a evolução temporal da temperatura. O máximo alcançado é aproximadamente 100°C, suficiente para a começar a transformação de fase para austenita.

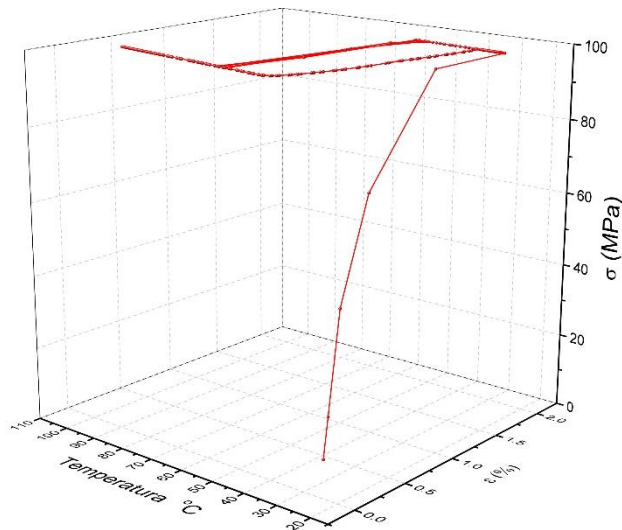


**Figura 41:** Evolução temporal da deformação.



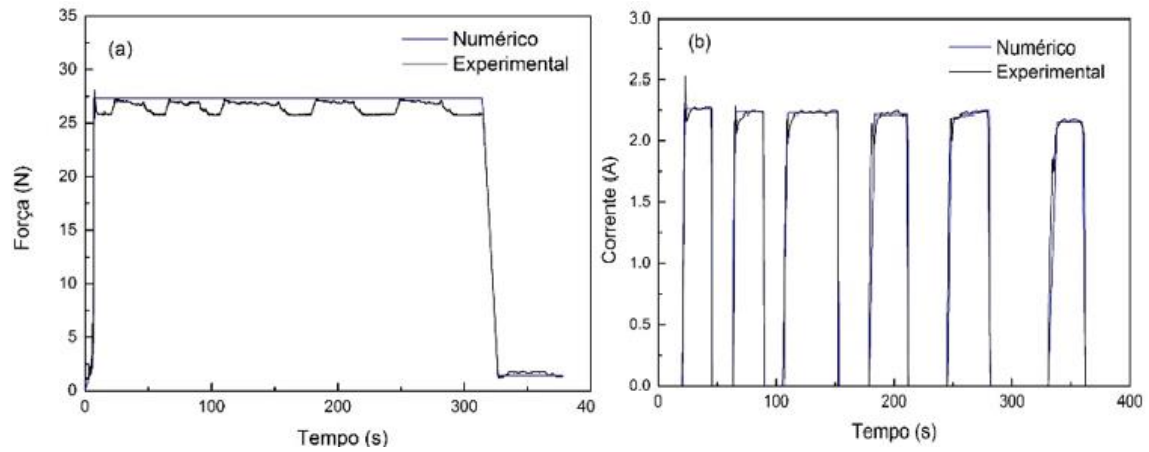
**Figura 42:** Evolução temporal da temperatura.

A Figura 43 mostra os resultados numéricos através da curva tensão x deformação x temperatura. É possível ver os loops de histerese provenientes dos ciclos térmicos com tensão constante, mostrando que é possível obter atuação do dispositivo.



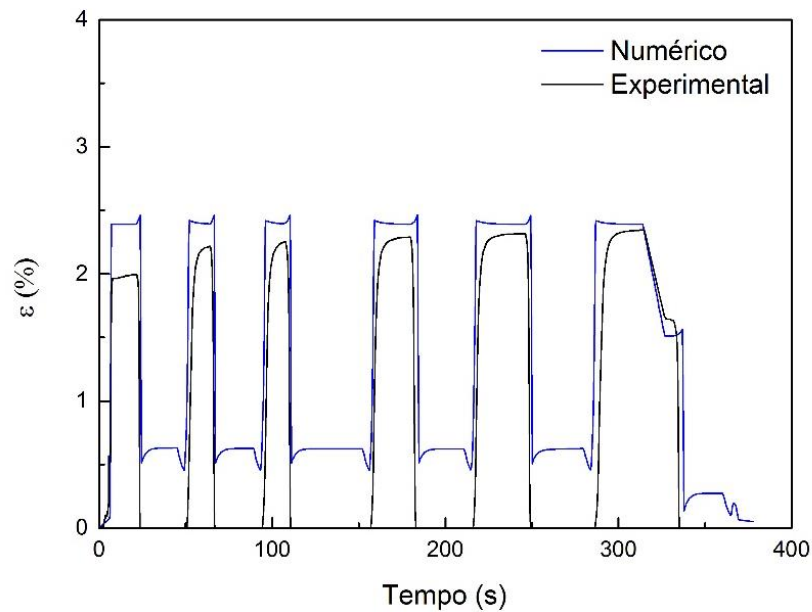
**Figura 43:** tensão x deformação x temperatura.

Por fim, mostra-se a correlação numérico-experimental para o caso em que foi utilizado o carregamento mecânico de 27N e ciclos térmicos através da variação de corrente elétrica de 0 até aproximadamente 2.25A (Figura 44).

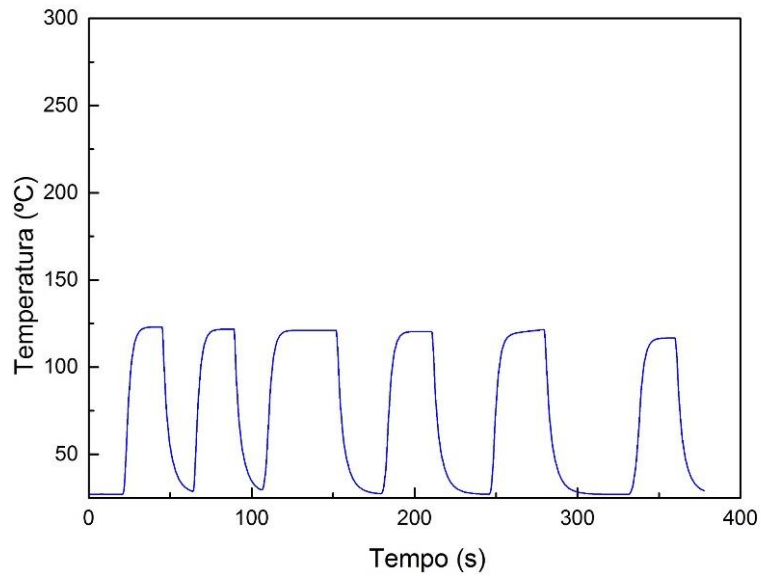


**Figura 44:** Comparação numérico-experimental. (a) carregamento mecânico em função do tempo e (b) corrente elétrica em função do tempo.

A Figura 45 mostra a evolução temporal da deformação e a Figura 46 mostra a evolução temporal da temperatura.

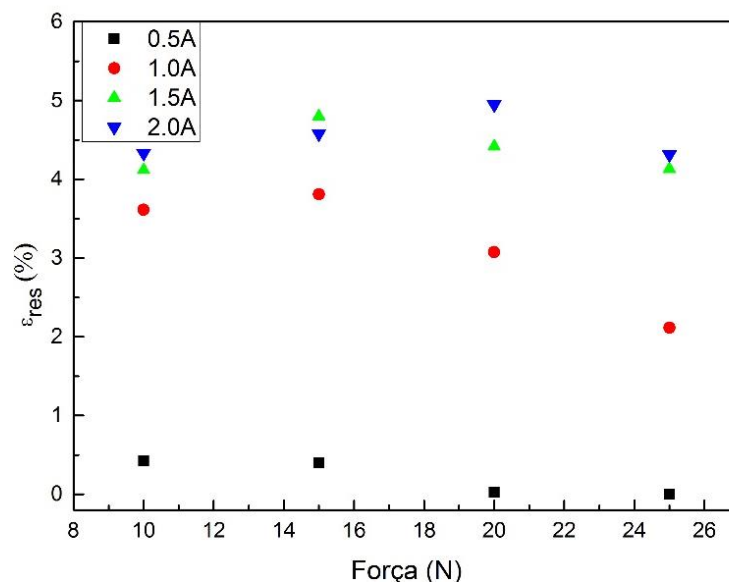


**Figura 45:** Evolução temporal da deformação.



**Figura 46:** Evolução temporal da temperatura.

A Figura 47 mostra uma comparação de todos os ensaios realizados com diferentes valores de carga mecânica e corrente elétrica. A deformação residual ( $\epsilon_{res}$ ) é a diferença entre o valor máximo de deformação e o mínimo durante um ciclo térmico. Pode-se ver que os valores de  $\epsilon_{res}$  obtidos com ciclos de 1.5A e 2.0A são bastante próximos, o que significa que é possível obter valores ótimos de atuação com uma potência de entrada menor, reduzindo a demanda energética.



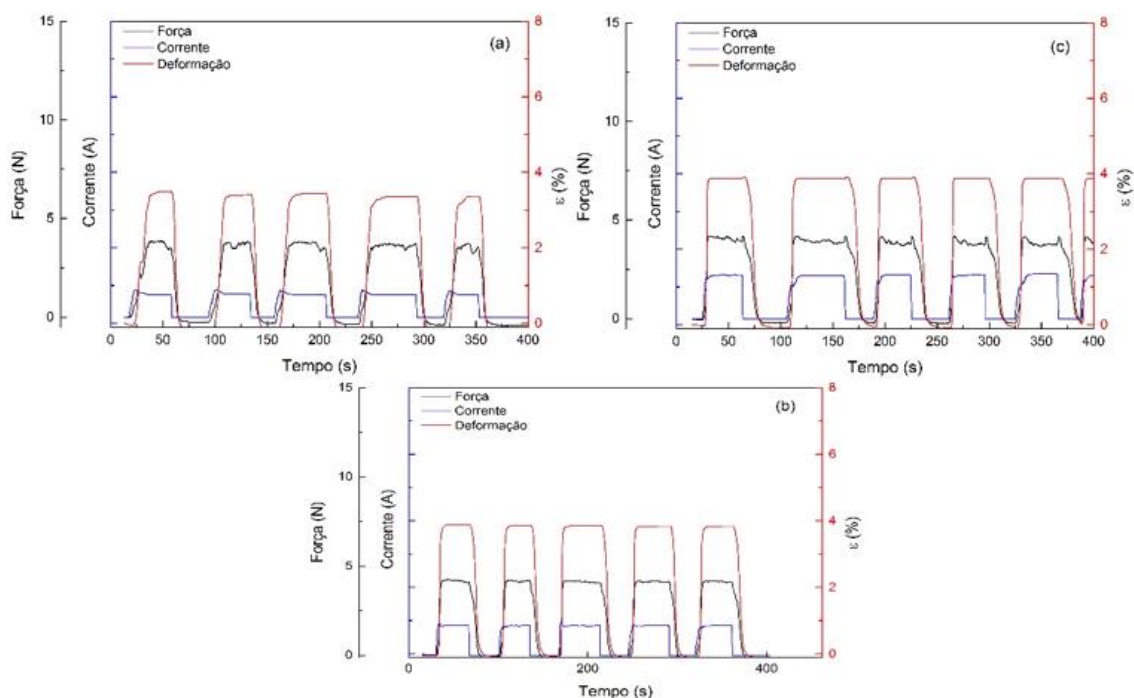
**Figura 47:** Comparação entre todos os resultados obtidos com diferentes valores de carga mecânica (constante ao longo do ensaio) e corrente elétrica.

Estes resultados mostram também que o modelo numérico reproduz satisfatoriamente os resultados experimentais e pode ser utilizado para simular diferentes carregamentos mecânicos e térmicos possibilitando um posterior estudo paramétrico do dispositivo.

### **6. 3. Memória de forma com Tensão Assistida (variável)**

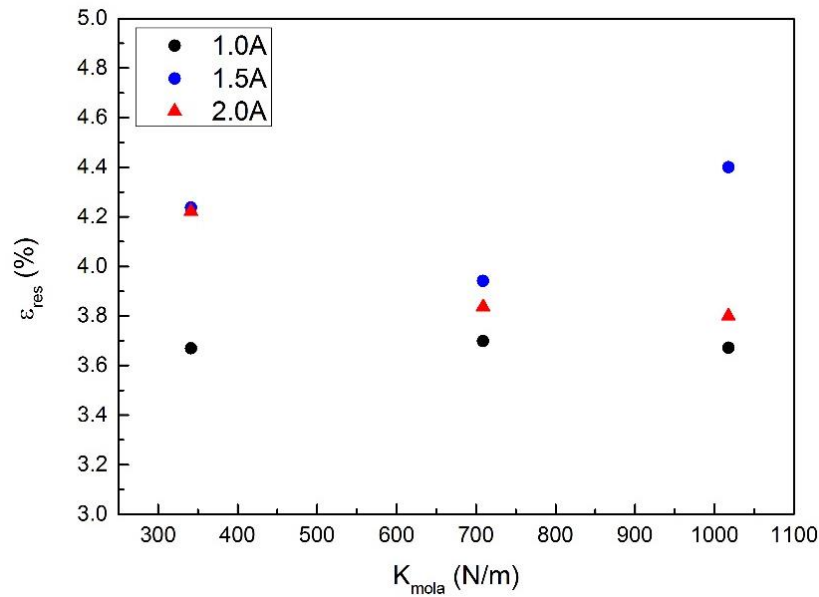
Por fim, mostra-se os resultados do sistema fio SMA conectado a uma mola convencional. Como o projeto da válvula inteligente fará uso deste tipo de atuação (ver capítulo 7), o estudo deste sistema é de extrema relevância para otimização do dispositivo considerando diferentes molas e correntes elétricas de acionamento. A Figura 48 mostra os resultados obtidos de força, corrente e deformação em função do tempo para ensaios com a mola com constante elástica de 708,9 N/m (mola 1) para testes realizados com diferentes níveis de corrente elétrica (a) 1A, (b) 1,5A e (c) 2,0A. Nota-se uma variação de deformação muito discreta entre as correntes de 1,5 e 2,0 A. Objetivando a menor demanda energética possível, com garantia de atuação, vê-se que corrente elétrica de 1,5 A é suficiente para atuar o dispositivo com um nível de deformação de aproximadamente 4%. Este resultado corrobora com os resultados obtidos na seção anterior.





**Figura 48:** Resultados de força, corrente e deformação em função do tempo para ensaios com a mola com constante elástica de 708,9 N/m para testes realizados com (a) 1A, (b) 1,5A e (c) 2,0A.

Os mesmos ensaios foram realizados com as molas 2 e 3 apresentadas na Tabela 6, lembrando que as molas 2 e 3 apresentam as constantes elásticas de 1017,7 N/m e 341,4 N/m, respectivamente. Os resultados em função do tempo não são mostrados para evitar repetição, uma vez que, os comportamentos são semelhantes, embora os valores de atuação atingidos sejam diferentes. A Figura 49 mostra uma comparação dos resultados com as 3 diferentes molas para diferentes valores de corrente elétrica. A deformação residual ( $\epsilon_{res}$ ) é a diferença entre o valor máximo de deformação e o mínimo durante um ciclo térmico.



**Figura 49:** Comparação entre os resultados com diferentes molas obtidos com diferentes valores de corrente elétrica.

Portanto, pode-se ver que o uso do sistema acoplado mola convencional e fio SMA se mostra bastante promissor para uso como atuador para os mais diferentes sistemas mecânicos.

Apesar de apresentarmos o desenvolvimento do modelo numérico baseado no método de elementos finitos na Metodologia (seção 4.1.2) para reproduzir os ensaios experimentais do sistema mola acoplado fio SMA, estes resultados não foram apresentados neste trabalho, pois o modelo se encontra em desenvolvimento e não foi possível fazer a correlação numérico experimental deste conjunto de ensaios experimentais. Ainda sim, decidiu-se manter esta seção na metodologia para fins de consulta para futuros trabalhos.

## Capítulo 7

### Concepção de Atuação da Válvula

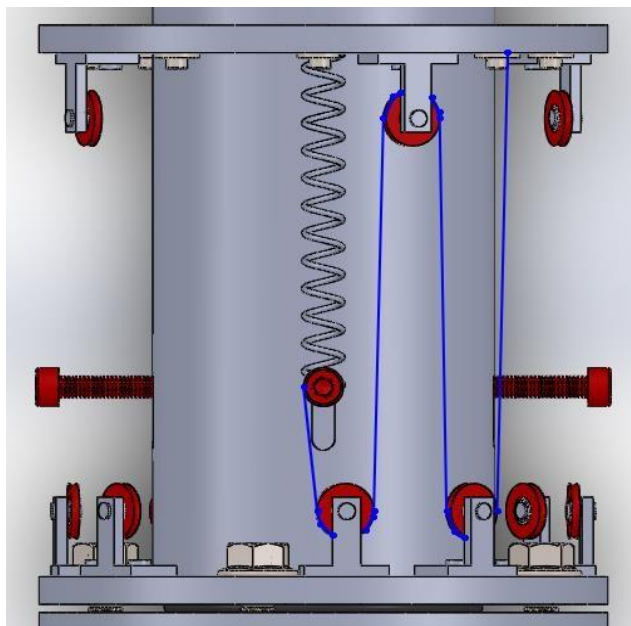
O modelo de válvula proposto foi elaborado com um propósito de viabilizar uma concepção que, com um pouco mais de aprofundamento, pesquisa e investimento, se possa automatizar todo o funcionamento da válvula. A válvula terá como acionamento fios de liga de memória de forma que serão responsáveis pela abertura para a passagem de fluxo e molas lineares que farão com que a válvula trabalhe normalmente fechada.

Apesar do projeto inicial ser elaborado para um determinado sentido de fluxo e condição de trabalho (normalmente fechada) pré-estabelecidas. No entanto é possível, por algum motivo extraordinário, tanto inverter o sentido de fluxo como trabalhar em regime normalmente aberto sem precisar mudar a geometria física da válvula. Para tal, basta adaptar o projeto e inserir uma trava que evite que a força da mola feche a válvula mesmo depois de cessar a corrente nos fios de memória de forma, podendo assim, trabalhar na condição normalmente aberta também.

A atuação pela SMA será obtida por ciclos térmicos e a variação de temperatura no fio SMA e é produzida por efeito Joule através de uma corrente elétrica aplicada no fio usando uma fonte de corrente.

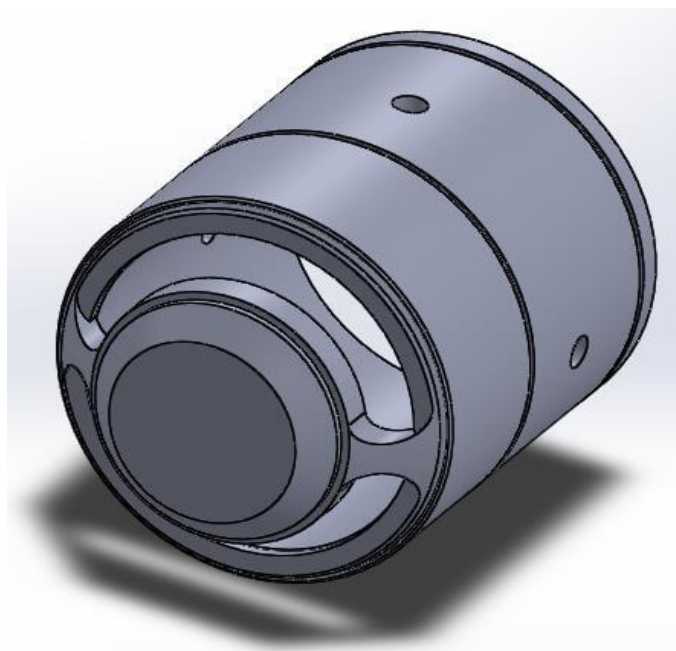
#### 7.1. Geometria da válvula

O escopo final do protótipo da válvula, pode ser visto na Figura 50 e observa-se que a entrada e saída de fluxo são dispostas no mesmo sentido, ou seja, não existe mudança de direção do caminho do fluxo, isso pode facilitar nas instalações e evitar curvas indesejáveis que venham a causar perda de carga. Outra característica da válvula é a simplicidade do funcionamento, trata-se basicamente de um sistema “pistão agulha”.



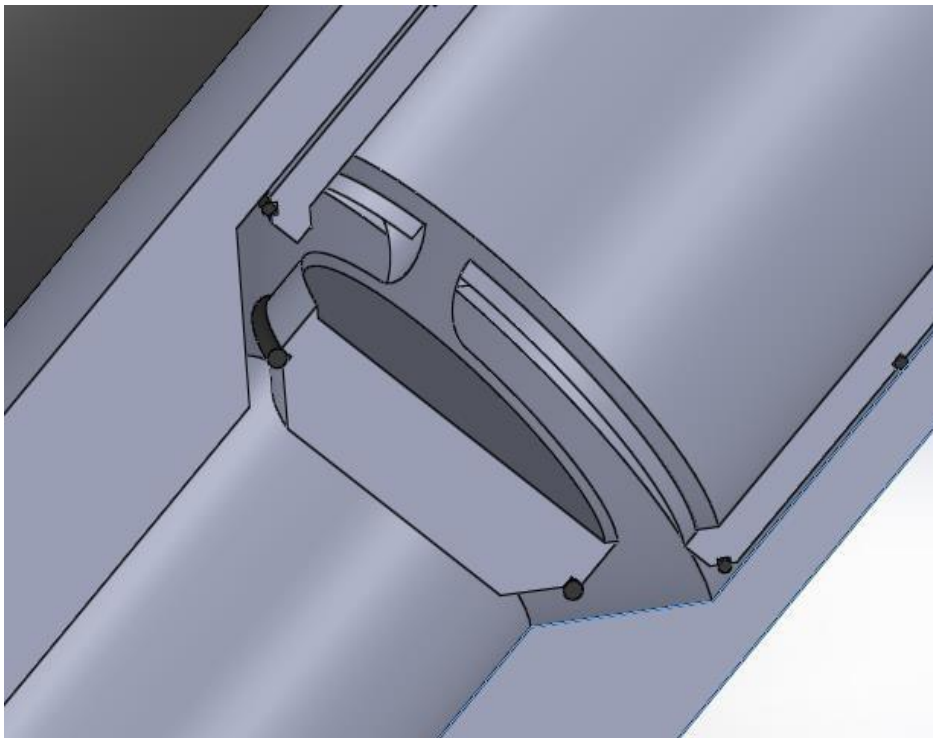
**Figura 50:** Montagem da válvula com fio SMA e mola elástica (Fonte: autor).

A escolha pelo funcionamento do pistão foi principalmente para aumentar a viabilidade de isolar externamente os fios de memória de forma do fluido, que precisam receber uma corrente para serem termicamente ativados. De outra maneira, em contato com o fluido, trocaria muito calor e impossibilitaria seu aquecimento até mesmo pela fuga de corrente. Neste caso, o fluxo passa por dentro do pistão e é vazado por cavas feitas na “cabeça agulha” do pistão como mostra a Figura 51.



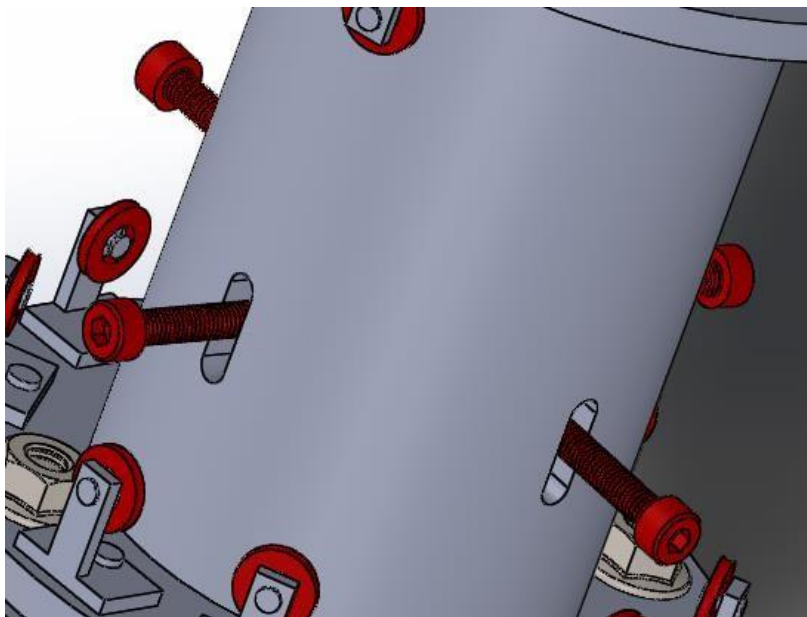
**Figura 51:** Pistão vazado com cavas para passagem de fluido (Fonte: autor).

Como os fios de memória de forma podem ser alongados em no máximo 8% sem que haja plastificação e já que foi proposto neste trabalho trabalhá-los até no máximo 4% de deformação para evitar a fadiga funcional e conforme os resultados experimentais obtidos neste trabalho, surgiu o desafio de aproveitar o máximo de abertura de fluxo tendo um deslocamento razoavelmente curto do pistão (cerca de 4 mm). A escolha pelo sistema semelhante ao de agulha (Figura 52) foi para que se possa ter um controle melhor da vazão e um aumento de liberação exponencial do fluxo.



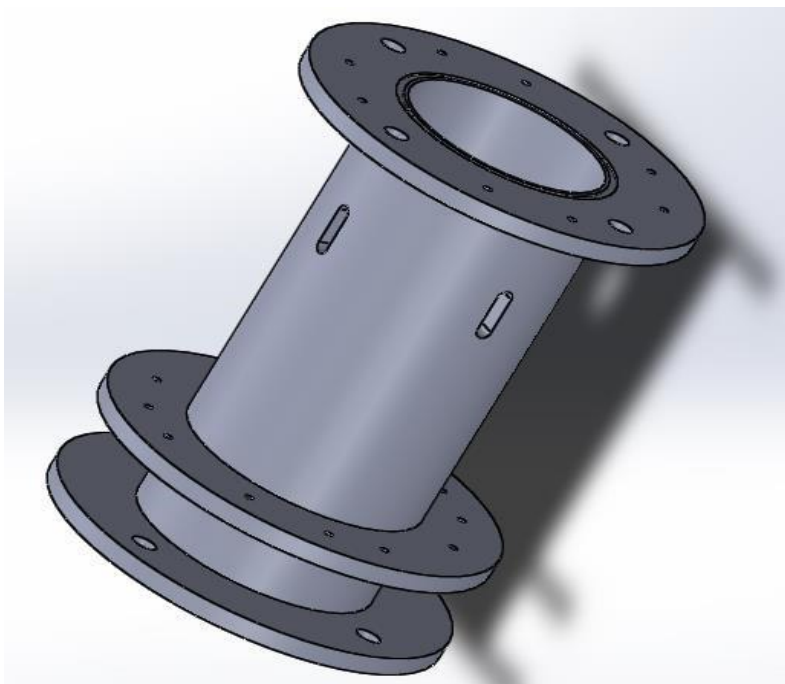
**Figura 52:** Vista em corte do pistão vazado dentro do cilindro da válvula (Fonte: autor).

Quatro parafusos Allen de nylon servem como hastes e são distribuídos de maneira equidistante, parafusadas na lateral do pistão (Figura 53) e fazem suporte da extremidade das molas e fios de memória de forma, que geram as forças contrárias responsáveis por abrir e fechar a válvula. Essas hastes partem do pistão e atravessam a camisa restringindo seu movimento por meio de quatro cavas que são encontradas nas paredes das camisas, possibilitando as hastes ficarem expostas ao meio externo.



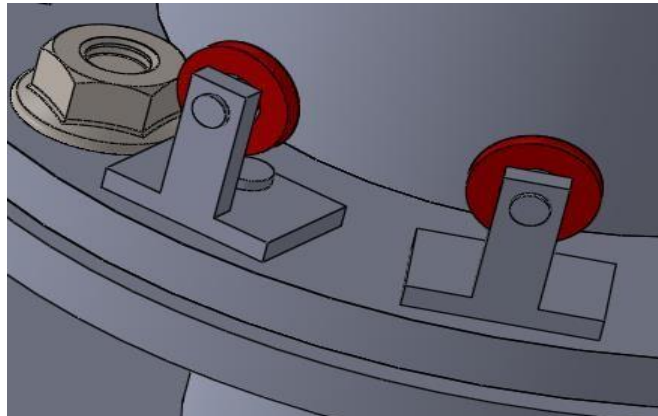
**Figura 53:** Detalhe das 4 hastes expostas que transferem força para o pistão (Fonte: autor).

A camisa tem o formato cilíndrico (Figura 54) e inicialmente é do mesmo material que o pistão (Alumínio), porém possuem um flange nas suas extremidades que além de servirem para unir a tubulação a válvula, também servem de suporte para as molas e as roldanas por onde os fios de memória de forma irão passar. O flange superior possui furos M6 para fazer o fechamento da válvula na tubulação



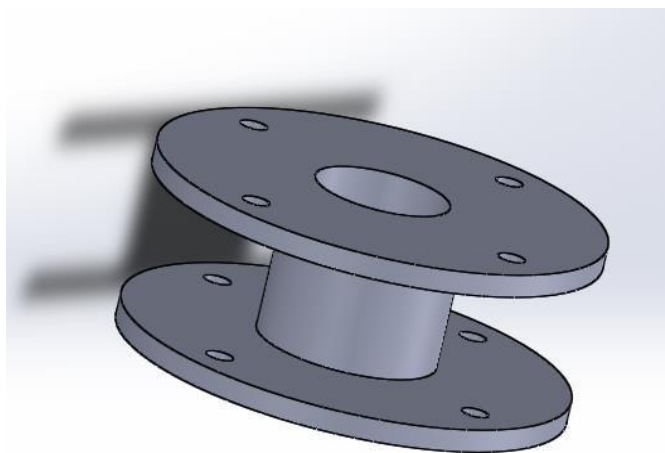
**Figura 54:** Camisa da válvula com as cavas para as hastes (Fonte: autor).

Esse sistema de roldanas foi inspirado a ser criado devido ao pouco espaço físico disponível para disposição dos fios, visto que ele só será alongado cerca de 4% de seu tamanho. Através das roldanas (Figura 55), podemos fazer uma disposição de fios com o objetivo de aumentar seu comprimento total, possibilitando assim um alongamento maior e em consequência um deslocamento maior do pistão. Além disso, suas extremidades estão fixadas e isoladas para que a corrente passe apenas pelo fio.



**Figura 55:** Detalhe das roldanas de nylon que suportam os fios de memória de forma (Fonte: autor).

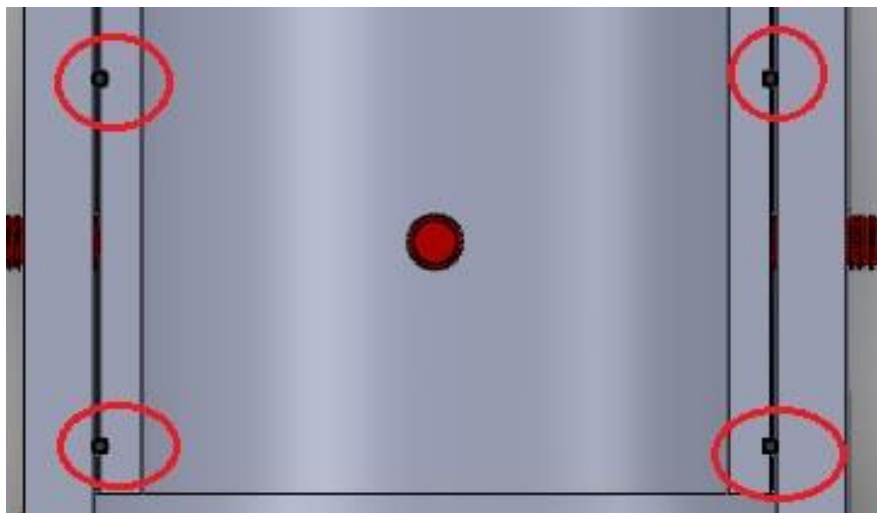
O flange de fechamento da válvula possui quatro furos para parafusos M4 em uma das suas extremidades (Figura 56) que garantem a compressão necessária no O'ring de vedação válvula x flange e quatro furos M6 para fazer o fechamento da tubulação por onde está entrando o fluxo.



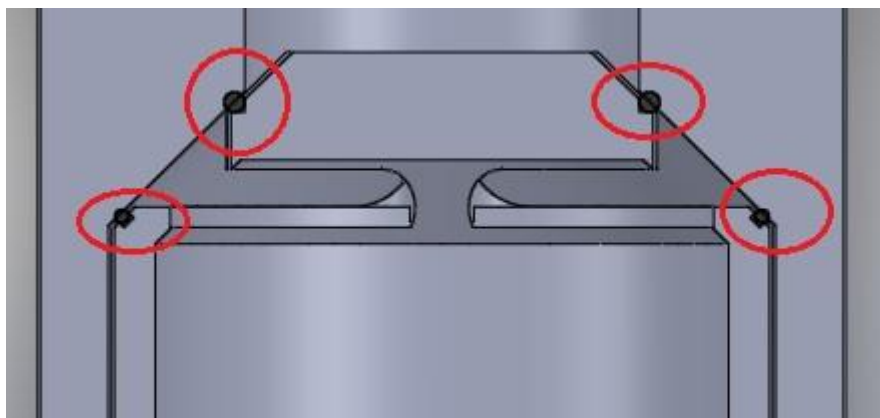
**Figura 56:** Flange de união entre válvula e tubulação (Fonte: autor).

## 7.2. Sistema de vedação

O sistema de vedação dinâmico ocorre por meio de dois O’rings (Figura 57 e 58) proporcionam uma vedação adequada para que o fluxo seja totalmente interrompido. Trata-se de dois O’rings localizados antes e depois do início das cavas da camisa e são responsáveis para não permitirem a passagem de fluido para o lado de fora da válvula, isolando o fluido no interior da câmara.



**Figura 57:** Vista em corte dos O’rings que garantem vedação dinâmica (Fonte: autor).

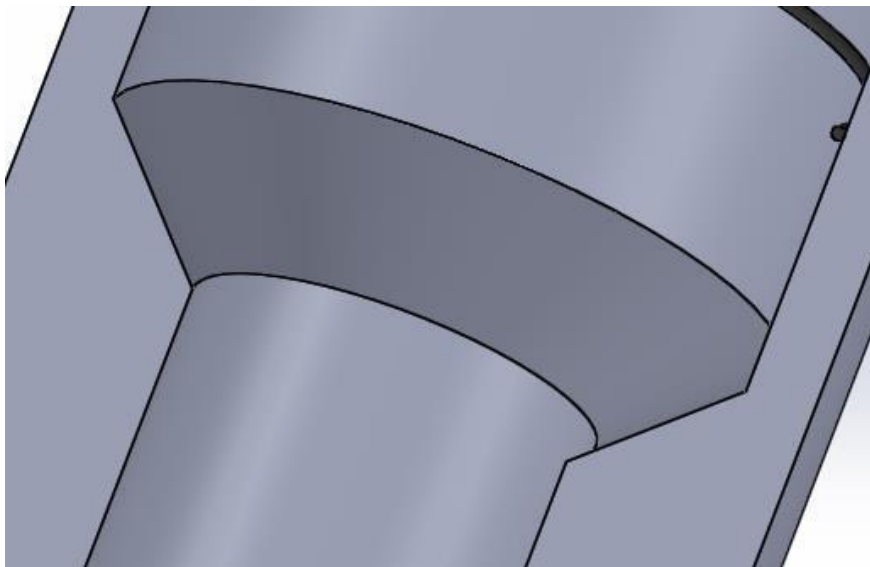


**Figura 58:** Detalhes dos O’rings que garantem vedação no fechamento da válvula (Fonte: autor).

A camisa que suportará o pistão deverá após usinada, ser internamente polida com lixas de água com granulometria 1200 ou superior a ponto de reduzir ao máximo o atrito entre O’ring e metal. A parte inferior interna da camisa terá uma redução de diâmetro com geometria em ângulo (Figura 59) de maneira que o pistão assente e proporcione uma



superfície lisa e regular para a vedação do O’ring. Esse processo de lixamento será registrado e apresentado mais adiante.



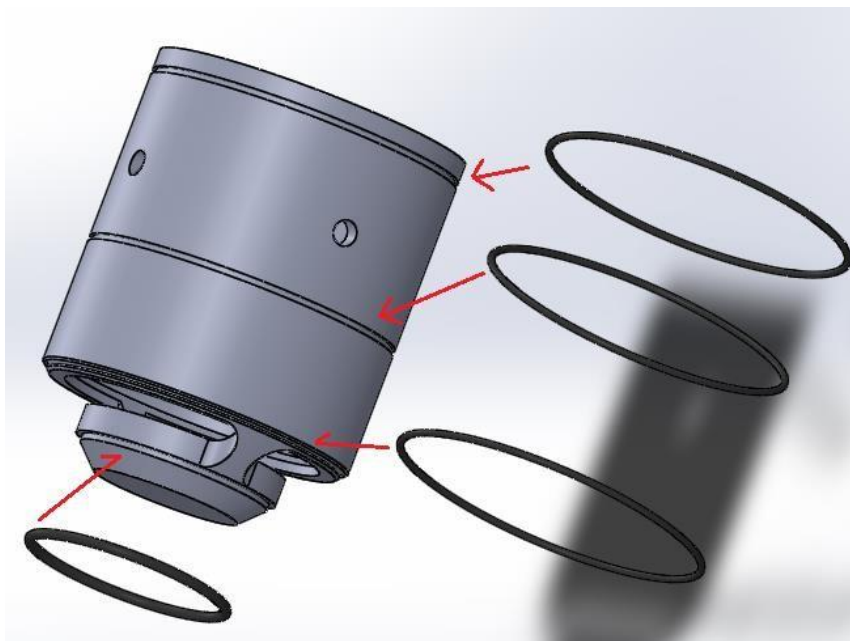
**Figura 59:** Vista em corte da camisa mostrando a base em ângulo (Fonte: autor).

O flange que fecha a válvula, enclausurando o pistão dentro da camisa, possui uma cava no seu lado superior para assentamento de um O’ring de borracha para garantir a vedação do sistema além de servir como suporte para as roldanas como já mencionado anteriormente.

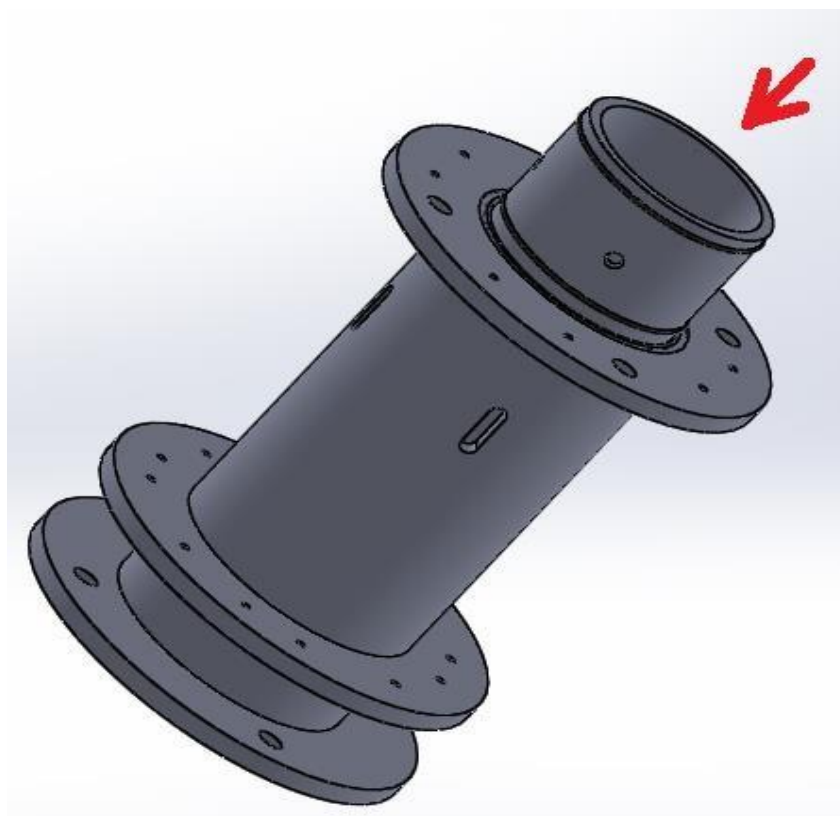
### 7.3. Processo de montagem

O processo de fabricação é relativamente simples, com um tarugo de alumínio (material inicialmente proposto) e algumas etapas de fresagem e tornearia, é possível se produzir este modelo de válvula.

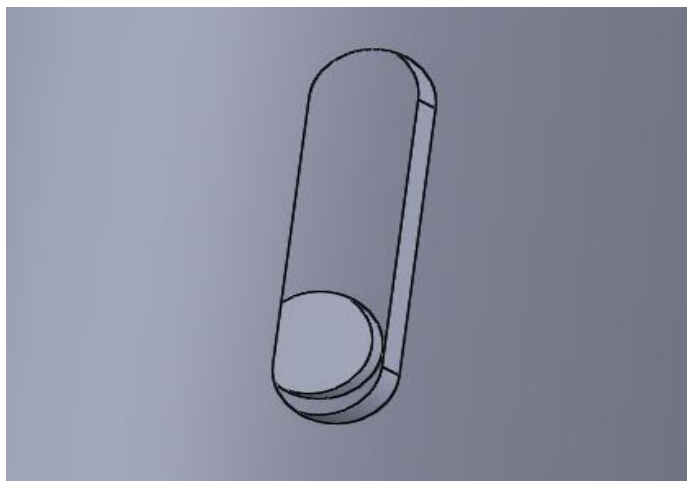
O processo de montagem é simples, tendo em mão todas as peças anteriormente citadas, primeiramente encaixa-se os O rings nos seus devidos lugares (cavas no Pistão) como ilustrado na Figura 60, em seguida coloca-se o pistão sem as hastes parafusadas dentro da camisa (Figura 61). Depois alinha-se os quatro furos do pistão com as quatro cavas da camisa, parafusando as quatro hastes, encaixando o O ring do flange de fechamento na sua cava (Figura 62), em seguida o flange de fechamento e parafusando os quatro parafusos M4, processo mostrado na Figura 63.



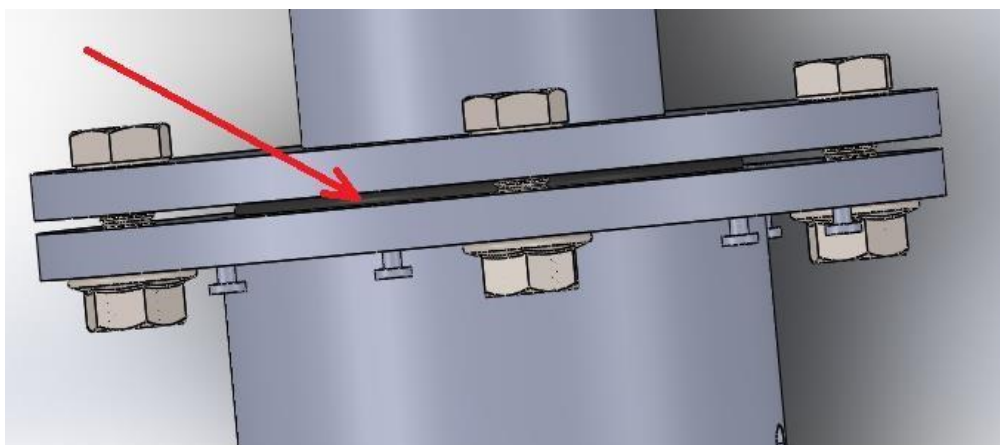
**Figura 60:** Locais onde deve ser encaixados os O'rings (Fonte: autor).



**Figura 61:** Encaixe do pistão com os o' rings na camisa (Fonte: autor).

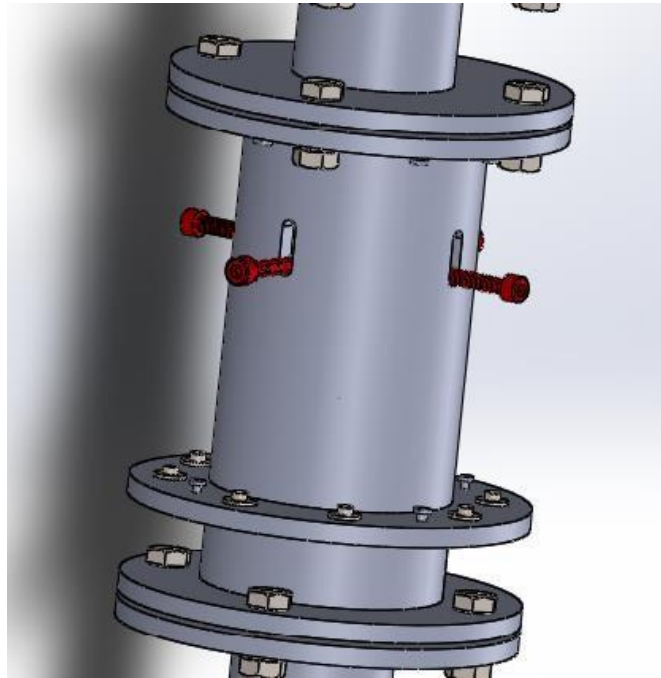


**Figura 62:** Detalhe da cava da camisa alinhado com o furo da haste do pistão (Fonte: autor).



**Figura 63:** Detalhe do flange e da válvula unidos com um O'ring (Fonte: autor).

Agora, com a válvula bruta montada (Figura 64), é preciso aparafusar as roldanas (pré-fabricadas em rolamento) que serão fixadas na parte interior do flange do cilindro. Essas fixações serão feitas por parafusos compatíveis com as roldanas encontradas no mercado ou arrebitadas já nas posições que devem trabalhar, acompanhando a circunferência da válvula de maneira a evitar o máximo o atrito do fio com a roldana como mostrado anteriormente na Figura 56.

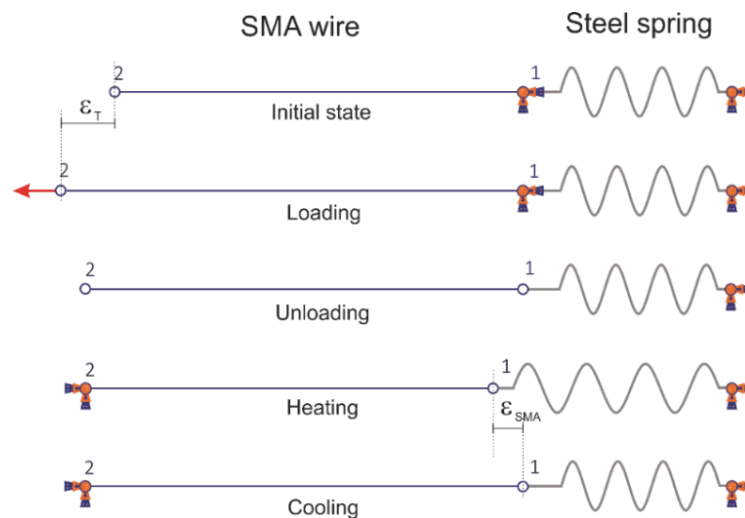


**Figura 64:** Válvula pré montada (Fonte: autor).

As passagens do fio pelas roldanas terminam com suas extremidades fixas e isoladas e isso ocorre nos quatro cantos da válvula, dessa forma garantimos que a corrente entra por uma extremidade, percorre todo o fio de memória de forma, inclusive pelas roldanas isolantes (de nylon) e sai na outra extremidade, cumprindo sua única função de aquecer o fio resultando no retorno de sua forma inicial.

#### **7.4. Princípio de funcionamento do atuador inteligente**

O princípio de funcionamento pode ser ilustrado na Figura 65, onde primeiramente, durante a montagem, o fio estará no seu estado inicial (martensita maclada). Com isso, é feito um pré-carregamento mecânico para garantir a total reorientação para a variante não-maclada. Somente aí o fio de memória de forma deformado será fixado na haste, passado pelas roldanas e fixado na outra extremidade.



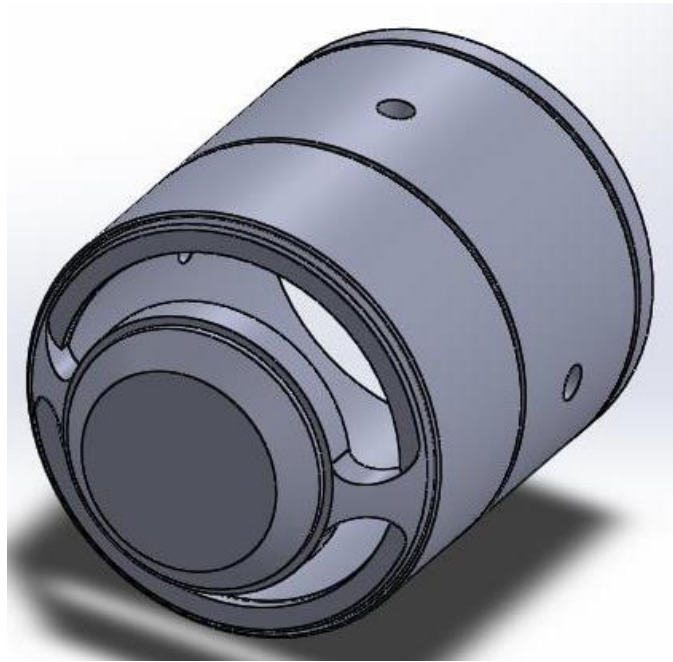
**Figura 65:** Diagrama simplificado da atuação do sistema fio SMA-mola convencional.

Feito isso com os 4 fios, inicia-se a instalação das molas que farão força para fechar o pistão. A seguir, quando se aplica uma corrente elétrica nos fios de memória de forma aquecendo-os, fazendo a transformação de martensita não-maclada para austenita, reduzindo seu comprimento e assim, se sobrepondo a força da mola, abrindo o sistema pistão-agulha e liberando o fluxo do fluido.

## 7.5. Cálculo da Força de uma Válvula com Atuador SMA

Deverá ser calculado a força que a pressão ( $F_p$ ) de água dentro da tubulação fará no pistão, de maneira a mantê-lo fechado. O fio SMA deverá superar inicialmente além da força da mola, esta força de pressão.

Por se tratar de uma válvula tipo “pistão agulha”, a água passa por dentro do pistão e escoar por cavidades que se encontram nas extremidades do pistão, como mostra na Figura 66. Durante esse escoamento por dentro do pistão, o fluido encontra uma resistência oferecida pela área plana de material que está perpendicularmente ao movimento do fluido. Portanto, conforme o fluido se desloca, ele provoca uma força de arrasto no sentido a favor das forças das molas que mantem o pistão normalmente fechado e contra a força dos fios SMA que ao aplicar a corrente elétrica faz com que a mola seja tencionada e o fluxo, então, é liberado.



**Figura 66:** Pistão Vazado (Fonte: autor).

Como o sistema é composto por O’rings que garantem vedação, existe também a força de atrito entre as paredes internas da camisa e os orings, porém neste caso, será desprezado uma vez que as paredes internas da camisa e externa do pistão deve possuir um desbaste bastante refinado, aumentando gradualmente a sua granulometria chegando até a lixa 1200 e finalizado com um polimento. Dessa maneira será desprezado o atrito nos cálculos a seguir.

O gráfico na Figura 67 (sistema fio SMA + mola 2), indica que no experimento a força resultante exercida pelo fio no sistema, foi o suficiente para vencer a força da mola, porém em aplicação na válvula, o fio deve vencer também a força inicial de pressão da própria linha de água e após vencida essa força precisará vencer a força de arrasto e a de atrito (neste caso desprezada). Então será analisado inicialmente a força de pressão na linha.

$$F_f > F_p + Fm$$

$$F_p = P * A \text{ onde } P = \rho gh$$

onde:

$$F_f = \text{Força de contração do fio (N)}$$

$$F_p = \text{Força de pressão (N)}$$

$F_m$  = Força da mola (N)

$P$  = Pressão na linha (Pa) = 45.050 Pa

$A$  = Área (m<sup>2</sup>) = 0,00049 m<sup>2</sup>

$g$  = Aceleração da gravidade (9.81 m/s<sup>2</sup> )

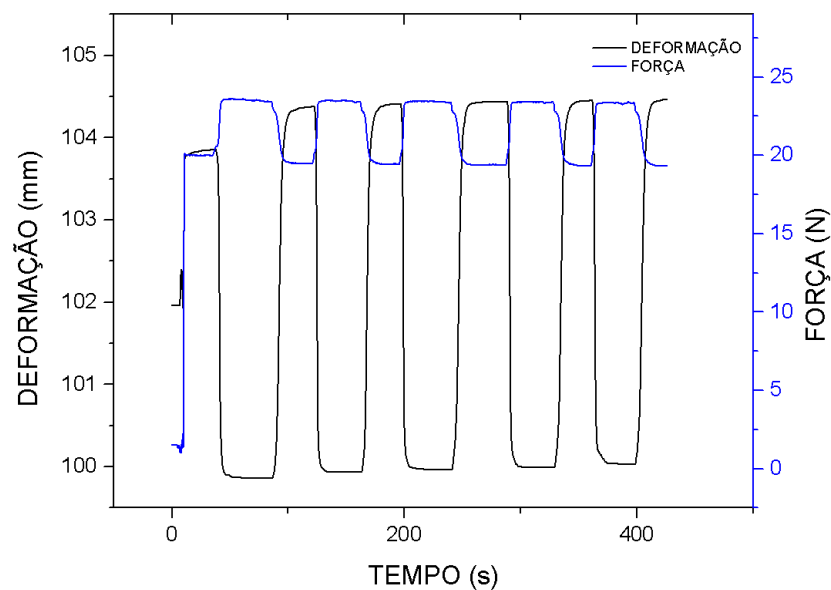
$\rho$  = Massa específica (Kg/m<sup>3</sup>)

Então trabalhando com uma linha que possui uma coluna de água de 5 m e onde  $\rho = 1000$  Kg/ m<sup>3</sup> temos:

$P = 1000 * 9.81 * 5 = 49.050 Pa$

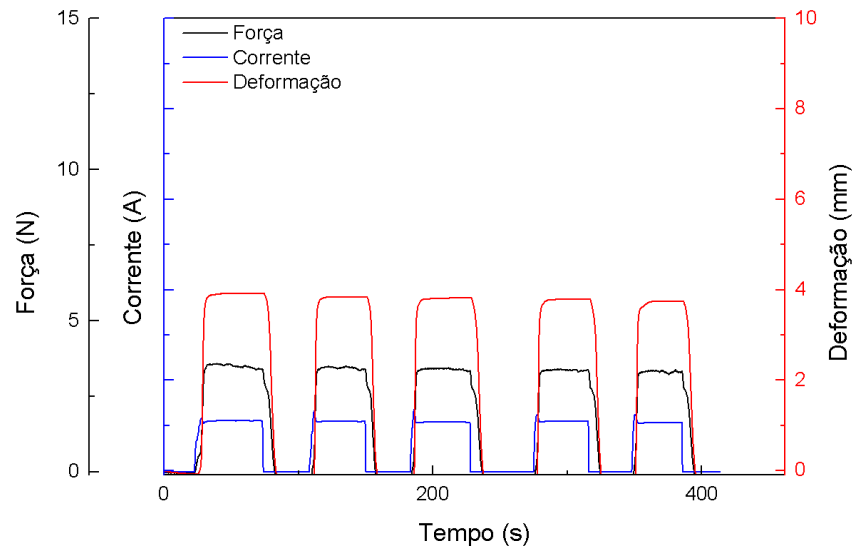
$F_p = 49.050 * 0,00049 = 24,06 N$

Logo, a força de fechamento que a pressão de coluna de água exerce na válvula é de 24,06 N. Em uma situação em que a válvula funciona sem passagem de fluido, ou seja, somente a força da mola contrária a força do fio como é mostrado no gráfico da figura 67, a força no sistema durante a fase fechada da válvula é de aproximadamente 19,5 N, e quando o fio é acionado a força no sistema se eleva para aproximadamente 23 N. Logo, a força de contração do fio  $F_f$  é de aproximadamente 23 N após um deslocamento de 4 mm.



**Figura 67:** Gráfico Alongamento x força do sistema Fio SMA conectado a mola 2.

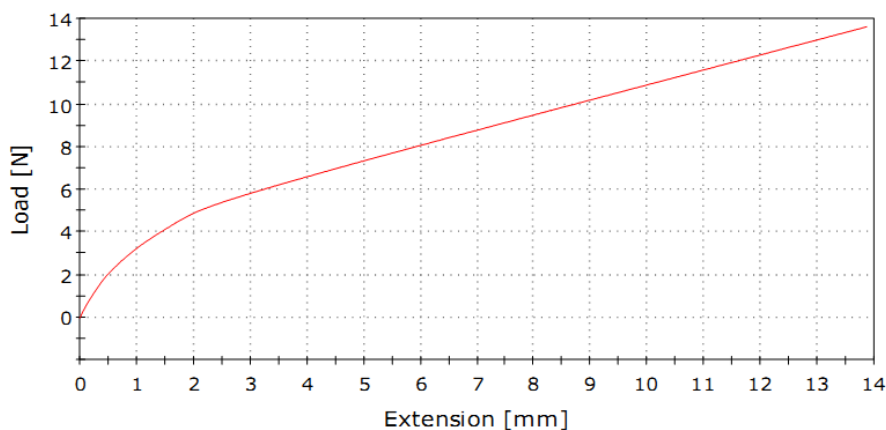
Neste gráfico a seguir (Figura 68) é possível observar a corrente utilizada nesses testes específicos que determinaram quais as configurações de molas e correntes devem ser utilizadas para a fabricação do protótipo.



**Figura 68:** Força, corrente e deslocamento do Fio SMA conectado a mola 2.

### 7.5.1. Deformação Inicial da Mola

A força da mola 2 em função do seu deslocamento pode ser visualizada na figura 69, na qual se deve notar que para a mola trabalhar num regime linear de aumento de força em função do seu deslocamento, é preciso que ela seja submetida a um alongamento inicial de no mínimo 3 mm na qual apresentaria força de 6 N, porém será encontrado o deslocamento inicial ideal da mola para o funcionamento do protótipo.



**Figura 69:** Curva tensão deformação da Mola 2.



Para determinar qual o alongamento inicial da mola para a utilização deste protótipo com passagem de água, uma vez que já está identificada por  $F_p$ , que é a força realizada pela pressão de água dentro da tubulação, nas seguintes condições anteriormente propostas (Coluna de água de 5 m e pressão interna na linha de 49.050 Pa) onde foram encontradas  $F_p = 24,06$  N e  $F_f = 23$  N

Primeiramente é preciso pelo menos dobrar  $F_f$ , uma vez que, diferentemente do experimento em laboratório no qual o fio SMA deve apenas superar a força gerada pela mola, em aplicação real, o fio deve também superar inicialmente a força  $F_p$  junto a  $F_m$ . Porém, é possível contornar esse problema graças a geometria da válvula (protótipo inicial) que permite ser instalado até quatro fios SMA e até quatro molas, de modo que se forem usadas duas molas com essas características já apresentadas e quatro fios com as características também apresentadas, seria possível alcançar valores de força maiores no sistema de modo que  $F_f$  pudesse mais do que dobrar. Então assumindo o uso de quatro fios e duas molas com as respectivas características apresentadas temos:

$$F_f > F_p + F_m \text{ (Para que haja movimento de abertura da válvula.)}$$

$$2 * 23 > 24,06 + (F_m * 2)$$

$$F_m < 10,97 \text{ N}$$

Então cada mola deverá ter uma força final menor 10,97 N. Desse modo é possível através do gráfico da mola 2, determinar o alongamento final das duas molas nesse sistema que é igual a 9 mm (válvula totalmente aberta). Por possuir curso de 4 mm em cada ciclo termomecânico, logo o alongamento inicial da mola em posição fechada deve ser igual a 5mm.

### 7.5.2. Cálculo da Força de Arrasto

Após o acionamento térmico do fio, eles irão vencer inicialmente a força da mola e a força gerada no pistão contrária a abertura, abrindo a válvula. É exatamente onde o fluido adquire velocidade na linha e surge uma outra força atuando na face interna do pistão que é a força de arrasto  $F_a$ , essa força é exponencialmente proporcional a velocidade que o fluido passa pela válvula, de maneira com que seja sempre oposta a força exercida pelos fios SMA. Tal força deve pode ser encontrada da seguinte forma:

$$F_a = 0,5 * C_a * A * \rho * v^2$$

onde:

$$\rho = \text{Massa específica (Kg/m}^3\text{)}$$

$$F_a = \text{Força de arrasto (N)}$$

$$C_a = \text{Coeficiente de arrasto} = 1,0 \text{ (placa circular plana)}$$

$$A = \text{Área face interna} = 0,00049 \text{ m}^2$$

$v$  = Velocidade do Fluido

Considerando a velocidade da água dentro da linha de 5 m<sup>2</sup> segue:

$$F_a = 0,5 * 1,0 * 0,00049 * 5^2 = 6,125 \text{ N}$$

Nota-se então que depois que a válvula libera o fluxo, a força contrária aos fios SMA além da força inicial da pressão na linha que é de aproximadamente 24,06 N reduz drasticamente para  $F_a = 6,125 \text{ N}$ . Portanto, é gasto mais energia para tirar o pistão da inércia durante a abertura, do que mantê-lo constantemente aberto.

Foram elaborados testes em laboratórios com diferentes combinações de molas e diferentes correntes, com o intuito de descobrir uma configuração que fosse capaz de demonstrar que é possível sim realizar a construção desse protótipo que por sua vez mostrou que funcionaria com um eficiente sistema de vedação, podendo então ser substituta de válvulas atualmente encontradas no mercado e que possuem aplicabilidades domésticas ou mesmo industriais.

Tal protótipo seria ideal para substituir demandas domésticas que utilizam baixa pressão na linha, tais como válvulas acionadas por comandos elétricos que podem ser utilizadas em torneiras, sistemas de irrigação entre outras aplicações.

Também ficou claro que devido a boa geometria e sistema de polias isoladas da válvula, é possível infinitas configurações de comprimentos de fios e molas, de maneira que isso aumentaria muito a sua faixa de aplicabilidade no mercado, uma vez que possui baixo consumo elétrico e razoável custo. Mostrou-se que é possível através desta ideia inicial, e com algumas modificações estruturais e mudanças de materiais para a fabricação do corpo da válvula, expandir as aplicações a usos em indústria com diferentes tipos de fluidos e pressões de trabalho.

## Capítulo 8

### Conclusões

Este trabalho propôs a utilização de fios com propriedade de memória de forma como atuadores a serem utilizados em válvula de controle de fluxo normalmente fechada. Para testar o conceito, foi elaborado um modelo numérico para a simulação do processo de atuação, mapeamento de forças necessárias para a utilização de fios adequados, deformações e forças possíveis de serem obtidas. Determinadas as dimensões do protótipo, foi obtida a carga necessária para a movimentação do pistão da válvula. Foi realizada a caracterização mecânica e térmica o Fio de 0,38 milímetros de diâmetro. Com a caracterização do fio e comparação com as necessidades de força, determinou-se que a atuação do dispositivo seria feita com um feixe de 4 fios de 0,38 milímetros de diâmetro pré-deformadas através de duas molas de restituição em conjunto com a força resultante da pressão prevista para o sistema.

Conclui-se que o conceito foi testado de maneira satisfatória quanto ao entendimento do fenômeno de memória de forma em uma aplicação como atuador de válvula.

## Capítulo 9

### Referências Bibliográficas

ANADÓN, J.R.S., 2002. **”Large force shape memory alloy linear actuator”**. Tese de Mestrado , University of Florida, Florida ,USA.

AQUINO, A. S., 2011. **”Controle de vibração de um sistema sob desbalanceamento rotativo utilizando atuador de liga com memória de forma”**. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil.

ASUNDI, A., 1996. **“Polarimetric sensors for strain measurement and damage detection: Smart Structures”**. Materials and Mems, Bangalore, India.

BANDEIRA, E. L. ,2005. **“Análise de treliças adaptativas com memória de forma e não linearidades geométricas através do método de elementos finitos”**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro , RJ, Brasil.

BRINSON, L. C.,1993. **“One dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non constant material functions and redefined martensite internal variable”**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures Vol. 4.

CASTILHO, W. S. & SILVA, E. P. , 2011. **“Agumas aplicações das ligas com memória de forma”**. Revista Científica do Instituto Federal de São Paulo – SINERGIA ,vol. 12 , n. 1.

CHAITANYA,S.K. & DHANALAKSHMI,K., 2014. **“Design and investigation of a shape memory alloy actuated gripper”**. Smart Structures and Systems ,Vol. 14 , No.4.

DELAEY, L. ; KRISHNAN, R. V. ; WARLIMONT, H. and TAS, H. , 1974. **“Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations”**. Journal of Materials Science, 9 ed.

FERNANDES, F. M. B. **“Ligas com memória de forma”**. Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa, 2003.

HUANG,W.,2002.”**On the selection of shape memory alloys for actuators”**. Materials & Design 23.

JAGG, Inc. **“Jagg By pass valves”**. Disponível em <http://www.jagg.com/by-pass.html>

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

LAI,B.-K., HAHM,G. ,YOU,L. , SHIH,C.-L., KAHN, H., PHILLIPS,S.M., HEUER,A.H.,2001.”**The characterization of TiNi Shape Memory Actuated Microvalves”**. Materials Research Society Vol. 657.

MA, N., HU, Z. ,SAMUEL, R. ,EHLIG-ECONOMIDES, C.A.,SONG, G. , 2006.”**Design and performance evaluation of na ultradeepwater subsea blowout preventer control system using shape memory alloy actuators”**, Society of Petroleum Engineers.

MAVROIDIS, C., 2007. **”A study on the thermomechanical properties of shape memory alloys”**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures.

MOHD,J.J., LEARY, M.S.A, GIBSON,M.A., 2014.”**A review of shape memory alloy research, applications and opportunities”**, Materials & Design 56.

MONTEIRO JR, P. C. C. ; SILVA, L. L. ; NETTO,T. A. ; SAVI, M.A. ,2013. **"Experimental investigation of the influence of the heating rate in na SMA actuator performance"**. Sensor and Actuators A 199: Physical.

NITINOL, Inc. , **“Material Data Sheet”**. Disponível em <http://www.nitinol.com>

PACHECO,P. M. C. L. ,PAIVA, A. , SAVI, M. A., 2003. **“Modelos constitutivos para ligas com memória de forma”**. 2º Congresso Temático de Aplicações de Dinâmica e Controle da SBMAC, São José dos Campos, SP, Brasil.

PAIVA, A. ,2004. **“Modelagem do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma”**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro , RJ , Brasil.

PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR, **“Análise do Acoplamento Termomecânico em Ligas com Memória de Forma”**, Tese de Doutorado COPPE/UFRJ, 2007

ROGERS, C.A. , 1993. **“Intelligent material systems: The dawn of a new material age”**. Journal of Intelligent Materials System and Structures, Vol. 4.

SAVI, M.A. & PAIVA, A. , BAÊTA-NEVES, A. P. , PACHECO, P.M.C.L. , 2002. **“Phenomenological Modeling and Numerical Simulation of shape memory alloys: A Thermo plastic phase Transformation coupled model”**. Journal of Intelligent Material, Systems and Structures , Vol.13 ,No 5.

SAVI, M. A. , PAIVA, A. ,1999. **“Sobre os modelos constitutivos com cinética de transformação assumida para ligas com memória de forma”**. COBEM 99 - XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.

STOECKEL,D. & WARAM,T.,1991.”**Use of NiTi shape memory alloys for thermal sensoractuators”**. SPIE San Diego,California,USA.

TANAKA, K. , 1990.”**A phenomenological description on thermomechanical behavior of shape memory alloys”**. Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 12.

WAYMAN, C. & DUERIG, T. W. , 1990. **“Engineering aspects of shape memory alloys”**.

