

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

**Desenvolvimento de um Atuador Inteligente  
para Válvulas de Camisa Deslizante utilizando  
Materiais com Memória de Forma**

Bruno Salgado Rodrigues

Gabriel Lucena Correia

Igor Martins Fontenele Rocha

Prof<sup>ª</sup>. Orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Prof. Coorientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

**Rio de Janeiro**

**Novembro de 2017**

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

**Desenvolvimento de um Atuador Inteligente  
para Válvulas de Camisa Deslizante utilizando  
Materiais com Memória de Forma**

Bruno Salgado Rodrigues

Gabriel Lucena Correia

Igor Martins Fontenele Rocha

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<sup>ª</sup>. Orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Prof. Coorientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

**Rio de Janeiro**

**Novembro de 2017**

## Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

R696 Rodrigues, Bruno Salgado  
Desenvolvimento de um atuador inteligente para válvulas de  
camisa deslizante utilizando materiais com memória de forma /  
Bruno Salgado Rodrigues, Gabriel Lucena Correia, Igor Martins  
Fontenele Rocha.—2017.

71f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.

Bibliografia : f. 66-71

Orientadora : Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Coorientador : Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

1. Engenharia mecânica. 2. Materiais inteligentes. 3. Válvulas.  
4. Ligas com memória de forma. 5. Análise numérica. I. Correia,  
Gabriel Lucena. II. Rocha, Igor Martins Fontenele. III. Monteiro,  
Luciana Loureiro da Silva (Orient.). IV. Pacheco, Pedro Manuel  
Calas Lopes (Coorient.). V. Título.

CDD 621

## RESUMO

A necessidade de contornar a queda da produtividade de um reservatório, maximizando a taxa de produção e elevando a quantidade de hidrocarboneto recuperado, abriu as portas para uma série de iniciativas e desenvolvimento de novas tecnologias. Com investimentos significativos nos próximos anos é possível desenvolver um modelo de válvula diferente dos convencionais, cuja proposta é controlar, de forma inteligente, a produção através de válvulas construídas com ligas de memória de forma (*shape memory alloys*). Estas válvulas são geralmente operadas remotamente através de acionamento hidráulico ou elétrico. Porém, alguns tipos comuns de falhas vêm sendo detectados e estudados, incentivando pesquisadores a proporem tecnologias alternativas, visando tornar esses equipamentos mais confiáveis e eficientes. Este trabalho irá apresentar uma prova de conceito de atuação inteligente em uma válvula de camisa deslizante. Para este fim, serão realizados ensaios experimentais e análises numéricas para verificar a viabilidade técnica do funcionamento deste atuador, que pode ser aplicado em um sistema de completação inteligente reduzindo a necessidades de intervenções.

Palavras-chave: completação, completação inteligente, gerenciamento do reservatório, memória de forma, válvula de camisa deslizante, SMA.

## ABSTRACT

The need to circumvent the fall in the productivity of a reservoir, maximizing the rate of production and increasing the amount of recovered hydrocarbon, has opened the door to a series of initiatives and development of new technologies. With significant investments in the coming years it is possible to develop a valve model different from conventional ones, whose proposal is to intelligently control the production through valves build with shape memory alloys. These valves are usually operated remotely by hydraulic or electric drive. However, some common types of failures have been detected and studied, encouraging researchers to propose alternative technologies to make these equipments more reliable and efficient. This work will present a proof of concept of intelligent actuation in a sliding tube valve. For this purpose, experimental tests and numerical analyzes will be carried out to verify the technical feasibility of the operation of this actuator, which can be applied in an intelligent completion system reducing the need for interventions.

Keywords: completion, intelligent completion, reservoir management, shape memory, sliding tube valve, SMA.

## **AGRADECIMENTOS**

*Aos nossos pais, pelo exemplo de seres humanos que são, pelo direcionamento de vida e suporte moral, cujo apoio tem sido fundamental em todos os momentos de nossas vidas.*

*Á nossa orientadora Luciana Loureiro, pela orientação, conhecimento transmitido, dedicação na realização do projeto, amizade sincera, paciência e por acreditar na proposta do projeto do trabalho e no seu potencial.*

*Ao nosso coorientador Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, pela dedicação e todo auxílio na realização deste trabalho de projeto final.*

## Sumário

Capítulo 1 .....	1
1 Introdução .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Justificativa .....	2
1.3 Objetivo.....	3
Capítulo 2.....	4
2 Revisão bibliográfica.....	4
2.1 Indústria do Petróleo .....	12
2.2 Válvulas Convencionais da Área de Óleo e Gás.....	14
2.2.1 Válvulas Hidráulicas .....	14
2.2.2 Válvulas Elétricas.....	15
2.3 Válvula Gas Lift.....	15
Capítulo 3.....	18
3 Fundamentos teóricos.....	18
3.1 Materiais inteligentes .....	18
3.2 Ligas com memória de forma.....	20
3.3 O Efeito Memória de Forma .....	21
3.4 Pseudoelasticidade .....	22
3.5 Efeito Memória de Forma Reversível .....	23
3.6 Memória de Forma com Tensão Assistida .....	25
Capítulo 4.....	26
4 Projeto da válvula.....	26
4.1 Projeto Conceitual da Válvula.....	26
Capítulo 5.....	29
5 Modelo Numérico .....	29
5.1 Modelo constitutivo.....	29
5.2 ABAQUS .....	33
5.3 Desenvolvimento do Modelo numérico .....	33
5.4 Casos .....	35
5.4.1 Caso 1.....	35
5.4.2 Caso 2.....	39
5.4.3 Caso 3.....	41
5.4.4 Caso 4.....	43

Capítulo 6.....	46
6 Modelo experimental.....	46
6.1 Metodologia Experimental.....	46
6.2 Caracterização mecânica.....	47
6.3 Caracterização térmica (DSC).....	49
6.4 Construção do aparato experimental.....	51
6.5 Resultados Experimentais.....	55
6.5.1 Baterias experimentais similares ao caso 1 numérico.....	55
6.5.2 Bateria experimental similar ao caso 3 numérico.....	58
6.5.3 Bateria experimental similar ao caso 4 numérico.....	59
6.5.4 Comparativos entre baterias experimentais.....	60
6.5.4.1 Comparativos das forças nas baterias do caso 1.....	60
6.5.4.2 Comparativos das rotações nas baterias do caso 1.....	61
6.5.4.3 Comparativo da força média entre as baterias do caso 1.....	62
6.5.4.4 Comparativo da variação máxima de rotação entre baterias do caso 1.....	62
6.5.4.5 Comparativo de forças entre casos 1, 3 e 4.....	63
6.5.4.6 Comparativo de rotação entre modelos.....	63
Capítulo 7.....	64
7 Conclusões.....	64
Capítulo 8.....	66
8 Referências Bibliográficas.....	66



## Lista de Figuras

Figura 1: modelo de atuador linear proposto por PULNEV et al. (2004) em uma direção.....	4
Figura 2: Modelo de atuador linear proposto por PULNEV et al.(2004) em duas direções .....	5
Figura 3: Atuador de SMA proposto por STRIMATTER e GÜMPEL, 2004 .....	5
Figura 4: Atuador linear com memória de forma (ELWALEED et al. 2007).....	6
Figura 5: Resultados experimentais e numéricos para o projeto proposto por ELWALEED et al. (2007) .....	6
Figura 6: Esquemática do comportamento do Fio SMA ao sofrer variação de temperatura (MONTEIRO et al., 2013) .....	7
Figura 7: Ilustração do TDUPF (“Tendon-driven under actuated prosthetic fingers”) (GAO et al., 2014).....	8
Figura 8: Esquemática do tdupf (tendon-driven under actuated prosthetic fingers) (GAO et al., 2014).....	8
Figura 9: Conceito proposto por GAO et al., 2014, para um atuador híbrido, combinando um atuador do motor e um atuador SMA.....	9
Figura10: Tipos básicos de atuadores, utilizando de um fio SMA (a), um fio SMA e uma mola (b) e dois fios SMA (c) (HUANG, 2012).....	10
Figura 11: Dispositivo, em corte, proposto por Carrozza et al., 2013.....	11
Figura 12: Configurações de atuadores abordadas no estudo de paiva et al. (2017).....	11
Figura 13: Tabela da evolução do preço do barril adaptada.....	13
Figura 14: Obrigação anual acumulada estimada de investimentos em P&D até 2023. ....	13
Figura 15: Imagem que simula o conceito de sistema hidráulico .....	15
Figura 16: Imagem que simula um sistema elétrico.....	15
Figura 17: Esquema da válvula termicamente atuada (GILBERTSON, 2011).....	16
Figura 18: Figura da válvula em 3D (GILBERTSON, 2011) .....	16
Figura 19: comparativo tensão x deformação de materiais (Adaptado LAGOUDAS, 2008).....	19
Figura 20: Comparativo densidade de energia x frequência de atuação (Adaptado LAGOUDAS, 2008) .....	19
Figura 21: Esquemática das transformações ocorridas em um material com memória de forma .....	21
Figura 22: Diagrama Tensão - Deformação - Temperatura apresentando o efeito de memória de forma de uma liga niti (LAGOUDAS, 2008).....	21
Figura 23: Ciclo de carregamento pseudoelástico em um material com memória de forma .....	23
Figura 24: Ciclo térmico de uma liga com memória de forma NiTi, sob o carregamento de 150 MPa (LAGOUDAS, 2008).....	24
Figura 25: Esquema de atuação da válvula .....	26
Figura 26: Ciclo de aquecimento, resfriamento. ....	27
Figura 27: Figura que determina os diâmetros da análise .....	28
Figura 28: Esquema simplificado do mecanismo.....	29
Figura 29: Representação geométrica da restrição para coexistência das fases (paiva et al., 2005) .....	31
Figura 30: Representação esquemática do modelo simplificado usado no software abaqus .....	34
Figura 31: esquematização das etapas de carregamento nos fios sma .....	35
Figura 32: Ciclos térmicos aplicados no Caso 1 .....	36

Figura 33: Relação da tensão - temperatura x Tempo no caso 1 (a) para o Fio Esquerdo e (b) para o Fio Direito .....	37
Figura 34: Deformação sofrida pelos Fios Esquerdo e Direito .....	38
Figura 35: Frações volumétricas do caso 1 .....	38
Figura 36: Ciclos térmicos aplicados no caso 2 .....	39
Figura 37: Relação da Tensão-Temperatura x Tempo no caso 2 .....	40
Figura 38: Deformações apresentadas pelo Fio Esquerdo nos casos 1 e 2.....	40
Figura 39: Frações Volumétricas do caso 2 .....	41
Figura 40: Ciclos térmicos aplicados no Caso 3 .....	41
Figura 41: Relação da Tensão - Temperatura x Tempo no caso 3 (a) para o Fio Esquerdo e (b) para o Fio Direito .....	42
Figura 42: Deformações sofridas nos Casos 3 e 1.....	42
Figura 43: Frações Volumétricas do Caso 3 (a) para o Fio Esquerdo e (b) para o Fio Direito...	43
Figura 44: Ciclos térmicos aplicados no caso 4 .....	44
Figura 45: Relação da Tensão - Temperatura x Tempo no caso 4 .....	44
Figura 46: Deformações sofridas nos casos 1 e 4 .....	45
Figura 47: Frações Volumétricas ao longo da análise do caso.....	45
Figura 48: Relaciona a temperatura de aquecimento e resfriamento com a deformação do fio..	47
Figura 49: Ensaio de tração (TERÇO, 2016). .....	47
Figura 50: Força x Deslocamento (TERÇO, 2016).....	48
Figura 51: Curva de Efeito de Memória de Forma .....	49
Figura 52: Figura esquemática do funcionamento do DSC .....	50
Figura 53: Resultado do corpo de prova SMA ensaiado no equipamento DSC .....	51
Figura 54: Aparato experimental.....	52
Figura 55: Utilização da máquina de tração Instron.....	53
Figura 56: Aparato experimental com a célula de carga.....	54
Figura 57: Gráficos que relacionam a força (A) e a rotação (B) com a corrente de 0,5 A.....	55
Figura 58: Comportamento da força (a) e da rotação (b) ao longo do ensaio, para a corrente de 1,0 A.....	56
Figura 59: Comportamento da força (a) e da rotação (b) ao longo do ensaio, para a corrente de 1,5 A.....	57
Figura 60: Comportamento da força (a) e da rotação (b) ao longo do ensaio, para a corrente de 2,0 A.....	57
Figura 61: Comportamento da força (a) e da rotação (b) ao longo do ensaio, para a corrente de 2,5 A.....	58
Figura 62: Relação da força (a) e da rotação (b) com a corrente para o Caso 3.....	59
Figura 63: Relação da força e da rotação com a corrente para o Caso 4.....	60
Figura 64: Comportamento das forças atuantes no Fio Esquerdo (Fio 1) para cada corrente elétrica.....	61
Figura 65: Relação das rotações registradas ao longo do experimento para cada bateria.....	61
Figura 66: Valores médios de força obtidos para cada corrente elétrica.....	62
Figura 67: Valores máximos de rotação registrados para cada corrente elétrica aplicada ao longo do ensaio.....	62
Figura 68: Comparativo das forças atuantes ao longo do ensaio para cada Caso de ciclo térmico .....	63

Figura 69: Relação das rotações registradas ao longo do ensaio para cada Caso de ciclo térmico .....	63
--	----

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros do modelo (Monteiro et al., 2016).....	34
Tabela 2: Dados fornecidos pela empresa dynalloy .....	46
Tabela 3: Resultados obtidos pela caracterização térmica a partir do dsc.....	51

# Capítulo 1

## 1 Introdução

### 1.1 Motivação

Com a crescente demanda mundial por energia e o petróleo se tratando de um recurso limitado, tornou-se cada vez mais necessário otimizar a exploração desse combustível. Isso se dá, principalmente, por meio da retirada do máximo possível de óleo do reservatório. Para que se torne possível produzir o hidrocarboneto, é necessário preparar o poço perfurado com melhorias que maximizem a produção. Ao conjunto de operações que são realizadas nessa fase, dá-se o nome de “completação” de poço. (THOMAS, 2004).

A completção compreende operações responsáveis pela equipagem do poço e essa melhoria cria uma demanda por produtos mais complexos que desafiam os padrões de engenharia atuais. Qualidade, confiabilidade e segurança são imprescindíveis para redução de ocorrências de falhas e assim poder conectar o poço à *payzone* (zona do hidrocarboneto).

Empresas petroleiras têm investido no desenvolvimento de novas tecnologias na área de completção de poços. Com isso foi desenvolvida uma nova forma de completção que vem substituindo o padrão convencional de produção. (RODRIGUEZ & FIGUEROA, 2010).

Conhecida como completção inteligente de poço ou sistema de produção inteligente (*Intelligent Production Systems – IPS*), essa nova tecnologia permite o monitoramento permanente do poço, operado remotamente a partir de um sistema de controle de superfície. (RODRIGUEZ & FIGUEROA, 2010).

No processo de completção inteligente é possível controlar a produção de petróleo de cada zona, e assim otimizar a produção de acordo com a necessidade do engenheiro, viabilizando maior recuperação do óleo existente num reservatório.

Estudos realizados para os campos de Sapinhoá e Búzios mostram que essa tecnologia pode trazer benefícios já nos primeiros anos de operação e que o aumento de produção pode chegar a 20% nos cenários investigados. Uma metodologia para quantificação dos benefícios foi desenvolvida e aplicada nesses campos e fundamenta a tomada de decisão sobre a adoção da tecnologia. Como próximo passo, a metodologia será aplicada aos demais campos do pré-sal.

Gerada essa demanda, cria uma oportunidade para o surgimento de novas tecnologias. A tendência de escolha pelos equipamentos utilizando tecnologia a base de materiais inteligentes já é notável quando tratamos de sensores e atuadores.

Esta classe de materiais possui características adaptativas e modificam suas propriedades físicas quando há um estímulo adequado. Dentre os chamados materiais inteligentes destacam-se as ligas com memória de forma (SMAs). Suas propriedades únicas estão vinculadas com as transformações de fase martensítica por diferentes comportamentos termomecânicos complexos dessas ligas que, por sua vez, estão relacionados às não homogeneidades espaciais ocorridas durante as transformações de fase. Além da pseudoelasticidade e do efeito da memória forma, as SMAs podem apresentar ainda comportamentos como o efeito de memória de forma reversível (do inglês, *two-way shape memory effect*) (OLIVEIRA, 2008). Essas ligas podem sofrer grandes deformações reversíveis, da ordem de 8%, ou produzir grandes forças quando se restringe o seu deslocamento, fazendo com que o uso destes materiais se torne extremamente atraente para diferentes aplicações, podendo inclusive substituir elementos convencionais de atuação.

A complexidade do comportamento é objeto de estudo de muitas pesquisas e a possibilidade de gerar equipamentos mais leves, eficientes, silenciosos e com menores custos associados é o que motiva este trabalho a realizar um estudo acerca das diferentes configurações considerando arranjos de elementos com memória de forma. Para este fim, foi desenvolvido um dispositivo com atuação inteligente que simula o funcionamento de uma válvula de camisa deslizante. Os resultados obtidos através de ensaios experimentais e análises numéricas evidenciam a viabilidade do conceito de atuação explorado. O atuador desenvolvido faz uso do conceito de memória de forma assistida por tensão, do inglês *Stress Assisted Two Way Memory Effect* (SATWME) (LAGOUDAS et al., 2007; VIDAL, 2010; PAIVA, 2017). Este estudo se apoia em um modelo constitutivo para SMAs desenvolvido por SAVI et al. (PAIVA et al., 2005; SAVI et al., 2005; BAÊTA-NEVES et al., 2004) e implementado como uma sub-rotina UMAT (*UserMaterial*) no software comercial ABAQUS por BANDEIRA et al. (2006).

## **1.2 Justificativa**

As ligas com memória de forma possuem a habilidade de retornar a forma previamente definida quando submetidas a uma variação térmica adequada. A principal característica destes materiais é a habilidade de sofrer grandes deformações ou produzir grandes forças, uma vez que se

restringe o movimento. Esses efeitos são extremamente atraentes para o desenvolvimento de atuadores inteligentes para diversos campos da engenharia.

A demanda por ferramentas que atuem em condições especiais no mercado de óleo & gás tem crescido rapidamente. Atualmente o mercado de equipamentos submarinos carece de uma diversificação de conceitos de atuação de válvulas, uma vez que a grande maioria possui acionamento convencional elétrico/hidráulico.

Nesse trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de atuação baseado no efeito de memória de forma com tensão assistida SATWME (*Stress-Assisted Two-Way Memory Effect*), o qual possibilita a atuação de modo reversível utilizando somente carregamentos térmicos. O protótipo em pequena escala deverá mostrar a viabilidade de acionamento inteligente de válvulas de camisa deslizante para controle de fluxo visando aplicações offshore.

### **1.3 Objetivo**

O trabalho presente tem como objetivos o desenvolvimento do conceito de uma válvula de camisa deslizante inteligente, utilizando um atuador com fios de memória de forma, e verificação de sua viabilidade através de análises numéricas e testes experimentais. A análise numérica irá se basear na realização de um modelo baseado em método de elementos finitos utilizando o software ABAQUS, enquanto que, será fabricada uma válvula modelo, com caracterização do material SMA empregado, e testes de funcionalidade.

## Capítulo 2

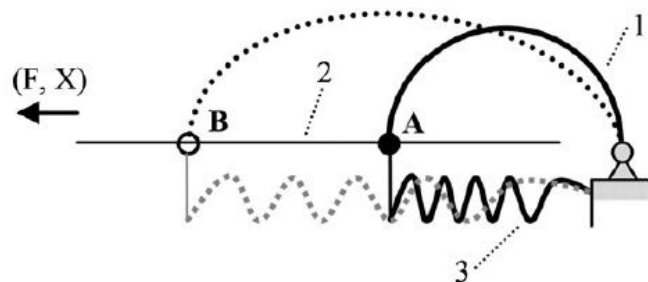
### 2 Revisão bibliográfica

As ligas com memória de forma são úteis em diversos cenários quando trabalham como atuadores e respondem a estímulos térmicos ou mecânicos, alterando sua forma, rigidez, posição, entre outras características (AQUINO, 2011).

As ligas com memória de forma têm sido empregadas como sensores/atuadores inteligentes em uma ampla variedade de aplicações, como engenharia, setor automotivo e área médica. (ANDREASEN et al., 1971; CRAGG et al., 1983; WILDE et al., 2000, DESROCHES and DELLEMONT; 2002; KOHL et al., 2002; DONG et al., 2008).

O número crescente de pesquisas relacionadas a atuadores reflete uma busca contínua em diminuir o tamanho dos dispositivos, aliando alto desempenho com baixo volume, seguindo uma demanda do mercado por projetos mais eficientes, leves, compactos, simples, silenciosos e com menores custos (KIM et al., 2006; PICCINI and TOWE, 2006; NAMAZU et al., 2007; OLIVEIRA, 2008; MONTEIRO et al., 2013; SILVA et al., 2015(b)).

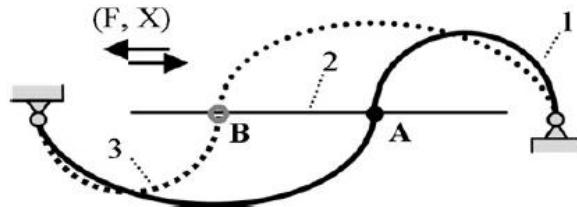
PULNEV et al. (2004) desenvolveram dois tipos de atuadores lineares por SMA. O primeiro, representado pela Figura 1, consiste num fio de CuAlNi e uma mola de aço. Ao se aquecer o fio, há uma mudança em sua forma, indo do ponto A ao ponto B, e gerando uma deformação também na mola. Quando resfriado, a mola atua para retornar o fio ao seu formato original.



**FIGURA 1:** MODELO DE ATUADOR LINEAR PROPOSTO POR PULNEV ET AL. (2004) EM UMA DIREÇÃO

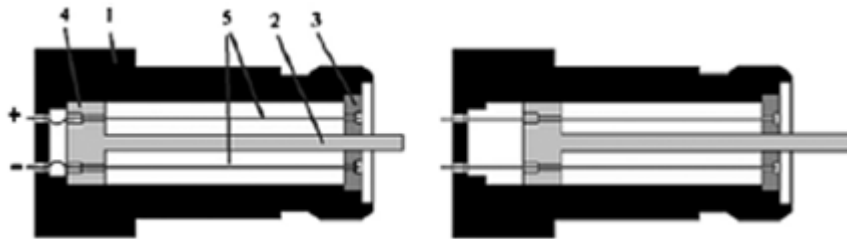


O atuador seguinte consiste em duas direções e dois fios SMA. Quando se aquece o fio 1, ele aumenta seu comprimento, fazendo com que seu ponto mais extremo se desloque, do ponto A ao B. Então, o fio 2 é aquecido, causando o retorno do ponto à posição A. Como mostrado na Figura 2.



**FIGURA 2:** MODELO DE ATUADOR LINEAR PROPOSTO POR PULNEV ET AL.(2004) EM DUAS DIREÇÕES

Outro modelo de atuador com material de forma foi proposto por STRIMATTER e GÜMPEL (2004 apud NESPOLI et al., 2010). Nessa publicação o atuador tinha a finalidade de trabalhar em uma válvula hidráulica. O dispositivo consistia em um parafuso (1), um eixo (2), uma placa (3), um flange (4) e dois fios SMA com 0,201 mm de diâmetro (5); como mostra a Figura 3, com seus respectivos números.

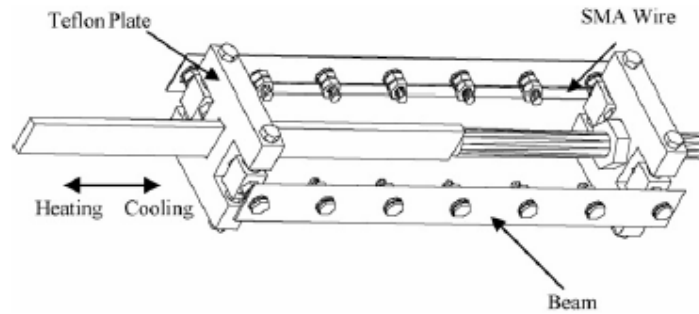


**FIGURA 3:** ATUADOR DE SMA PROPOSTO POR STRIMATTER E GÜMPEL, 2004

No procedimento, uma corrente elétrica passava pelos fios, causando sua deformação e um movimento no flange, esse movimento então era transferido para o parafuso através do eixo. Quando o estímulo elétrico era cessado, uma força externa atuava para retornar o flange e o eixo. Sob as condições de 200 bar de pressão e um óleo a 24° C de temperatura, foi obtido o resultado de 0,8 mm de deslocamento com uma força de 98N por esse atuador; o tempo de atuação durou 0,4 s e o movimento reverso, 3 s.

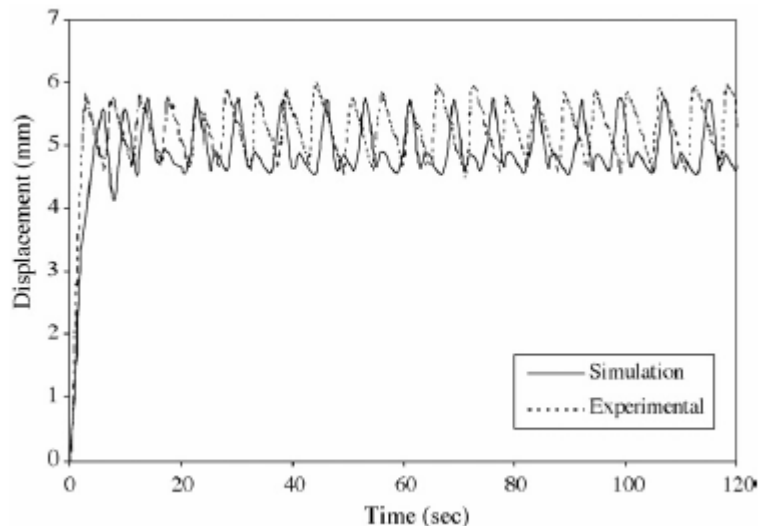
ELWALEED et al. (2007) realizaram uma pesquisa para projetar e fabricar um atuador com material de memória de forma, capaz de amplificar a deformação do SMA a partir de vigas elásticas, modelando o seu comportamento de histerese. O dispositivo consistia em duas vigas que estão conectadas cada uma a um fio SMA, segmentados em seis partes iguais. Foi demonstrado no estudo uma eficiência no aumento do número de segmentos da viga, gerando um aumento de 280% na deformação do fio.

Foi utilizado um atuador do tipo externo, pois essa categoria permite causar um momento adicional conforme as vigas se flexionam. E as vigas eram unidas a duas chapas, de forma a permitir a flexão das vigas citadas, como mostra a Figura 4.



**FIGURA 4:** ATUADOR LINEAR COM MEMÓRIA DE FORMA (ELWALEED ET AL. 2007)

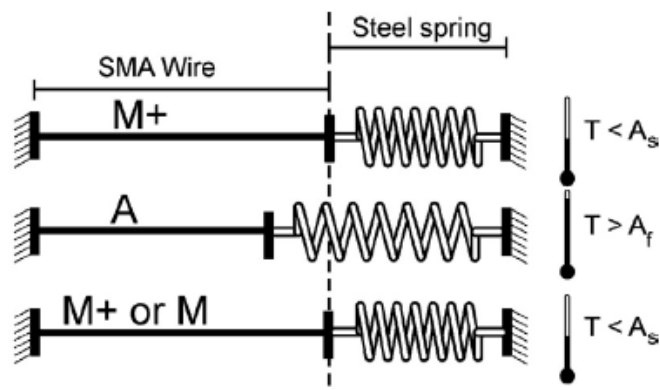
O estudo foi composto ainda por um modelo numérico que descrevia os estágios de aquecimento e resfriamento do experimento, e por um equipamento experimental. Ao final do experimento, foi possível notar uma proximidade entre ambos os resultados obtidos no experimento, como mostra a Figura 5.



**FIGURA 5:** RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS PARA O PROJETO PROPOSTO POR ELWALEED ET AL. (2007)

MONTEIRO et al., 2013, analisaram a influência da taxa de aquecimento no desempenho de um atuador SMA, os principais tópicos desse experimento foram: a máxima força-deslocamento do fio, a energia de deformação e a eficiência do dispositivo.

O experimento consistiu em um fio SMA, com 1,71 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, conectado a uma mola, de 300 kN/m de rigidez. O fio de material com memória de forma, NiTi, se apresentava no estado martensítico à temperatura ambiente e, conforme seu estado térmico se alterava, havia uma mudança em suas fases, causando uma variação em seu comprimento, como mostra a Figura 6. Os ciclos térmicos impostos ao material (aquecimento, por efeito Joule e resfriamento, por convecção natural) permitem a atuação do SMA para a avaliação do seu comportamento.

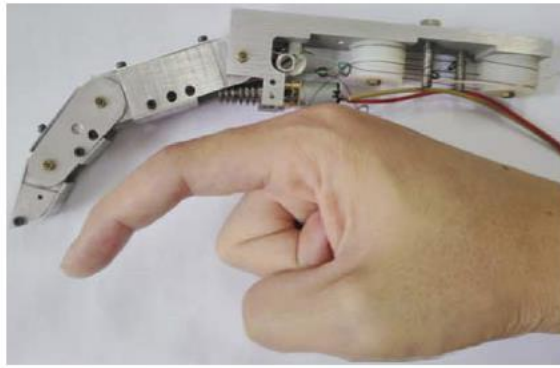


**FIGURA 6:** ESQUEMATIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO FIO SMA AO SOFRER VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (MONTEIRO ET AL., 2013)

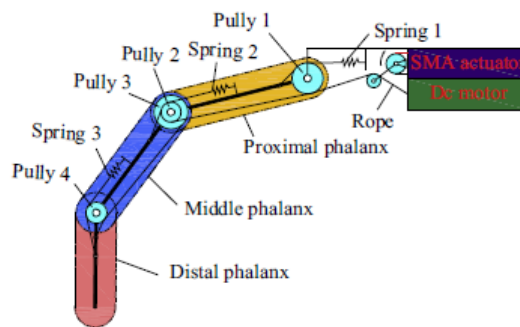
O resultado obtido nesse experimento mostrou pouca variação na energia de deformação para os diferentes carregamentos impostos. Entretanto, também foi possível notar que a taxa de aquecimento do material teve influência nos seus comportamentos de tensão de deformação.

Há muitos estudos e pesquisas relacionados a próteses de membros humanos. Entretanto, muitas vezes esses estudos esbarram em características do corpo humano que são extremamente complexas para se reproduzir usando um equipamento, por exemplo, o aperto que se faz ao se segurar um objeto para que ele não escorregue das mãos. Visando aprimorar essa e outras particularidades de membros humanos, estudos como o de GAO et al. (2014) utilizaram dispositivos com materiais com memória de forma em sua aplicação.

O mecanismo proposto por HIROSE (1978) o TDUPF (“Tendon-driven under actuated prosthetic fingers”), visa um sistema mais leve, através da diminuição do número de motores, como mostram as Figura 7 e Figura 8.

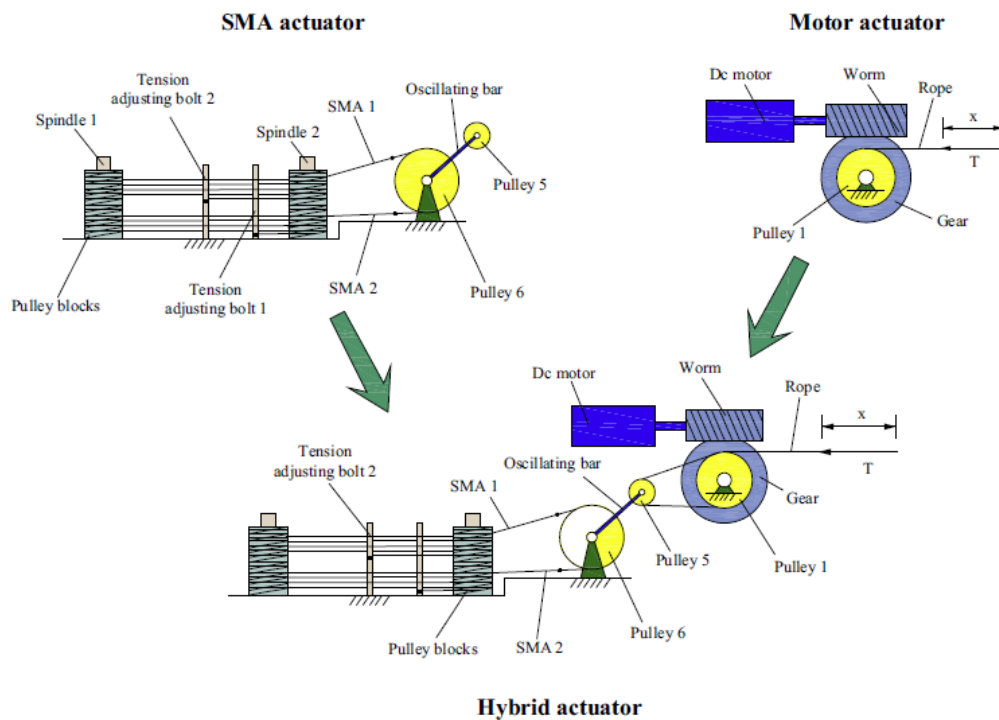


**FIGURA 7:** ILUSTRAÇÃO DO TDUPF (“TENDON-DRIVEN UNDER ACTUATED PROSTHETIC FINGERS”) (GAO ET AL., 2014)



**FIGURA 8:** ESQUEMATIZAÇÃO DO TDUPF (TENDON-DRIVEN UNDER ACTUATED PROSTHETIC FINGERS) (GAO ET AL., 2014)

O estudo realizado propôs o emprego de um atuador híbrido para uma prótese de dedo, utilizando motores de corrente contínua e SMA. Os motores DC (corrente contínua) já são amplamente usados como atuadores, por sua alta eficiência e facilidade de controle, porém, a presença do SMA acelera a taxa de crescimento da força no reflexo das mãos. O protótipo do atuador proposto consistia na combinação de dois atuadores: o atuador do motor (um motor de corrente contínua, uma polia e um par de engrenagens helicoidais) e um atuador SMA (duas polias, dois fios SMA e uma barra de oscilação). O conceito é representado esquematicamente na Figura 9.



**FIGURA 9:** CONCEITO PROPOSTO POR GAO ET AL., 2014, PARA UM ATUADOR HÍBRIDO, COMBINANDO UM ATUADOR DO MOTOR E UM ATUADOR SMA

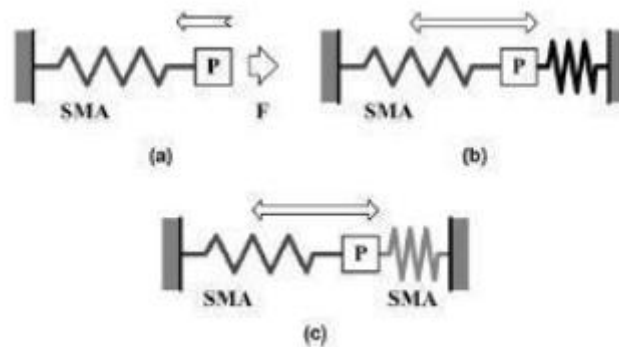
Em seu artigo, ZHANG e YIN (2012) exploraram a utilização de atuadores com materiais de memória de forma fazendo a função de músculos esqueléticos do corpo humano. Inicialmente, são apresentadas as características de diversos tipos de atuadores como músculos artificiais, além de materiais inteligentes, muitos dispositivos também são empregados usando princípios da elétrica, hidráulica e pneumática.

Os fios SMA levam vantagem nessas aplicações, pois possuem uma sensibilidade intrínseca, semelhante aos músculos esqueléticos. Além disso, operam de maneira flexível e silenciosa, mesmo a baixas voltagens. Resultados experimentais mais recentes demonstraram as propriedades força-velocidade são semelhantes entre os fios de SMA e os músculos, porém as propriedades força – deformação são distintas entre si.

Para simular as propriedades mecânicas dos músculos esqueléticos, foi conduzida uma série de experimentos nesse trabalho, simulando as a força-velocidade e força-deformação para um fio de memória de forma. O resultado obtido pelo experimento mostrou a semelhança entre o comportamento do fio SMA e o comportamento esperado por um músculo do corpo humano. Entretanto, o comportamento força-deformação do fio não conseguiu imitar totalmente o comportamento do músculo, levando os autores à conclusão de que seu desempenho ainda necessita ser melhorado.

Em seu estudo, HUANG (2012) discute os melhores materiais SMA para serem usados em atuadores. O foco se baseia nas principais ligas: NiTi, CuZnAl e CuAlNi, atuando apenas no modo “One-way”. No início do artigo, são apresentadas as principais características do Efeito Memória de Forma (SME) e da pseudoelasticidade.

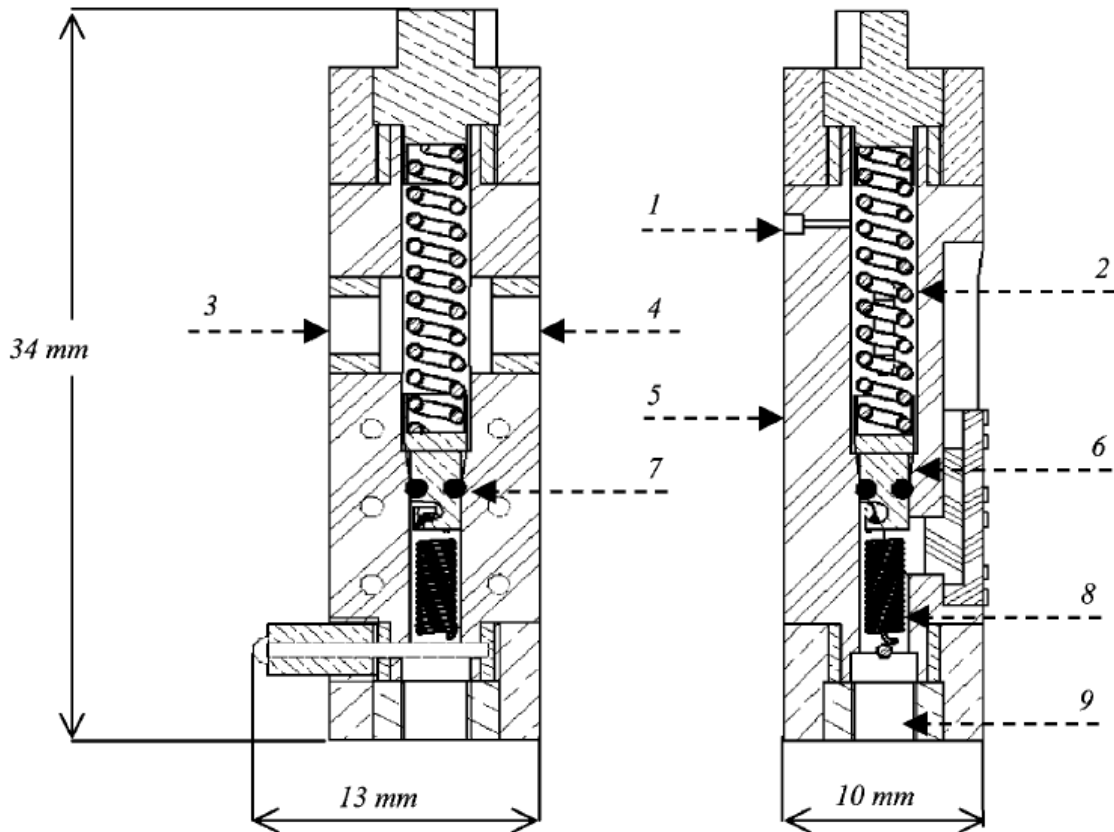
Há também um estudo sobre os tipos de atuadores com materiais com memória de forma. Na Figura10(a) é mostrado um atuador “One-way”, no qual uma força é aplicada fazendo com que o ponto P se mova para a direita; ao suspender a força e aquecer o fio, há a tendência de que o ponto P retorne à sua posição inicial. Na Figura10 (b), podemos notar que foi acrescentada uma mola ao sistema inicial, com isso, não se faz mais necessária uma força, havendo movimentação no ponto P, apenas pela aplicação ou não de um carregamento térmico no fio SMA. Uma configuração com dois fios SMA é possível e é demonstrada pela Figura10(c), o ponto P pode ir para direita ou para esquerda através do aquecimento/ resfriamento dos fios SMA, em determinado momento variando a temperatura do primeiro fio e, em outro momento, variando a do segundo fio.



**FIGURA10:** TIPOS BÁSICOS DE ATUADORES, UTILIZANDO DE UM FIO SMA (A), UM FIO SMA E UMA MOLLA (B) E DOIS FIOS SMA (C) (HUANG, 2012)

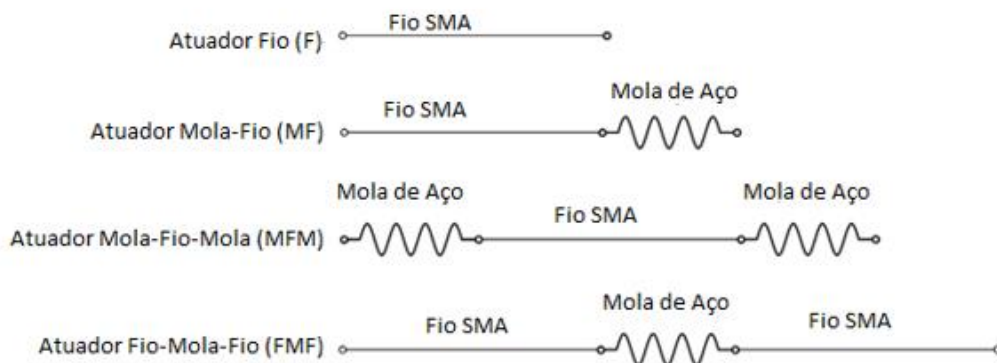
CARROZZA et al. (2013) realizaram pesquisas com materiais com memória de forma a fim de ir ao encontro de uma tendência da área médica, a miniaturização de componentes. Essa redução implica em uma menor invasão cirúrgica do paciente, resultando em um tempo menor de recuperação e diminuindo os riscos a sua saúde.

O dispositivo para endoscopias integra um elemento SMA com um sistema robótico, incluindo uma mola helicoidal com memória de forma ao sistema, item 2 da Figura 11. Essa mudança fez com que o sistema reduzisse seu peso em, aproximadamente, dez vezes o seu valor anterior. O novo sistema em corte pode ser observado na Figura 11.



**FIGURA 11:** DISPOSITIVO, EM CORTE, PROPOSTO POR CARROZZA ET AL., 2013

Em seu estudo, PAIVA et al. (2017) explora o comportamento de fios SMA em atuadores sob quatro tipos de arranjos, são eles: um fio SMA submetido a cargas constantes; um fio conectado a uma mola; um fio conectado a duas molas elásticas; e dois fios SMA conectados a uma mola linear. Essas diferentes configurações foram assumidas por apresentarem diferentes condições operacionais de funcionamento e são mostradas na Figura 12.



**FIGURA 12:** CONFIGURAÇÕES DE ATUADORES ABORDADAS NO ESTUDO DE PAIVA ET AL. (2017).

O estudo se dá a partir de simulações numéricas que seguem a mesma sequência para todas as configurações: carregamento – descarregamento – aquecimento – resfriamento. Em um primeiro momento são fixados os valores de temperatura, então são aplicados diferentes carregamentos mecânicos aos materiais para se analisar sua influência. Posteriormente, o carregamento mecânico é mantido nas simulações e a temperatura de aquecimento do fio que é alterado.

Os resultados do estudo revelam que as diferentes combinações de carregamentos térmico e mecânico influenciam nas transformações de fase, podendo fazer com que essas fiquem incompletas. Esse fato gera no atuador uma redução no efeito memória de forma desse material e, conseqüentemente, uma queda na eficiência da recuperação do atuador.

A metodologia aplicada nesse estudo será usada como base para futuras análises numéricas do projeto em questão.

## **2.1 Indústria do Petróleo**

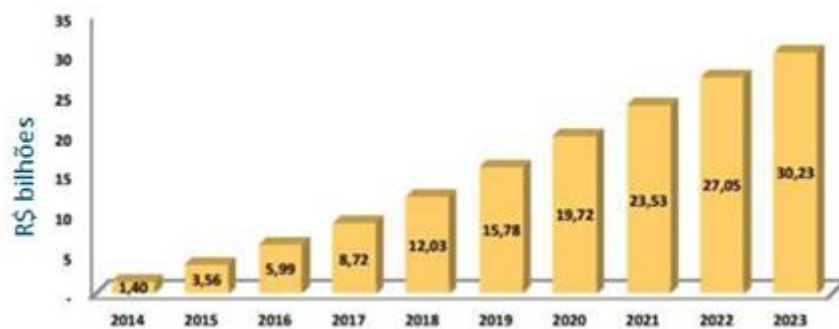
O desenvolvimento tecnológico e a crescente sofisticação dos processos de produção possibilitaram a existência de diversas alternativas para produtos ou serviços com finalidades semelhantes. Em particular, desde a primeira crise do petróleo (no início da década de 70), o mundo intensificou a busca de formas alternativas de energia e a melhoria dos processos para otimizar a utilização dos recursos naturais (TAKAHASHI, 2006). Embora essa pesquisa esteja avançando, o preço do barril sofreu altas consideráveis como mostra a Figura 13.





**FIGURA 13:** TABELA DA EVOLUÇÃO DO PREÇO DO BARRIL ADAPTADA. FONTE: [HTTPS://WWW.NEXOJORNAL.COM.BR/GRAFICO/2016/01/18/UM-HIST%C3%B3RICO-VISUAL-DA-QUEDA-DO-PRE%C3%A7O-DO-PETR%C3%B3LEO](https://www.nexojornal.com.br/grafico/2016/01/18/UM-HIST%C3%B3RICO-VISUAL-DA-QUEDA-DO-PRE%C3%A7O-DO-PETR%C3%B3LEO)

Devido às descobertas recentes de óleo e gás no litoral brasileiro e ao aumento do preço do barril de petróleo, as operações de pesquisa, desenvolvimento, exploração e produção offshore de petróleo têm recebido grandes estímulos, conforme Figura 14.



**FIGURA 14:** OBRIGAÇÃO ANUAL ACUMULADA ESTIMADA DE INVESTIMENTOS EM P&D ATÉ 2023. [HTTP://JORNALGGM.COM.BR/NOTICIA/A-PESQUISA-EM-PETROLEO-E-GAS-NO-BRASIL](http://jornalggm.com.br/noticia/a-pesquisa-em-petroleo-e-gas-no-brasil)

A projeção é que o investimento chegue ao seu máximo, com o valor de R\$ 19,72 bilhões em 2020 e atinja o montante de 30,23 bilhões até 2023. Institutos de pesquisa acreditados pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) e universidades devem receber no mínimo 50% do investimento.

Embora esses recursos existam, sua aplicação ainda é pouco explorada na área de materiais inteligentes, principalmente quando falamos das ligas que exploram o efeito memória de forma. Ou seja, o uso de estruturas e mecanismos, como o explorado neste trabalho, ainda é incomum quando falamos do grande mercado de oportunidades do mundo do petróleo e suas oportunidades em médio prazo.

## **2.2 Válvulas Convencionais da Área de Óleo e Gás**

O acompanhamento, avaliação e controle cada vez mais efetivo das atividades e suas interações com o meio ambiente, é característica principal dos elementos que constituem um sistema de completação.

As plataformas de petróleo demandam alta complexidade logística e tecnológica. Os avanços desses fatores são estratégicos para o bom desenvolvimento desse setor industrial (LIYANAGE, 2006).

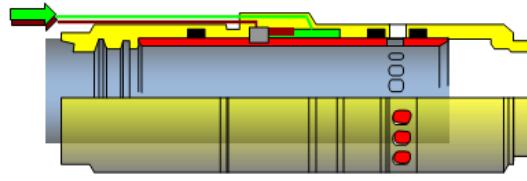
Para garantir a qualidade e segurança desse processo é necessária a garantia do funcionamento de seus equipamentos. O equipamento que libera a passagem de fluxo é conhecido como válvula de fundo de poço.

Uma das maneiras de classificação dessas válvulas é quanto ao seu sistema de atuação. Este podendo ser entre hidráulico e elétrico.

### **2.2.1 Válvulas Hidráulicas**

Válvulas atuadas por sistemas hidráulicos tem seu mecanismo de abertura e fechamento realizado através do princípio do diferencial de pressão.

Como ilustra a Figura 15, o diferencial de pressão é usado para deslocar uma peça, conhecida como luva deslizante, que restringe ou permite a passagem de fluido através da válvula. Geralmente é usado com uma linha abrindo cada válvula e outra linha comum de controle para o sistema, com o propósito de reduzir o número de linhas hidráulicas instaladas. É um sistema muito comum para válvulas que permitem somente sua abertura ou fechamento.



**FIGURA 15:** IMAGEM QUE SIMULA O CONCEITO DE SISTEMA HIDRÁULICO

## 2.2.2 Válvulas Elétricas

Um motor elétrico é responsável por deslocar a luva. Os motores são atuados usando uma única linha elétrica para todos os motores conforme a Figura 16, que transmite também o sinal de posição decodificado na válvula. Isso faz este tipo de válvula apropriada para poços que não permitem grandes números de penetrações na cabeça do poço ou no *tubing*.

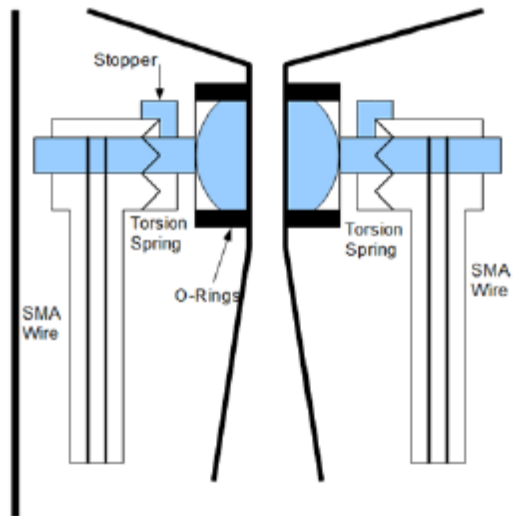


**FIGURA 16:** IMAGEM QUE SIMULA UM SISTEMA ELÉTRICO

FONTE:<http://www.halliburton.com/en-US/ps/well-dynamics/well-completions/intelligent-completions/default.page?node-id=hfqel9vs>

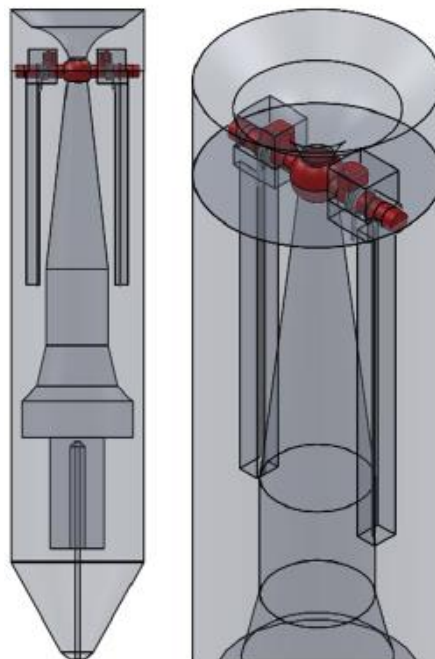
## 2.3 Válvula Gas Lift

GILBERTSON et al (2011) desenvolveram uma válvula de segurança termicamente atuada para utilização em sistemas de *gaslift*, que se trata de um tipo de método de elevação de petróleo onde é misturado gás ao óleo, facilitando sua extração. A utilização destas válvulas tem a finalidade de evitar vazamentos que ocorrem com o tipo tradicional de válvula utilizada normalmente, principalmente devido a corrosão da vedação. Basicamente trata-se de uma esfera ligada a duas extensões laterais localizadas na seção superior do orifício venturi da válvula, onde as extensões são atuadas pelos fios com memória de forma, conforme Figura 17.



**FIGURA 17:** ESQUEMA DA VÁLVULA TERMICAMENTE ATUADA (GILBERTSON, 2011)

O aquecimento ou resfriamento do fio faz com que a esfera gire 90°, abrindo-a quando há um alinhamento vertical do orifício ou fechando-a quando esse orifício se alinha horizontalmente. A Figura 18 apresenta o modelo em 3D do projeto desenvolvido, onde pode ser visto a esfera com suas extensões laterais, destacadas em vermelho, onde são montados os fios.



**FIGURA 18:** FIGURA DA VÁLVULA EM 3D (GILBERTSON, 2011)

Foi realizado um estudo termodinâmico de viabilidade técnica para a aplicação dessa válvula em condições reais, onde foram avaliadas as temperaturas de aquecimento e resfriamento quanto a dados reais obtidos nas aplicações das válvulas tradicionais. Para isso foi desenvolvido um modelo onde foram levadas as considerações de transferência de calor devido à condução e convecção em regime permanente do gás e da mistura óleo e gás. Os resultados apresentados nesse estudo mostraram que esse projeto de válvula termicamente atuada pode apresentar um bom funcionamento em condições reais.

## Capítulo 3

### 3 Fundamentos teóricos

Esse capítulo visa abordar os conceitos teóricos que serão utilizados ao longo do projeto e, conseqüentemente, ilustrar melhor as propriedades e características das ligas com memória de forma SMA.

#### 3.1 Materiais inteligentes

Com o desenvolvimento de tecnologias de processamento de ligas metálicas desde as idades do bronze e ferro, além de avanços na ciência e tecnologia em relação ao entendimento dos efeitos das microestruturas e técnicas de processamento no comportamento dos materiais, o campo de ciência de materiais se aperfeiçoou radicalmente nas últimas décadas (LAGOUDAS, 2008).

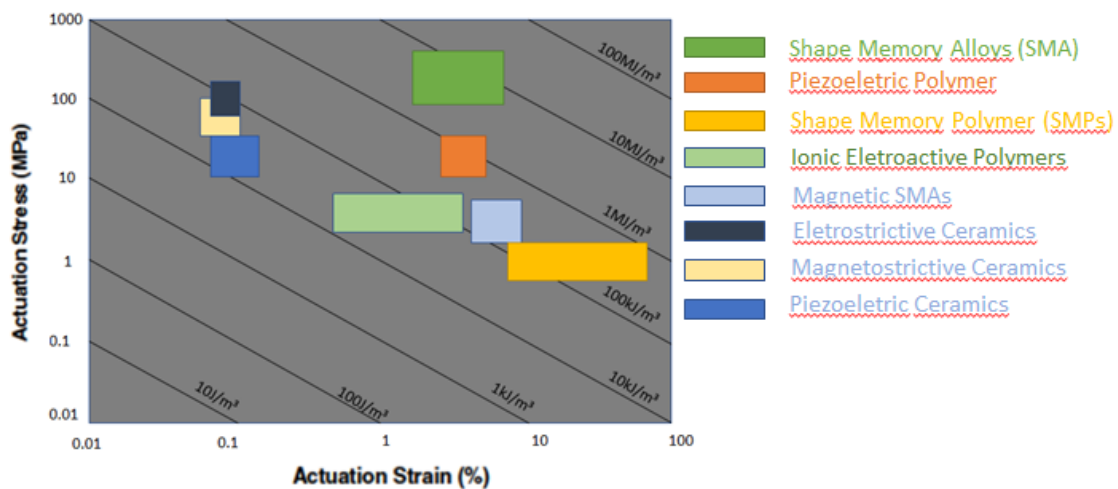
A demanda por materiais mais leves, resistentes e adaptados para atendimento de requisitos estruturais e que forneçam funcionalidades adicionais, tais como, detecção, atuação e blindagem eletromagnética, foi responsável pelo desenvolvimento de materiais inteligentes.

Estes materiais são denominados desta maneira devido a sua resposta em relação a determinado estímulo. Materiais inteligentes podem ser definidos como aqueles materiais que detectam uma mudança no ambiente e respondem de maneira ótima (IYERAND HADDAD, 1994). Em geral a resposta é mecânica quando o material é submetido a um campo não mecânico, como térmico, elétrico, magnético, entre outros. A relação entre estas duas propriedades é chamada de acoplamento. Onde os piezelétricos, por exemplo, fazem parte do grupo dos materiais com acoplamento mecânico com campo elétrico, os piezomagnéticos do grupo do acoplamento mecânico com os campos magnético e elétrico e as ligas com memória de forma do acoplamento termomecânico (LAGOUDAS, 2008).

Há ainda uma subdivisão destes materiais entre acoplamento direto e indireto. Os materiais piezelétricos cerâmicos e poliméricos, as ligas com memória de forma e ligas com memória de forma magnética são exemplos de acoplamento direto, onde a relação desse acoplamento entre campos é de entrada e saída, ou seja, a entrada de uma variação no campo mecânico gera uma saída no campo não mecânico e vice-versa. Já para os casos de acoplamento indireto uma mudança em um campo elétrico ou magnético pode indiretamente mudar um comportamento mecânico através da mudança de viscosidade, como é o caso dos fluidos eletro-reológicos e magneto-reológicos.

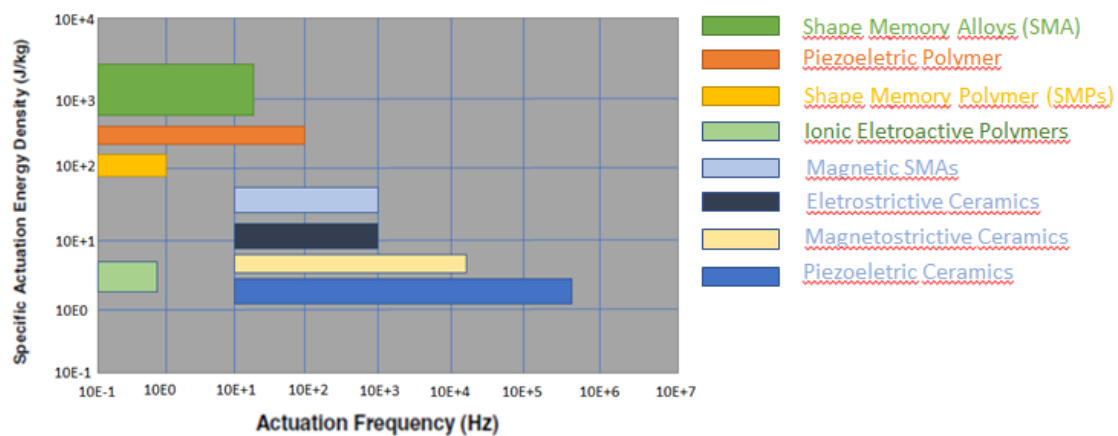
A seleção do tipo de material inteligente mais adequado para determinada aplicação depende de vários fatores. Porém os dois principais fatores tratam-se da densidade de energia de atuação e a frequência de atuação do material. Um material ideal deve aliar uma alta densidade de energia com uma alta frequência de atuação. (LAGOUDAS, 2008). Nas figuras abaixo podemos ver um comparativo dos materiais inteligentes.

Podemos verificar, pela Figura 19, a comparação dos materiais onde é relacionada a tensão de atuação com a deformação percentual.



**FIGURA 19:** COMPARATIVO TENSÃO X DEFORMAÇÃO DE MATERIAIS (ADAPTADO LAGOUDAS, 2008)

Conforme pode ser visto na Figura 20, a comparação dos materiais é feita entre a densidade de energia de atuação específica é relacionada com a frequência de atuação.



**FIGURA 20:** COMPARATIVO DENSIDADE DE ENERGIA X FREQUÊNCIA DE ATUAÇÃO (ADAPTADO LAGOUDAS, 2008)

### 3.2 Ligas com memória de forma

Ligas com memória de forma (do inglês, “Shape Memory Alloy” – SMA) são ligas que se caracterizam por possuir a capacidade de, após sofrer uma deformação decorrente de um esforço, retornar à sua forma original através de um estímulo. Este estímulo pode ter várias naturezas (mecânica, por campo elétrico, por campo magnético), mas a principal é a térmica.

Esse processo é possível quando a liga de memória de forma passa por duas transformações, a direta e a inversa. É importante notar que ambas as transformações são não difusivas (de modo diferente do que pode ocorrer nos aços, por exemplo), elas dependem exclusivamente da temperatura e da tensão, e não do tempo, causando uma distorção da rede cristalina e gerando as chamadas “variantes”, que são direções nas orientações dos cristais do material.

Essas transformações, microscopicamente falando, são modificações das fases cristalográficas que passam da fase estável a baixas temperaturas, martensita, para a estável a altas temperaturas, austenita e vice-versa. Essa troca de fase pode ocorrer ao longo de diferentes intervalos de temperatura, dependendo da composição química da liga (NESPOLI et al., 2010)

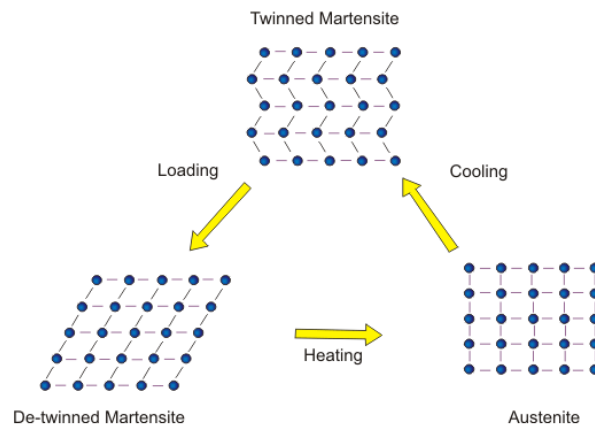
A transformação direta aparece ao se resfriar o material fazendo com que haja uma alteração dos seus constituintes, ou seja, a austenita vira martensita maclada. A fase austenítica normalmente se apresenta na forma cúbica e é estável a altas temperaturas. Com a diminuição da temperatura da liga, provoca-se um rearranjo em sua estrutura cristalina, gerando a martensita maclada (caracterizada pela acomodação de suas múltiplas variantes).

Ao sofrer um esforço externo, essa martensita maclada muda sua forma cristalina, passando a ser martensita não maclada. Isso provoca o aparecimento de uma direção de orientação dominante nos cristais do material. Além disso, esse carregamento mecânico causa uma deformação no comprimento desse componente.

Caso haja um aquecimento, elevado o suficiente e na ausência de tensões dessa liga, ocorre a outra transformação, a reversa. Essa transformação se distingue da primeira, pois há uma alteração em sua fase, passando de martensita não maclada para austenita. Nesse caso, há uma alteração na forma do material.

A Figura 21 esquematiza as transformações mencionadas anteriormente.



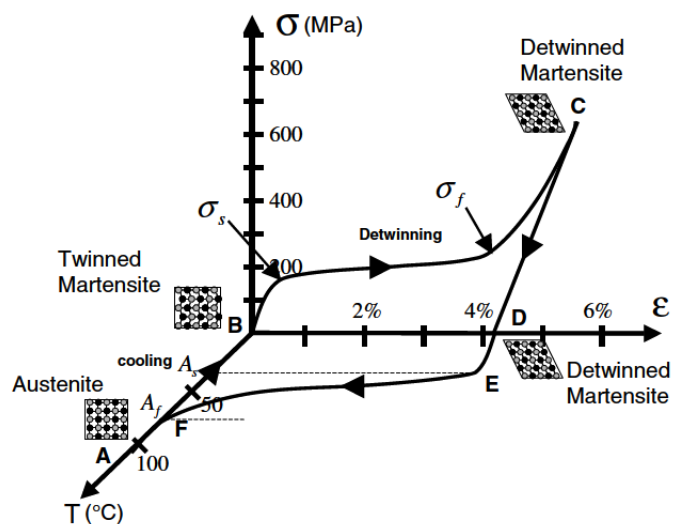


**FIGURA 21:** ESQUEMATIZAÇÃO DAS TRANSFORMAÇÕES OCORRIDAS EM UM MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA

(FONTE: [HTTP://NPTEL.AC.IN/COURSES/112104040/LECTURE34/34\\_2.HTM](http://NPTEL.AC.IN/COURSES/112104040/LECTURE34/34_2.HTM))

### 3.30 Efeito Memória de Forma

Na Figura 22, pode-se observar o efeito memória de forma (ou, Shape Memory Effect - SME), através do caminho de carregamento termomecânico de determinada liga. Esse efeito também pode ser conhecido como “One-way Shape Memory Effect”, pois a recuperação de sua forma ocorre apenas durante o aquecimento do material.



**FIGURA 22:** DIAGRAMA TENSÃO - DEFORMAÇÃO - TEMPERATURA APRESENTANDO O EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA DE UMA LIGA NITI (LAGOUDAS, 2008)

Pode-se notar que no ponto B, por exemplo, o material apresenta martensita maclada em sua estrutura, e, ao sofrer uma tensão, começa a sofrer deformação. Quando essa tensão supera o

nível de tensão de início ( $\sigma_s$ ), o processo de reorientação do material tem início, fazendo com que apareça uma martensita na forma não maclada. O processo se completa no momento em que se atinge o nível de tensão final ( $\sigma_f$ ), apresentando somente martensita não maclada. Essa estrutura cristalina tende a permanecer na liga, mesmo quando é retirada a tensão do material, como pode ser observado entre os pontos C e D.

A partir desse momento, a transformação reversa pode começar a acontecer. Através de um aquecimento do material, o constituinte começa a se alterar para austenita ao se atingir a temperatura  $A_s$  e só é concluído ao atingir um determinado patamar de temperatura ( $A_f$ ). Pode se observar ao longo desse aquecimento que a deformação que o material havia sofrido é totalmente recuperada - desde que não se tenha sofrido uma deformação plástica permanente.

A liga então é resfriada, sem a presença de tensões, havendo uma acomodação da estrutura, voltando a ser martensita maclada. Esse intervalo representa a transformação direta e não apresenta alterações na forma do material. Assim, o ciclo de memória de forma pode ser reiniciado, realizando sua série de atuação.

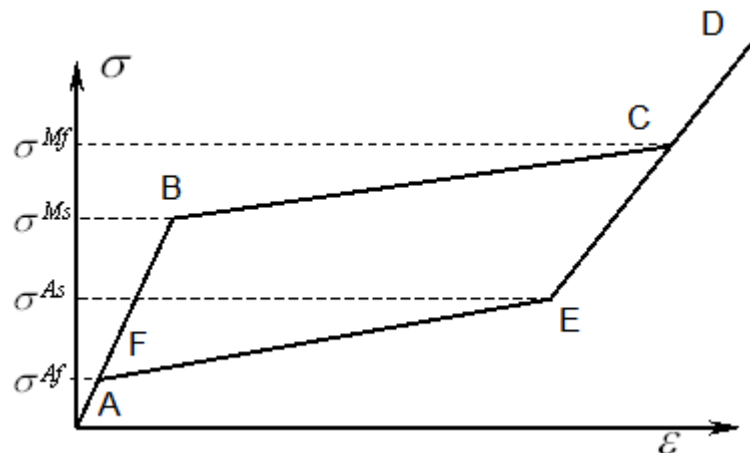
Esta “lembrança”, que estes materiais apresentam, é resultado das transformações martensítica termoelásticas. Elas são fenômenos independentes do tempo, mas que dependem da temperatura e que demonstram forte reversibilidade (WAYMAN & DUERIG, 1990).

### 3.4 Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade é um efeito que ocorre ao ser aplicado um carregamento mecânico em ligas com memória de forma a altas temperaturas. Para isso, é necessário que o carregamento seja elevado o suficiente, resultando na alteração da estrutura cristalina do material para martensita não maclada.

Esse fenômeno ocorre em temperaturas acima de  $A_f$ , assim, tem-se austenita estabilizada. Ele consiste no carregamento mecânico do material, gerando deformação, e no subsequente descarregamento do mesmo, recuperando sua forma inicial. O carregamento submetido faz com que apareça martensita não maclada no material, só havendo mudança em sua fase, quando esse carregamento é cessado.

Na Figura 23, pode-se observar o ponto A, com austenita estabilizada. Seguindo a trajetória de carregamento, é aplicada uma tensão ao material, fazendo com que ele comece a se deformar elasticamente e, então, há o início da transformação para martensita não-maclada, em B. Ao se alcançar  $\sigma_{Mf}$ , a transformação está concluída e não há mais fase austenítica no material.



**FIGURA 23:** CICLO DE CARREGAMENTO PSEUDOELÁSTICO EM UM MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA

Entre os pontos C e D, há um aumento da tensão sobre o material, gerando uma deformação elástica na martensita não maclada. Depois do ponto D, há um descarregamento do esforço mecânico e o material volta a ser austenítico, recuperando sua deformação. Esse processo costuma acontecer a uma temperatura constante, ou seja, somente a variação da tensão gera mudanças na liga.

Outro importante tópico que pode ser observado nesse gráfico é que, ao se completar o ciclo pseudoelástico, há a formação de uma histerese (representada pela área limitada pelas curvas de transformação direta e indireta), que é a energia dissipada por esse ciclo de transformação.

### 3.5 Efeito Memória de Forma Reversível

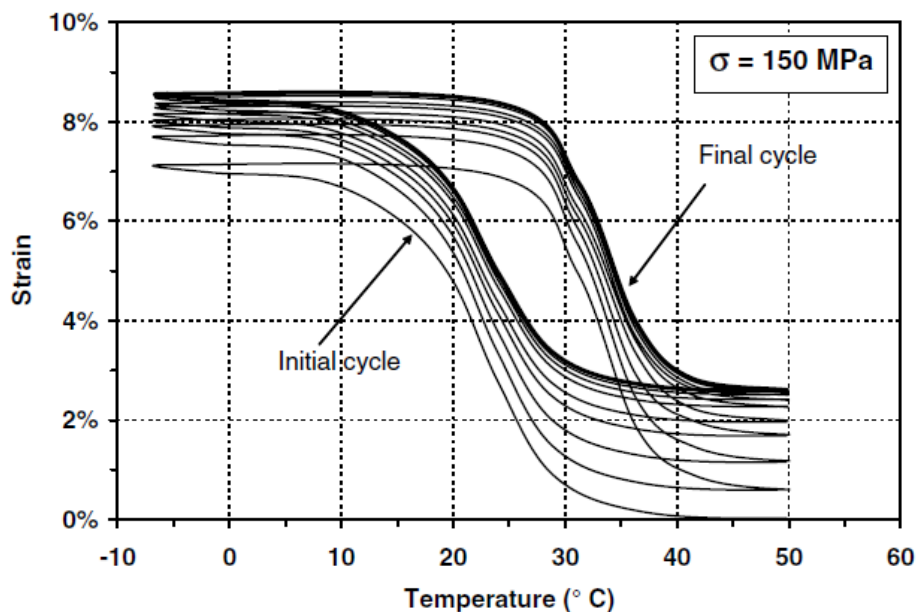
Também é possível obter transformações em ligas com memória de forma, ao se aplicar ciclos de carregamento térmico no material, mesmo sem a presença de esforços mecânicos aplicados. Esse efeito é conhecido como Efeito Memória de Forma Reversível (do inglês, “Two-way shape memory effect” - TWSME) e possui esse nome, pois, através dele, é possível obter uma variação na forma da liga tanto em seu aquecimento quanto em seu resfriamento. Essa característica do material é adquirida, diferentemente do efeito de memória de forma direto e a pseudoelasticidade, que são intrínsecas a ele.

Entretanto, ao fazer com que o material passe por determinadas trajetórias de carregamentos térmicos diversas vezes, implicamos a ele mudanças em sua microestrutura, causando alterações permanentes no seu comportamento.

O efeito memória de forma reversível pode ser observado em materiais com memória de forma que estão sofrendo repetidos ciclos termomecânicos durante uma trajetória de carregamento específica (“treinamento”). (LAGOUDAS, 2008).

Durante esses “treinamentos” citados no parágrafo anterior, são introduzidas imperfeições permanentes no material, que são as responsáveis por esse efeito sofrido. Essas imperfeições criam tensões internas que promovem a formação de uma variante preferencial específica, ao longo do resfriamento. Com isso, podem ocorrer efeitos secundários, como mudança no tamanho da histerese do material e nas temperaturas de transformação, além de haver uma saturação em sua deformação inelástica.

Na Figura 24, podemos observar o ensaio de um ciclo térmico de uma liga com memória de forma, sob tensão constante. Durante os primeiros ciclos ensaiados, o material consegue recuperar sua deformação praticamente de maneira completa após o seu aquecimento. Entretanto, quanto maior o número de ciclos a que esse material é submetido, essa capacidade de recuperação começa a ser prejudicada.



**FIGURA 24:** CICLO TÉRMICO DE UMA LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA NiTi, SOB O CARREGAMENTO DE 150 MPa (LAGOUDAS, 2008)

Pode-se notar, assim, que é gerada uma deformação plástica permanente no material a cada ciclo realizado.

### **3.6 Memória de Forma com Tensão Assistida**

Outro efeito que pode ser utilizado nas ligas com memória de forma é a Memória de Forma com Tensão Assistida (do inglês, “Stress Assisted Two Way Memory Effect” - SATWME). Esse efeito se caracteriza por trabalhar com ciclos de aquecimento e resfriamento, sob uma tensão constante ou variável.

Nesse efeito temos, por exemplo, um fio de memória de forma em seu estado de martensita maclada. Ao aplicarmos uma tensão constante e suficiente no fio, ele altera sua organização cristalina para martensita não maclada e sofre uma deformação. Então, podemos aquecê-lo para se transformar totalmente em austenita e depois resfriá-lo, assim como em um efeito de memória de forma simples. A distinção entre os dois efeitos está no resultado do resfriamento do material, ao invés de se transformar em martensita maclada, a liga retorna à variante não maclada, por ainda estar sofrendo um carregamento mecânico. Dessa forma, podemos obter o resultado desejado trabalhando apenas com ciclos térmicos, sem variar a tensão sobre o sistema.

O efeito memória de forma por tensão assistida apresenta-se como mais vantajoso para determinadas aplicações, pois, diferentemente, do efeito de memória de forma reversível, ele não reduz o nível de deformação alcançada durante os ciclos térmicos de atuação.

## Capítulo 4

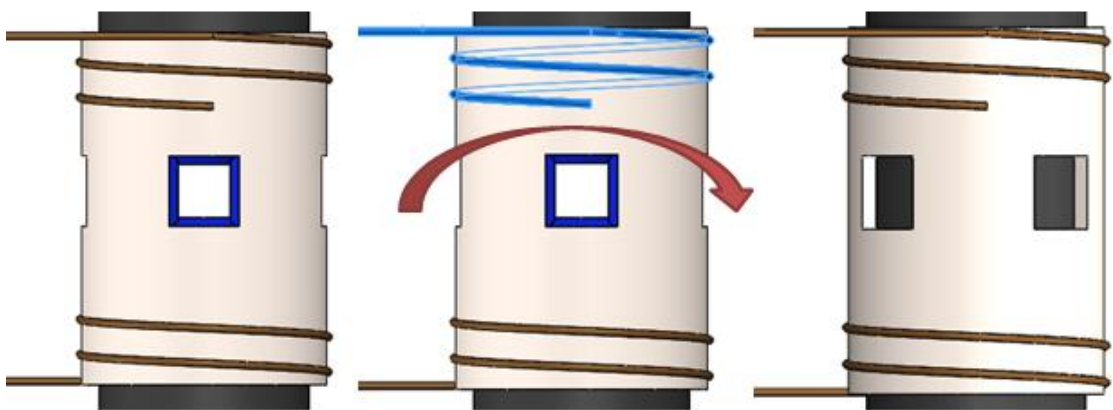
### 4 Projeto da válvula

Esse capítulo visa o projeto e construção de um modelo de válvula que utiliza as características das ligas com memória como meio de atuação. O protótipo foi desenvolvido para que pudessem ser realizados testes sobre o funcionamento e aplicação da teoria estudada.

A atuação da válvula será obtida através de ciclos de aquecimento e resfriamento de fios de liga com memória de forma fixados à estrutura da mesma. Cujo aquecimento do fio é realizado por meio de aplicação de corrente elétrica.

#### 4.1 Projeto Conceitual da Válvula

O modelo de válvula elaborado foi desenvolvido com um propósito de testar o conceito da atuação baseada na utilização de fios de SMA. Conforme pode ser visto na Figura 25. Com um pouco mais de pesquisa e investimento, será possível desenvolver uma estrutura mais compacta e eficiente de acionamento.

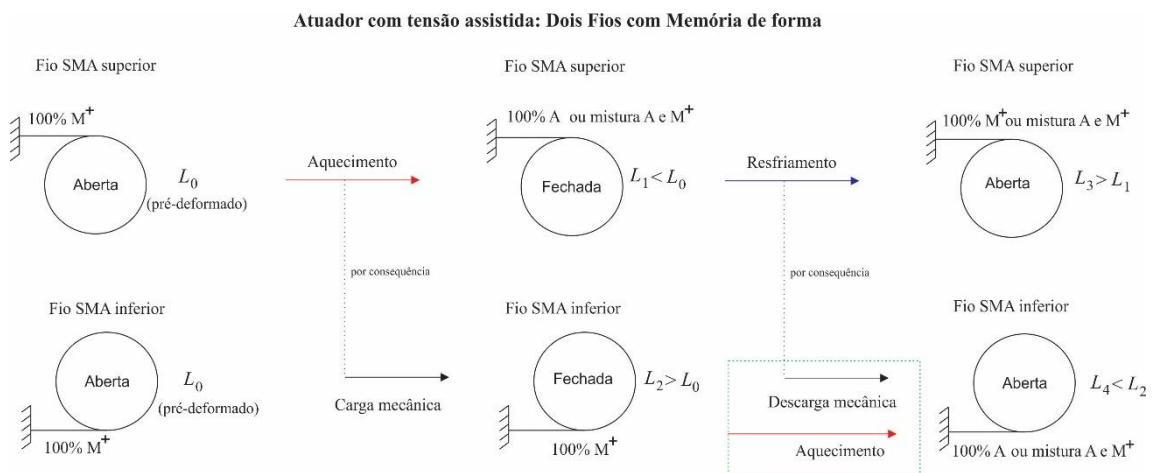


**FIGURA 25:** ESQUEMA DE ATUAÇÃO DA VÁLVULA

A ideia do funcionamento da válvula é que o fluxo de fluido ocorra no interior do tubo, que é a parte interna, e que o encontro dos rasgos desta parte com os rasgos existentes na parte externa, chamada camisa deslizante, permita a passagem de fluxo para a parte externa do tubo. Essa parte externa rotaciona em torno do tubo, permitindo assim a abertura e fechamento da válvula e esse

mecanismo de rotação se baseia no princípio do efeito memória de forma a partir do aquecimento de um dos fios (efeito Joule) enquanto o outro fica engastado. Esse princípio só é possível considerando a camisa como isolante térmico e elétrico com o fim de evitar qualquer variável além deste efeito.

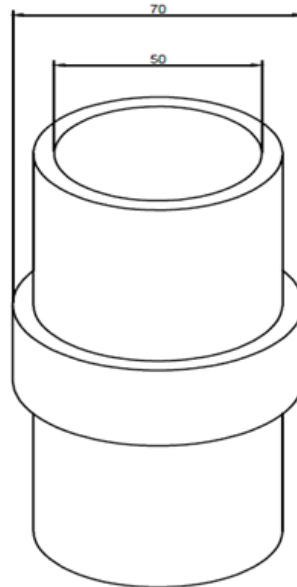
Durante a montagem é necessário que os fios, nos seus estados iniciais (martensíticos com variante maclada) sofram um carregamento mecânico, como ilustrado na Figura 26. Esse pré-carregamento é necessário para garantir a total reorientação para a variante não-maclada em ambos os fios. A Figura 26 mostra a vista superior do esquema simplificado do atuador evidenciando a montagem de dois conjuntos de fios SMA em uma camisa que pode rotacionar segundo o movimento dos fios SMA. Os fios são enrolados na camisa, tendo uma das extremidades presa na camisa e outra fora da mesma. Este dispositivo trabalha segundo o conceito de atuador antagônico. Ao se aquecer o fio superior, o mesmo diminui de tamanho retornando a fase austenítica. O movimento de rotação da camisa faz com que o fio inferior se deforme para acompanhar o movimento continuando na fase martensítica e com variante não maclada no regime linear. Ao resfriar o fio superior o mesmo volta a fase martensítica e se deforma, uma vez que o fio inferior funciona como elemento restituidor mantendo o sistema tensionado. Diferentes ciclos térmicos podem ser empregados para se verificar qual é a melhor configuração.



**FIGURA 26:** CICLO DE AQUECIMENTO, RESFRIAMENTO.

O fio de memória de forma pode ser alongado em no máximo 8% sem que haja plastificação. Os parâmetros usados para determinar o tamanho de fio ideal foram: considerando uma deformação de 5%, para que não haja fadiga funcional (AZEVEDO, 2016; PAIXÃO e RENTES, 2014). Com diâmetro externo de 70 mm para a camisa onde este fio será preso e um giro de 20 graus para garantir a abertura completa ou fechamento completo da válvula. Alguns cálculos

foram usados utilizando-se dessas constantes para determinar o comprimento do fio. A Figura 27 demonstra alguns parâmetros adotados.



**FIGURA 27:** FIGURA QUE DETERMINA OS DIÂMETROS DA ANÁLISE

“ $\Delta L$ ” que representa a nossa variação do fio.

“ $R$ ” sendo o raio da camisa onde o fio ficará fixado.

“ $\pi/9$ ” sendo a variação angular da camisa desejada.

$$\Delta L = R \cdot \pi/9$$

$$\Delta L = 12,2 \text{ mm}$$

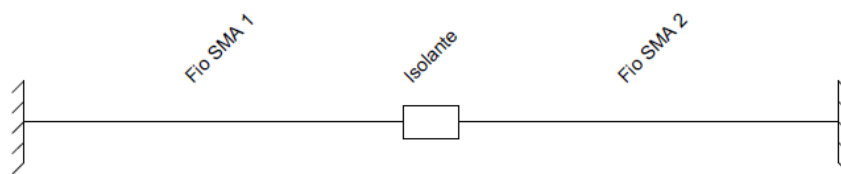
Ou seja, através desses cálculos, detectamos que o fio precisará sofrer um alongamento em torno de 12,2 milímetros. Sabendo que essa deformação deve corresponder em torno de 5% da dimensão total do fio, temos que o valor que o fio precisa ter é 244 milímetros. O que também corresponde a mais ou menos duas voltas completas em torno da camisa.



## Capítulo 5

### 5 Modelo Numérico

Para que seja possível uma verificação prévia da eficiência do modelo de válvula inteligente proposto, foi realizada uma análise numérica de uma representação esquemática da mesma. A Figura 28 representa uma simplificação do atuador que será analisado numericamente, os deslocamentos lineares poderão ser convertidos em angulares sabendo-se o raio da camisa a que estão fixos. Esses critérios foram utilizados de forma a simplificar o modelo numérico, uma vez que o modelo constitutivo utilizado é unidimensional (PAIVA & SAVI, 2006).



**FIGURA 28:** ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MECANISMO

#### 5.1 Modelo constitutivo

O modelo constitutivo visa auxiliar uma análise matemática mais precisa do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma, resultando em um melhor aproveitamento do potencial em determinada aplicação. Existem diversos modelos para a descrição desse comportamento e, devido a suas diversas aplicações, ainda ocorrem desenvolvimentos de teorias a partir de modelos existentes na literatura (PAIVA & SAVI, 2006).

O comportamento termomecânico das ligas com memória de forma pode ser descrito a partir da energia livre de Helmholtz,  $\Psi$ , e do pseudo-potencial de dissipação,  $\phi$ . Desta forma, o estado termodinâmico é completamente definido por um número finito de variáveis de estado (BAÊTA-NEVES et al., 2004; PAIVA et al., 2005).

Foi proposto por Fremond em 1996, um modelo tridimensional para verificação do comportamento termomecânico das SMAs, considerando as frações volumétricas da martensita induzida por tensão, M+, e da martensita induzida por compressão, M-. O modelo apresentou ainda restrições para coexistência das três fases: Martensita induzida por Tensão (M+), Martensita induzida por Compressão (M-) e Austenita (A) (SAVI et al., 2002; BAÊTA-NEVES et al., 2004; PAIVA et al., 2005).

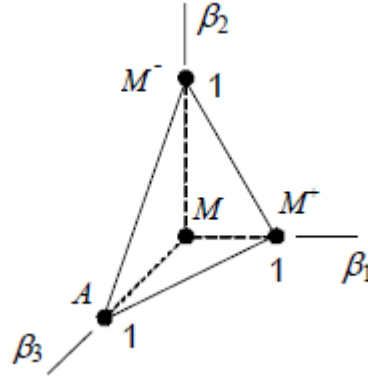
Contribuindo para uma melhor descrição do comportamento das ligas, SAVI et al. (2002) apresentaram um modelo onde foi incluída uma terceira fração volumétrica referente à martensita maclada (M), induzida por variação da temperatura, permitindo a descrição da fase estável quando o material está à baixa temperatura e na ausência de carregamento. Também foram consideradas a expansão térmica e deformação plástica no novo modelo. Além disso, o efeito de endurecimento foi representado por uma combinação de comportamentos cinemáticos e isotrópicos (SAVI et al., 2002).

Foi observado por BAÊTA-NEVES et al. (2004) que a largura horizontal do laço de histerese para a tensão-deformação era proporcional à vertical, gerando discrepâncias em relação aos resultados experimentais. Assim foi incluído pelos autores o alargamento horizontal da histerese de tensão-deformação. A correção da formulação considerando esse novo parâmetro contribuiu para uma melhor descrição do comportamento termomecânico das SMAs (PAIVA et al., 2006).

Foi observado também, a partir desses resultados experimentais, um comportamento assimétrico quando submetidas a carregamentos de tensão ou compressão. Quando deformadas por compressão, por exemplo, apresenta menor recuperação da deformação, tensão crítica de transformação de fase elevada e, portanto, uma histerese diferenciada. Esse comportamento assimétrico tem origem na assimetria de cada cristal da liga, a qual favorece a deformação do material (GALL et al., 1999; PAIVA et al., 2005; PAIVA et al., 2006).

Em 2005, PAIVA et al. aprimoraram o modelo ao acrescentar o fator de assimetria de tensão-deformação à formulação, com o objetivo de obter dados numéricos tão apurados quanto os experimentais e, conseqüentemente, melhor descrever o comportamento termomecânico das SMAs. O modelo considera a deformação ( $\epsilon$ ) e temperatura (T) e as frações volumétricas das fases macroscópicas como variáveis internas. Em resumo,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são associadas à martensita não-maclada, induzida por tensão e compressão, respectivamente, e a austenita como  $\beta_3$ . Há também a quarta variante martensítica,  $\beta_4$ , e está relacionada a fração volumétrica da martensita maclada. Da restrição referente à coexistência das quatro fases,  $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 1$ , é possível usar a

condição  $\beta_4 = 1 - \beta_1 - \beta_2 - \beta_3$  a fim de definir uma densidade de energia livre em termos de somente três variáveis, conforme pode ser visto na Figura 29.



**FIGURA 29:** REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA RESTRIÇÃO PARA COEXISTÊNCIA DAS FASES (PAIVA ET AL., 2005)

O presente estudo utiliza o modelo constitutivo de SAVI et al. (2005), devido sua capacidade de descrição dos diversos fenômenos complexos que ocorrem com as ligas com memória de forma. Esse modelo captura todas as informações sobre o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma, tais como efeito memória de forma, pseudoelasticidade, deformação plástica, a assimetria tensão-compressão, entre outras, representando uma excelente concordância com os dados experimentais (MONTEIRO et al., 2016). Contudo, desconsidera as parcelas referentes à plasticidade e assimetria de tensão-deformação para simplificação das simulações numéricas.

O comportamento termomecânico das ligas com memória de forma é descrito, simplificada, com as seguintes equações:

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

$$\dot{\beta}_1 = \frac{1}{\eta_1} \{ \alpha\varepsilon + \Lambda_1(T) + (2\alpha_h\alpha + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) + \alpha_h[E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_1} J_\pi \} + \partial_{\beta_1} J_\chi \quad (2)$$

$$\dot{\beta}_2 = \frac{1}{\eta_2} \left\{ -\alpha\varepsilon + \Lambda_2(T) - (2\alpha_h\alpha + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) - \alpha_h[E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_2}J_\pi \right\} + \partial_{\beta_2}J_\chi \quad (3)$$

$$\dot{\beta}_3 = \frac{1}{\eta_3} \left\{ -\frac{1}{2}(E_A - E_M)[\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)]^2 + \Lambda_3(T) + (\Omega_A - \Omega_M)(T - T_0)[\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)] - \partial_{\beta_3}J_\pi \right\} + \partial_{\beta_3}J_\chi \quad (4)$$

onde  $\sigma$  é a tensão e  $T_0$  a temperatura de referência. As propriedades do material são consideradas de acordo com cada fase, portanto são utilizados os subscritos A e M são empregados na formulação para representar austenita e martensita, respectivamente. Os módulos de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica são dados por  $E = E_M + \beta_3(E_A - E_M)$ , e  $\Omega = \Omega_M + \beta_3(\Omega_A - \Omega_M)$ , respectivamente.

Os parâmetros  $\eta_1, \eta_2$  e  $\eta_3$  estão associados à dissipação interna de cada fase do material. O termo  $\alpha_h$  define a largura horizontal do laço de histerese para tensão-deformação, enquanto que o parâmetro  $\alpha$  controla a altura do mesmo laço de histerese. A função indicatriz  $J_\pi$  é relacionada ao conjunto convexo  $\pi$  que pode ser interpretado geometricamente por um tetraedro no espaço (Figura 29). Já o termo  $J_\chi$  é uma função indicatriz do conjunto convexo  $\chi$ , que define as restrições associadas com a evolução das fases, isto é, considerando a história do carregamento para  $\dot{\sigma} \neq 0$ . Fisicamente, a função indicatriz relata as restrições para os sub-laços internos devidos as transformações de fases incompletas e também para a formação da martensita maclada (M).  $\Lambda_1(T) = \Lambda_2(T) = \Lambda(T)e\Lambda_3(T)$  são funções escalares da temperatura que definem o nível de tensão da transformação da fase e são definidas da seguinte forma (SAVI et al., 2002; OLIVEIRA, 2008):

$$\Lambda = \begin{cases} -L_0 + \frac{L}{T_M}(T - T_M), & \text{se } T > T_M \\ -L_0, & \text{se } T \leq T_M \end{cases} \quad (5)$$

$$\Lambda_3 = \begin{cases} -L_0^A + \frac{L_A}{T_M}(T - T_M), & \text{se } T > T_M \\ -L_0^A, & \text{se } T \leq T_M \end{cases} \quad (6)$$

onde  $T_M$  é a temperatura onde a fase martensítica se torna estável. Os parâmetros  $L_0$ ,  $L$ ,  $L_0^A$  e  $L_A$ , são relacionados com as tensões críticas nas transformações de fases.

Para lidar com as não linearidades existentes na formulação do problema, a solução do conjunto de equações constitutivas, representadas pelas equações de (1) a (4), é resolvida empregando a técnica de partição do operador (ORTIZ et al., 1983) e associada ainda a um procedimento iterativo.

BANDEIRA et al. (2006) implementou o modelo constitutivo apresentado como uma sub-rotina UMAT (do inglês, “user material routine”) para que possa ser usado em conjunto com o programa de elementos finitos ABAQUS. Esta ferramenta permite adicionar modelos constitutivos de diferentes materiais que não constam na biblioteca do software de elementos finitos.

## 5.2 ABAQUS

Para a realização da análise numérica do projeto proposto, foi utilizado o software comercial baseado em elementos finitos ABAQUS com a sub-rotina UMAT desenvolvida por BANDEIRA et al. (2006). Com ele podemos obter o comportamento termomecânico dos fios SMA quando são submetidos a diferentes combinações de carregamentos termomecânicos dentro de um sistema. Esse software é auxiliado pela linguagem de programação FORTRAN e por outro programa, ORIGIN, que realiza plotagem e análise de gráficos e diagramas.

De maneira resumida, o método de elementos finitos se baseia em achar uma solução numérica para determinado problema, através de uma divisão da geometria em uma malha, simplificando a análise do problema. A malha consiste em elementos, que são pequenos fracionamentos do todo, e nos nós, que são as junções dos elementos.

## 5.3 Desenvolvimento do Modelo numérico

O modelo simplificado definido para ser simulado numericamente se assemelha ao projeto real do atuador de SMA proposto na parte experimental deste trabalho. Esse modelo se baseia em dois fios SMA, ambos com 200 mm de comprimento e 0,5 mm de diâmetro, separados por um material isolante extremamente rígido entre eles. Todos os elementos são do tipo treliçado com dois nós, classificados como T2D2.

Para o material do fio SMA, foram selecionadas 13 variáveis independentes (segundo o modelo constitutivo proposto por SAVI et al., 2002), enquanto que os parâmetros adotados para modelo constitutivo mostrado na seção 5.1 foram previamente obtidos por MONTEIRO et al.

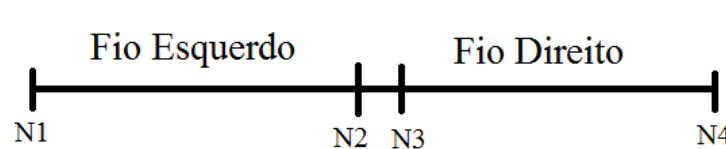
(2016) e são mostrados na Tabela 1. A metodologia foi baseada no estudo proposto por MONTEIRO et al. (2016), analisando-se sistemas de diferentes combinações de fios SMA e, aplicando neles, carregamentos térmicos e mecânicos.

**TABELA 1:** PARÂMETROS DO MODELO (MONTEIRO ET AL., 2016)

$E_A$ (GPa)	49,4	$\alpha_h$	0,046
$E_M$ (GPa)	23	$L_0$ (MPa)	0,35
$\Omega_A$ (kPa/K)	740	$L_0^A$ (MPa)	0,63
$\Omega_M$ (kPa/K)	170	$\alpha$ (MPa)	90
$T_M$ (K)	329,2	$\eta_1$ (MPa.s)	4,5
$L$ (MPa)	4,15	$\eta_2$ (MPa.s)	4,5
$L^A$ (MPa)	4,15	$\eta_3$ (MPa.s)	4,5

O material isolante foi definido com um diâmetro de 0,5 mm, comprimento de 10 mm, condutividade de 0,02 W/(m.K), coeficiente de Poisson de 0,03 e elasticidade de 2000 GPa. E o objetivo é que ele não interfira na deformação dos fios e impeça a transferência de calor entre ambos.

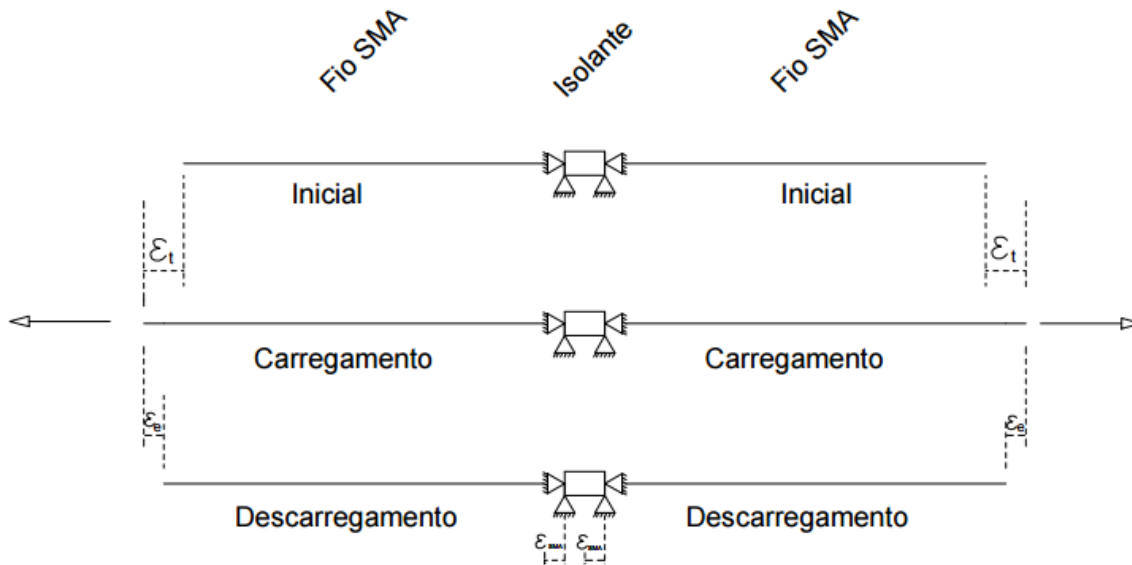
Embora o modelo proposto por SAVI et al. (2005) seja unidimensional, é possível determinar o deslocamento angular do atuador descrito na seção 4.1, a partir da divisão do deslocamento linear obtido no modelo numérico pelo raio da camisa ao qual ele está posicionado. A Figura 30 é uma ilustração esquemática do modelo usado no software ABAQUS, contendo os dois fios SMA, o material isolante entre eles e quatro nós.



**FIGURA 30:** REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO SIMPLIFICADO USADO NO SOFTWARE ABAQUS

Os fios sofreram inicialmente um carregamento de 700 MPa de tensão mecânica para que ambos comecem na condição 100% martensíticos com variante não maclada. Nesse momento, os Nós N2 e N3 (apresentados na Figura 30) são estabelecidos como pontos de velocidade nula,

impedindo sua movimentação em qualquer direção. Posteriormente há um descarregamento mecânico do sistema, como mostra a Figura 31, e, em outros momentos, quando há variação de temperatura dos fios, os nós N1 e N4 passam a ser pontos de velocidade nula.



**FIGURA 31:** ESQUEMATIZAÇÃO DAS ETAPAS DE CARREGAMENTO NOS FIOS SMA

Esses diversos momentos citados podem ser diferenciados no ambiente computacional como sendo “Steps” – que são etapas de carregamentos aos quais o material estará sujeito.

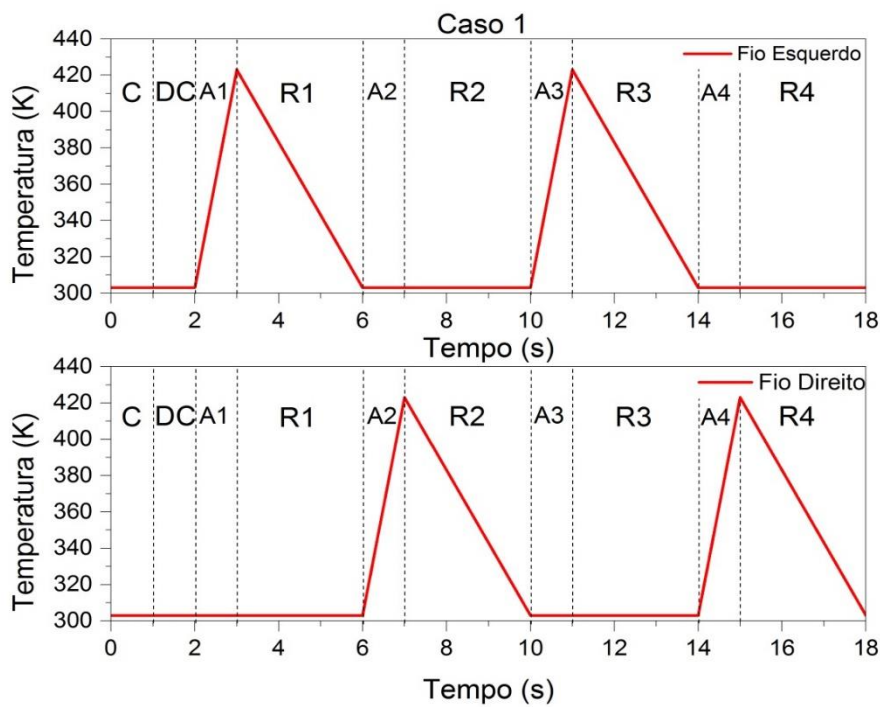
## 5.4 Casos

A seguir, foram realizadas 4 análises de casos com diferentes configurações de carregamento térmicos aplicados ao modelo apresentado anteriormente. Com isso, será possível obter uma otimização do dispositivo variando parâmetros sem que seja necessária uma grande alteração em sua estrutura.

### 5.4.1 Caso 1

O primeiro caso analisado - Caso 1 - apresenta após o carregamento mecânico (C) e descarregamento mecânico (DC), ciclos térmicos definidos como mostra a Figura 32. De forma inicial, há um aquecimento do Fio Esquerdo, que se apresenta com 303 K e aumenta sua temperatura até 423 K (A1), na sequência, ocorre seu resfriamento (R1), novamente até a

temperatura de 303 K. Esse processo se repete para o Fio Direito, que sofre uma carga térmica, aumentando sua temperatura de 303 K para 423 K (A2) e se resfriando a seguir, voltando para sua temperatura inicial de 303 K (R2). Essa sequência de acontecimentos gera um ciclo térmico completo nos fios SMA e é repetida mais uma vez, causando um aquecimento no Fio Esquerdo (A3), resfriamento do Fio Esquerdo (R3), aquecimento no Fio Direito (A4) e por fim, um resfriamento do Fio Direito (R4).



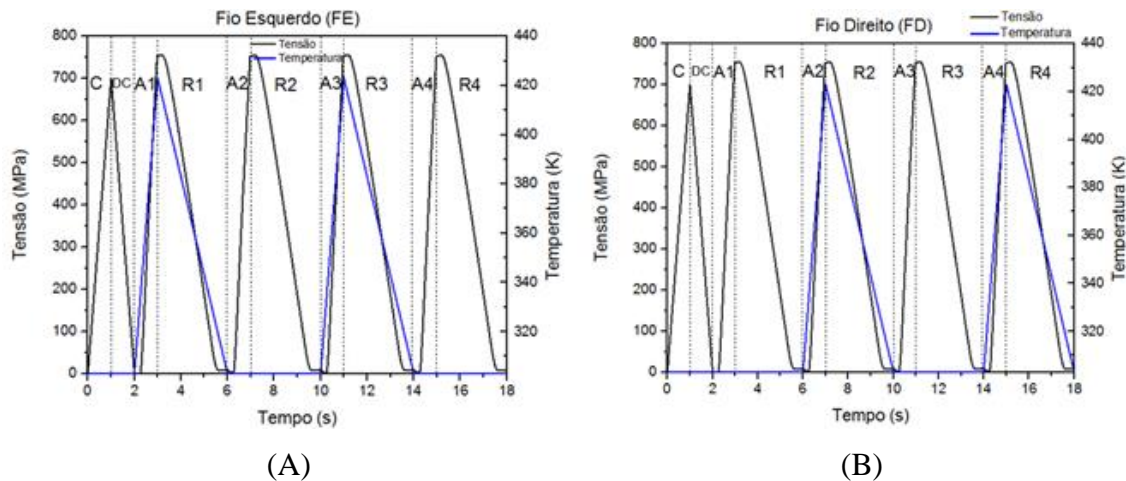
**FIGURA 32:** CICLOS TÉRMICOS APLICADOS NO CASO 1

A Figura 33 (a) mostra os resultados de tensão durante os carregamentos térmicos empregados aos Fios SMA durante o Caso de análise 1, o carregamento mecânico é realizado variando a tensão de 0 a 700 MPa e retornando ao valor nulo, entre 0 e 2 segundos (as análises apresentadas são quase-estáticas, logo o tempo é apenas fictício, e usado pelo ABAQUS durante as simulações para construir as curvas de carregamentos mecânico e térmico impostas durante os Steps). Após esse momento, o valor continua sendo nulo. A temperatura, por sua vez, começa em 303 K e, a partir de 2 segundos, há um aumento do seu valor até 423 K. Esse aumento de temperatura gera uma tensão no Fio Esquerdo, resultado da transformação de sua fase em Austenita. Em 3 segundos, posteriormente, ocorre o resfriamento do Fio Esquerdo, ao longo de mais 3 segundos.



Esse ciclo térmico somente é aplicado ao Fio Esquerdo, porém, a partir da Figura 33 (b) é possível notar que a tensão no Fio Esquerdo é transmitida ao Fio Direito em forma de tensão de reação.

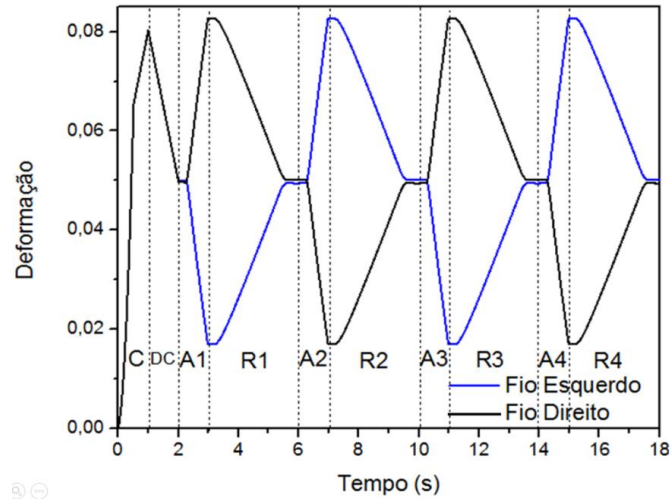
Esse processo de aquecimento e resfriamento aplicado entre 2 e 6s ao Fio Esquerdo se repete para o Fio Direito, gerando também uma tensão de reação, dessa vez, no Fio Esquerdo.



**FIGURA 33:** RELAÇÃO DA TENSÃO - TEMPERATURA X TEMPO NO CASO 1 (A) PARA O FIO ESQUERDO E (B) PARA O FIO DIREITO

É importante notar que em todas as análises, implementou-se uma taxa de resfriamento menor do que a usada durante o aquecimento, isto porque o modelo de SAVI et al. (2005) possui uma dependência implícita na taxa de carregamento e viu-se a necessidade de utilizar uma taxa menor para que o material pudesse ter a resposta completa ao fim do ciclo de resfriamento.

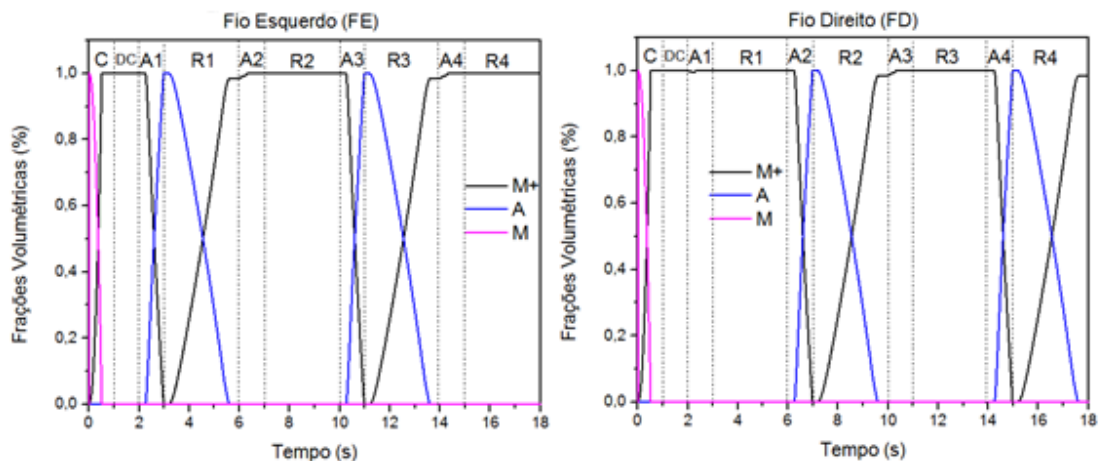
A Figura 34 mostra a deformação dos fios SMA ao longo do tempo, ambos os fios são deformados igualmente entre 0 e 2 segundos -devido ao carregamento e o consequente descarregamento mecânico a eles aplicados. Após esse momento, o Fio Esquerdo começa a sofrer um aumento em sua temperatura, causando uma diminuição de seu comprimento. Como já foi mostrado, esse fato gera uma tensão de reação no Fio Direito, ocasionando um aumento na sua deformação de maneira simétrica à curva correspondente ao Fio Esquerdo. Depois de retornada a temperatura do Fio esquerdo à temperatura de 303 K, entre 3 e 6 s, ele recupera parte de seu comprimento, voltando a um valor próximo de 0,05 de deformação. Esse efeito acompanhado pelo Fio Direito. A partir de então é a vez do Fio Direito sofrer uma carga térmica, repetindo o efeito anterior, porém, dessa vez de maneira invertida, o Fio Direito diminui sua deformação, enquanto que o Esquerdo aumenta de comprimento.



**FIGURA 34:** DEFORMAÇÃO SOFRIDA PELOS FIOS ESQUERDO E DIREITO

Todas essas transformações térmicas e mecânicas aplicadas ao material causam alterações nas frações volumétricas de suas fases. A Figura 35 mostra as respectivas quantidades de Austenita (A), Martensita Maclada (M) e Martensita não Maclada (M+), ao longo da análise numérica.

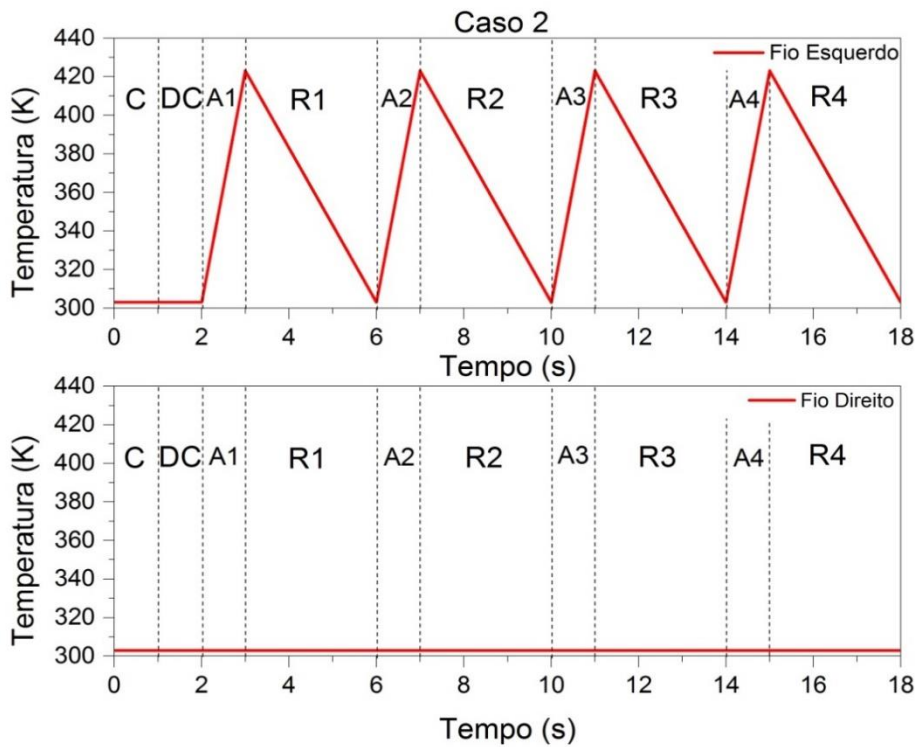
Como pode ser notado, ao início do experimento, o fio apresenta-se totalmente na forma de martensita maclada. Com o carregamento mecânico que é aplicado ao material, essa fase diminui seu percentual, chegando a zero, enquanto há um aumento da fase martensita não-maclada; esse arranjo se mantém ao longo do descarregamento também. Ao entrar na fase de aquecimento, após 2 segundos, a fase martensítica (estável a baixas temperaturas) começa a se transformar em fase austenítica (estável a altas temperaturas), como já era esperado nesse experimento. A austenita se mantém predominante no material até que o resfriamento do fio atinja a temperatura necessária e ele retorne ao seu estado de martensita não maclada.



**FIGURA 35:** FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO CASO 1

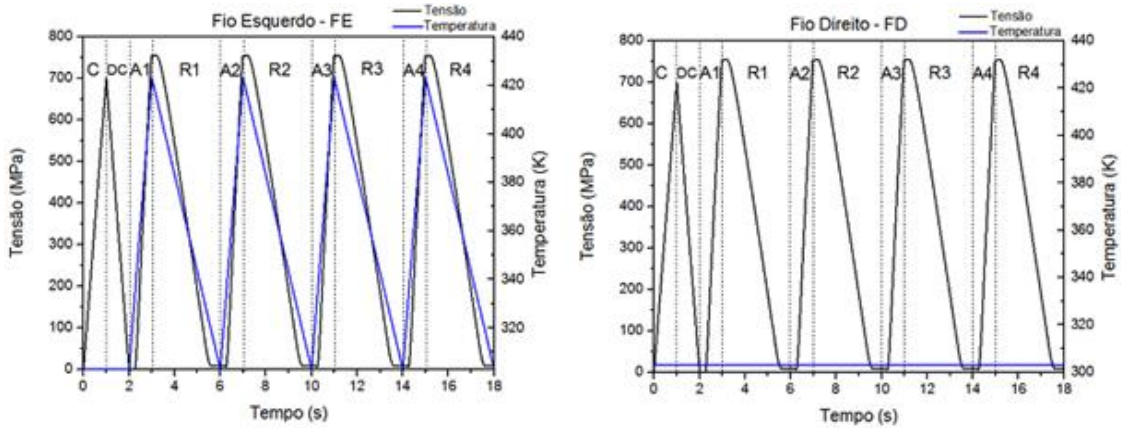
### 5.4.2 Caso 2

O Caso 2, embora seja similar ao Caso 1 em ciclos de carregamento térmico, difere-se por somente um dos fios apresentar variação de temperatura (Fio Esquerdo), ou seja, o Fio Direito manteve sua temperatura constante ao longo de todo o ensaio, como é apresentado na Figura 36. Esse arranjo pode ser utilizado na prática, por exemplo, quando é inviável o aquecimento de um dos fios, dessa forma, apenas um dos fios SMA sofreria o aquecimento-resfriamento.



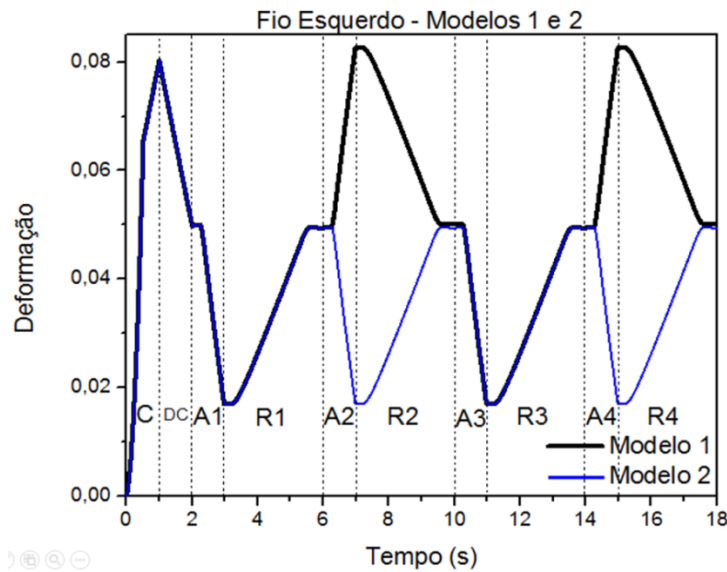
**FIGURA 36:** CICLOS TÉRMICOS APLICADOS NO CASO 2

Novamente acontece o carregamento inicial (passando a martensita maclada para não maclada), idêntico ao caso 1. É interessante notar que a transformação, para austenita, acontece somente no fio esquerdo e o fio direito sofre as forças de reação do processo, conforme indica a Figura 37.



**FIGURA 37:** RELAÇÃO DA TENSÃO-TEMPERATURA X TEMPO NO CASO 2

Na Figura 38 são expostas apenas as deformações sofridas pelo Fio Esquerdo, tanto no caso 1, como no caso 2. A partir desse gráfico podemos observar que ambos os fios sofrem uma variação de tamanho de mesma intensidade, para cada etapa. A diferença entre os casos é que, devido à mudança de temperatura, o Fio Esquerdo do caso 2 apenas se deforma diminuindo seu tamanho, enquanto que no caso 1, em determinado momento ele aumenta seu comprimento, em outro ele diminui o mesmo.



**FIGURA 38:** DEFORMAÇÕES APRESENTADAS PELO FIO ESQUERDO NOS CASOS 1 E 2.

Na Figura 39 é apresentado o resultado dos ciclos realizados para o caso 2, onde somente o fio esquerdo sofreu aquecimento e resfriamento. Identificamos que não há modificação da fração volumétrica para o fio direito, permanecendo como martensita não-maclada, isso pode ser explicado por não sofrer nenhum carregamento térmico durante a análise.

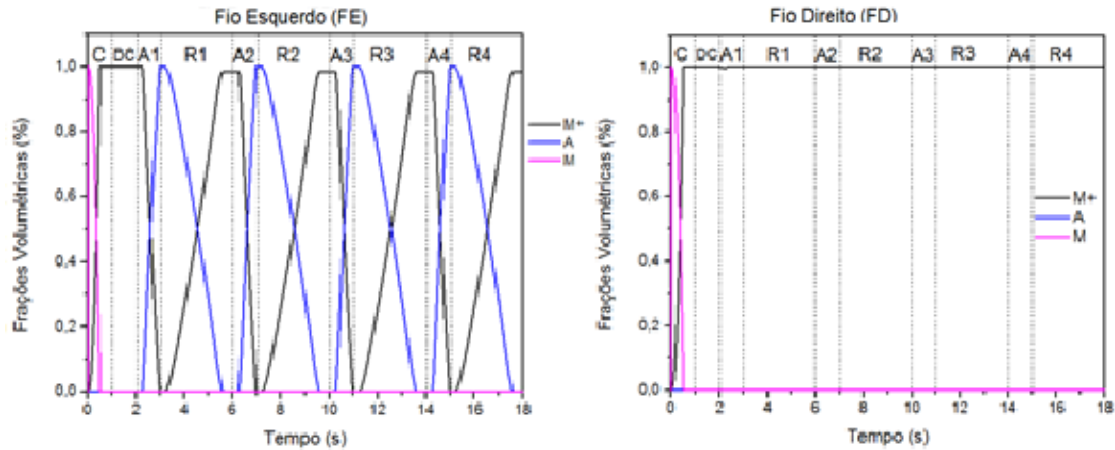


FIGURA 39: FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO CASO 2

### 5.4.3 Caso 3

O terceiro caso proposto visa aquecer e resfriar os fios SMA de maneira intercalada, enquanto um fio sofre aquecimento, o outro será resfriado, e vice-versa. Nesse caso, há o interesse em se obter uma otimização no funcionamento da válvula ao não se esperar o total resfriamento de um dos fios para se começar o aquecimento do seguinte.

Os gráficos de temperatura do material podem ser observados na Figura 40.

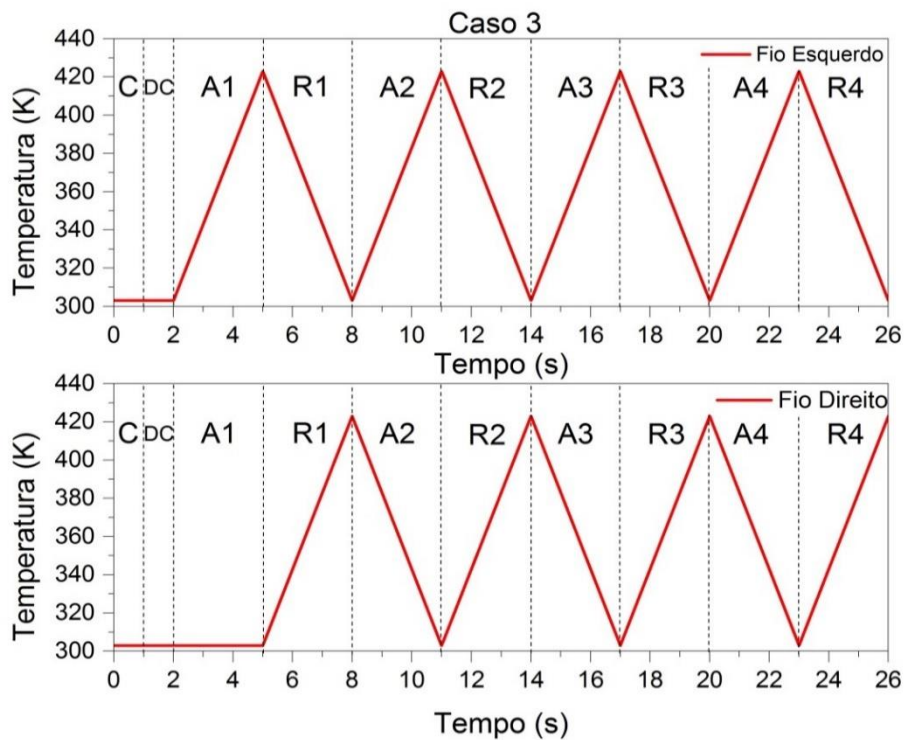
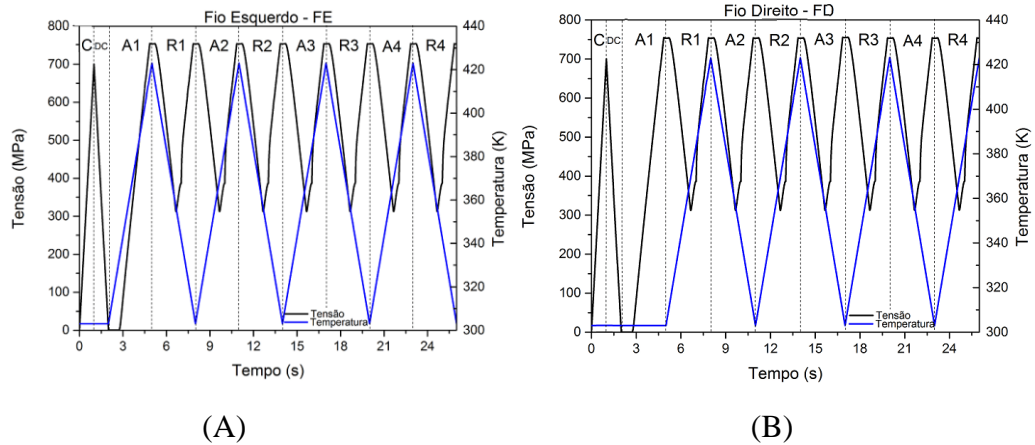


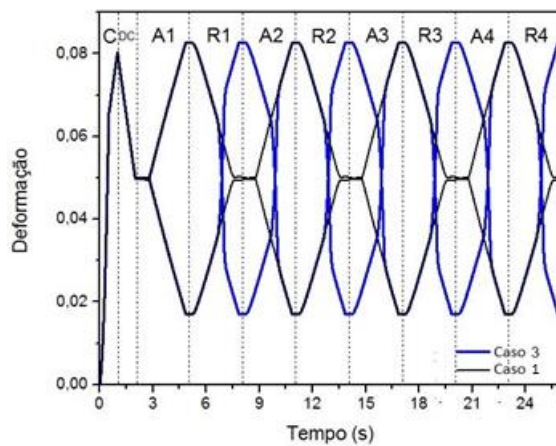
FIGURA 40: CICLOS TÉRMICOS APLICADOS NO CASO 3

A partir da Figura 41 é possível registrar que a tensão nunca chega a zero no sistema, mantendo-se sempre seu ponto mínimo na metade do sistema (em torno de 350 MPa). Esse efeito da tensão é explicado pelo sistema sempre se manter carregado devido ao aquecimento de um dos fios enquanto o outro resfria.



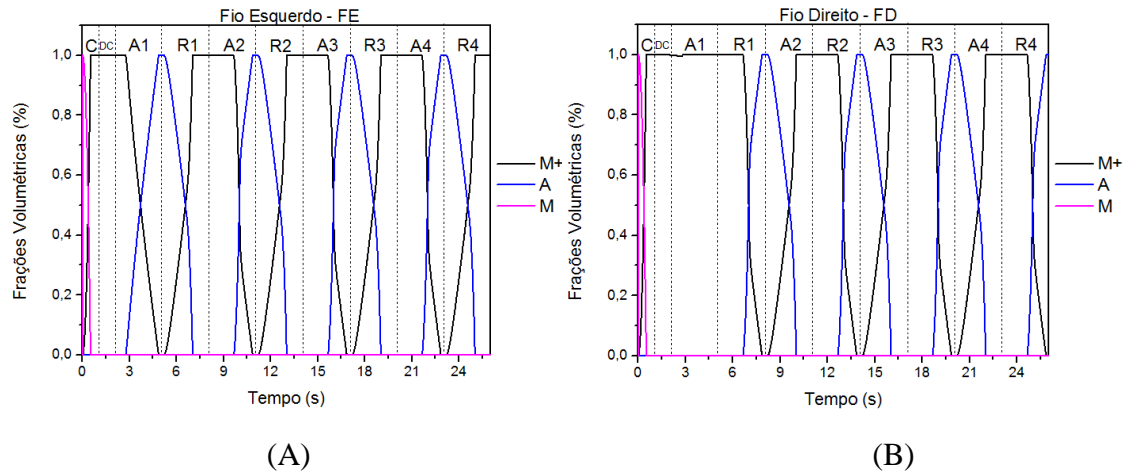
**FIGURA 41:** RELAÇÃO DA TENSÃO - TEMPERATURA X TEMPO NO CASO 3 (A) PARA O FIO ESQUERDO E (B) PARA O FIO DIREITO

Na Figura 42, há uma comparação entre os casos 3 e 1 (o tempo total do caso 1 foi alterado para ser igual ao tempo total do caso 3), a partir da deformação sofrida por ambos os Fios. Podemos observar que a intensidade da deformação sofrida é similar, porém, também é mostrado que o caso 3 possui um tempo de resposta menor que o caso 1. Essa configuração pode ser útil por diminuir o tempo de atuação do dispositivo, levando a vantagens em sua utilização.



**FIGURA 42:** DEFORMAÇÕES SOFRIDAS NOS CASOS 3 E 1

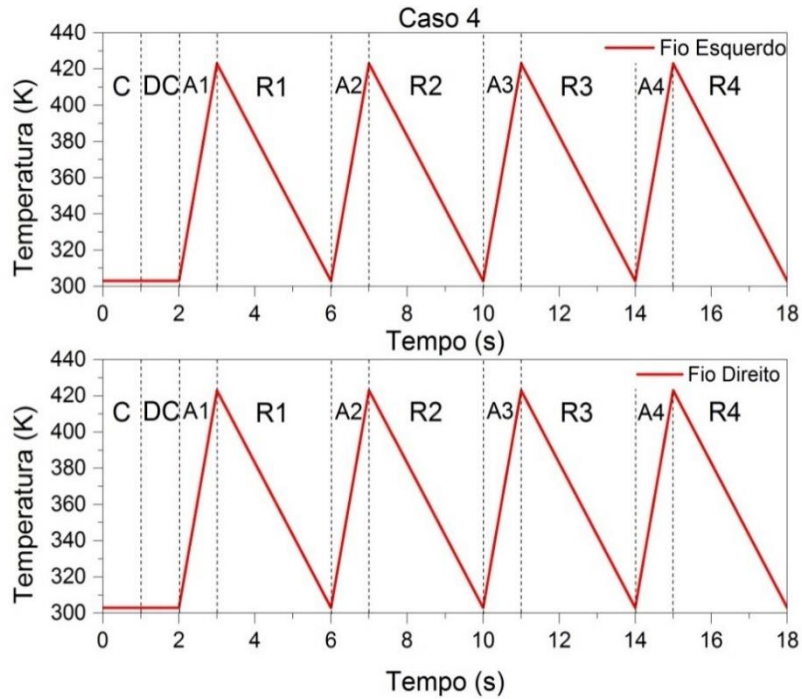
Na Figura 43 identificamos as variações das frações volumétricas para o caso 3, onde o aquecimento do fio direito ocorre no mesmo instante do resfriamento do fio esquerdo. Verifica-se que a variação volumétrica da martensita não-maclada para austenita e vice-versa até sua total transformação está de acordo com os ciclos para ambos os fios.



**FIGURA 43:** FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DO CASO 3 (A) PARA O FIO ESQUERDO E (B) PARA O FIO DIREITO

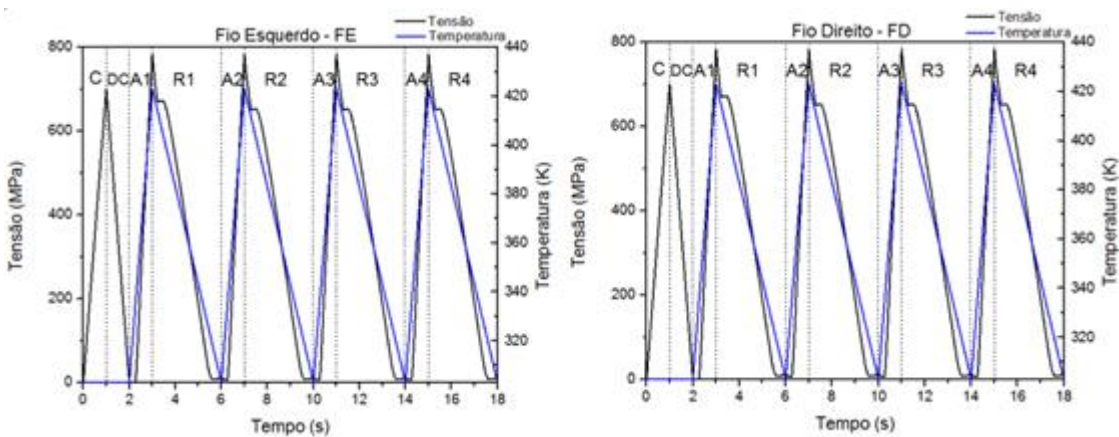
#### 5.4.4 Caso 4

O Caso 4 possui a mesma motivação do Caso 3, aplicar mais carregamentos térmicos aos fios, em menos tempo, a fim de se verificar uma possível melhora no funcionamento do dispositivo. Nesse estudo foram aplicados ciclos de aquecimento-resfriamento de maneira sobreposta, enquanto um dos fios sofre aquecimento/resfriamento, o outro também sofrerá o mesmo efeito, ao mesmo tempo, como mostra a Figura 44.



**FIGURA 44:** CICLOS TÉRMICOS APLICADOS NO CASO 4

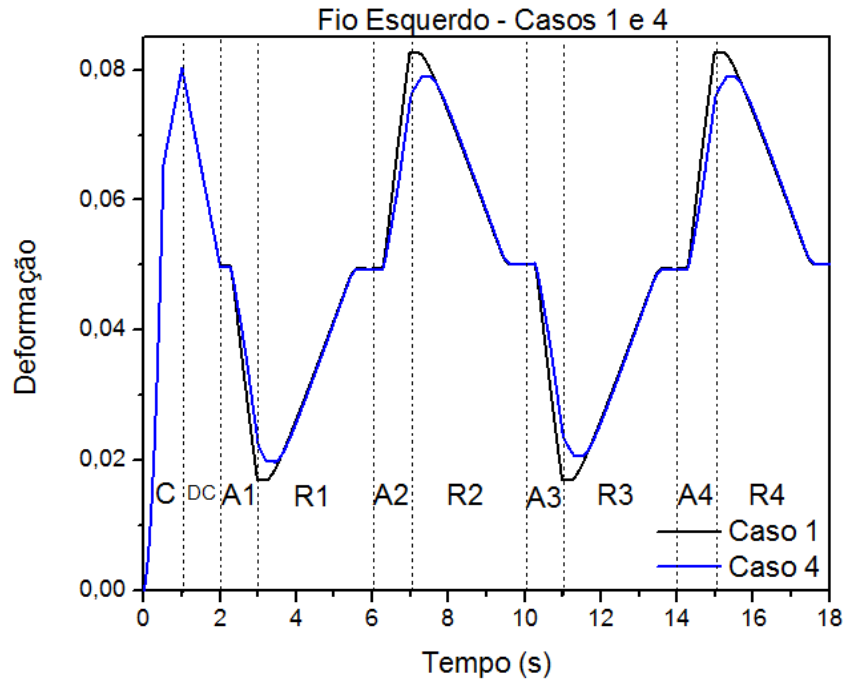
A análise a seguir possui uma particularidade, existe um degrau de tensão próximo ao pico de tensão máxima de cada ciclo. Esse efeito é uma característica do sistema que propõe sobrepor o ciclo de dois fios e indica que mesmo durante o resfriamento os fios se mantêm tensionados por mais tempo no valor de quase 700 MPa, como indicado na Figura 45.



**FIGURA 45:** RELAÇÃO DA TENSÃO - TEMPERATURA X TEMPO NO CASO 4

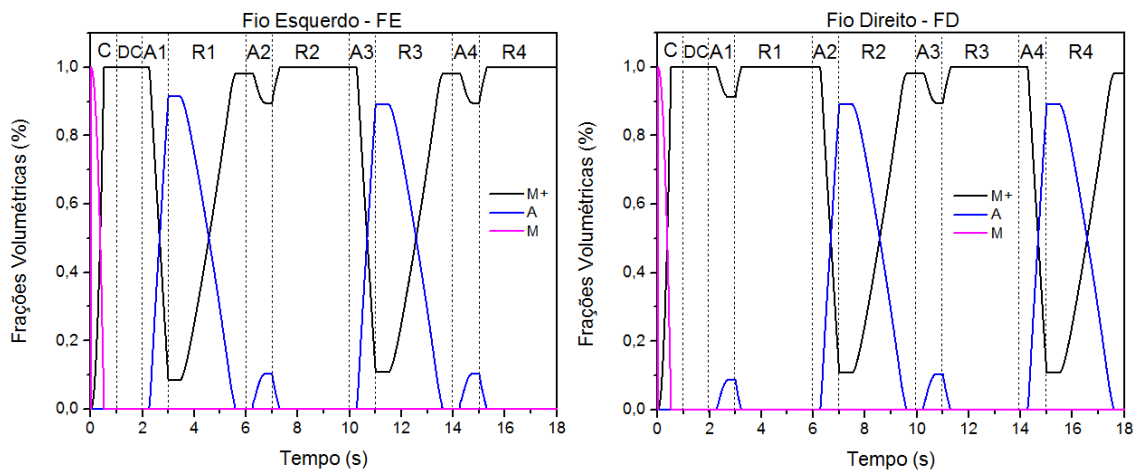
Como já era esperado, o caso 4 sofreu uma deformação menor que o caso 1, em cada ciclo térmico aplicado, como mostra a Figura 46.





**FIGURA 46:** DEFORMAÇÕES SOFRIDAS NOS CASOS 1 E 4

Na Figura 47 identificamos que, devido aos carregamentos térmicos realizados, a transformação das frações volumétricas da martensita não-maclada em austenita e vice-versa não acontecem completamente, visto que o aquecimento do fio 1 (A1) ocorre simultaneamente ao aquecimento do fio 2 (A1). Esse fato explica a menor deformação sofrida pelos fios no caso 4 em relação ao caso 1.



**FIGURA 47:** FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS AO LONGO DA ANÁLISE DO CASO

## Capítulo 6

### 6 Modelo experimental

Primeiramente será apresentada a metodologia experimental utilizada para concepção do modelo físico, essa metodologia é essencial para calibragem e dimensionamento do sistema. Seguida a metodologia, serão apresentados os critérios para a montagem do aparato a fim de se verificar a proposta do trabalho. Por fim, serão realizados alguns ensaios experimentais e serão apresentados seus resultados.

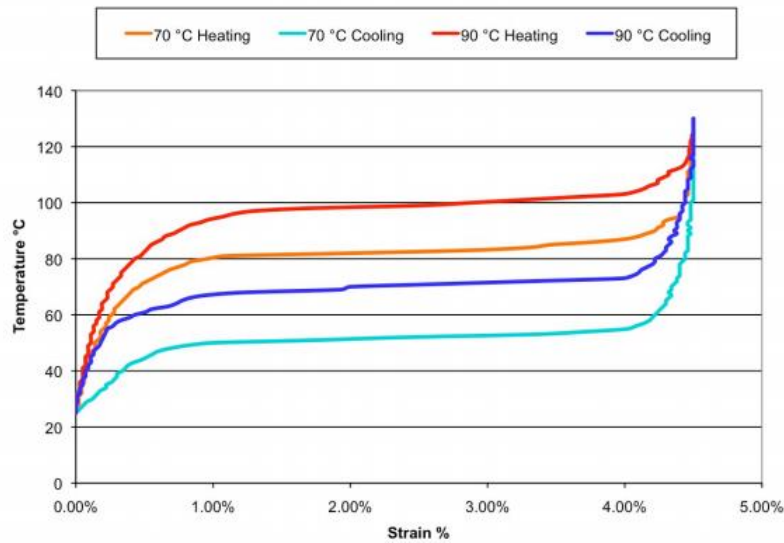
#### 6.1 Metodologia Experimental

O fio NiTi é da empresa Dynalloy e as características e propriedades físicas do fio recebidas do fornecedor podem ser acompanhadas pela Tabela 2.

**TABELA 2: DADOS FORNECIDOS PELA EMPRESA DYNALLOY**

FIO FLEXINOL®	
Diâmetro	0,5 mm
Força de tração máxima	3,5 kg
Densidade	6,45 g/cm <sup>3</sup>
Calor específico	0,2 cal/g * °C
Ponto de fusão	1300°C
Condutividade térmica	0,18 W/cm * °C
Coefficiente de expansão térmica – Fase Martensita	6,6x10-6/°C
Coefficiente de expansão térmica – Fase Austenita	11x 10-6 /°C
Resistência Elétrica – Fase Martensita	80 micro-ohms * cm
Resistência Elétrica - Fase Austenita	100 micro-ohms * cm

Além dos dados da Tabela 2, o fornecedor ainda conta com um gráfico, indicado na Figura 48, que correlaciona a temperatura de aquecimento e resfriamento e a deformação aproximada do fio.

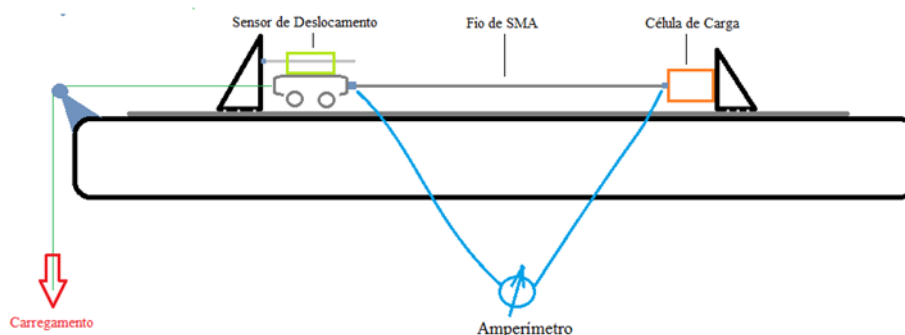


**FIGURA 48:** RELACIONA A TEMPERATURA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO COM A DEFORMAÇÃO DO FIO

## 6.2 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica que será apresentada aqui foi obtida no trabalho do projeto de iniciação científica do aluno Humberto Terço com orientação do Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (TERÇO, 2016) e será utilizada neste trabalho.

O aparato experimental, para o teste quase-estático, montado pelo Humberto em TERÇO, H. (2016) pode ser visto na Figura 49, tendo um fio de SMA com diâmetro de 0,5 mm, um amperímetro, um sensor de deslocamento e uma célula de carga (para mais detalhes ver TERÇO, H. (2016)). O carregamento mecânico foi realizado com carga (de 0 a 10kg) e descarga controlada de areia no reservatório mostrado na Figura 50. A partir destes dados conseguimos obter um gráfico que relaciona o deslocamento (em mm) com a força (em N) e está exibido na Figura 51.

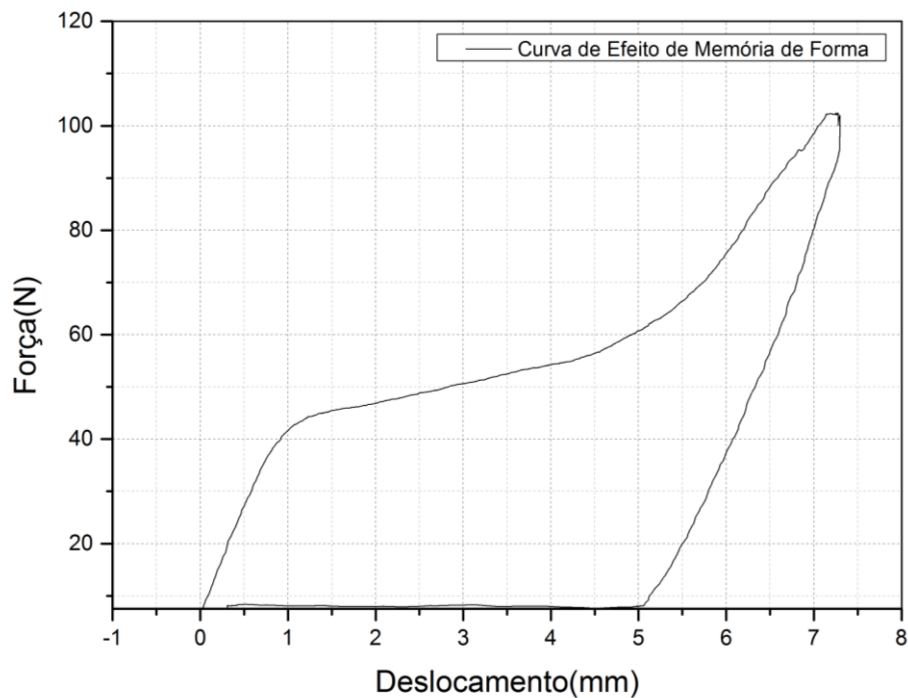


**FIGURA 49:** ENSAIO DE TRAÇÃO (TERÇO, 2016).



**FIGURA 50:** FORÇA X DESLOCAMENTO (TERÇO, 2016).

A Figura 51 mostra a curva força versus deslocamento do fio SMA obtida com os resultados dos ensaios (TERÇO, 2016). Pode-se verificar um deslocamento de aproximadamente 7 mm, que para o fio testado representa 7% de deformação visto que o mesmo possuía 100 mm de comprimento inicial. Esta curva de caracterização mecânica do fio SMA é importante para o dimensionamento do sistema proposto no capítulo anterior. Além disso, serve como base para a calibração do modelo numérico. Porém, neste trabalho não foi possível fazer a recalibração dos parâmetros do modelo numérico apresentados na Figura 51. Logo, os resultados numéricos obtidos não puderam ser comparados com os experimentais, entretanto, mostram o comportamento de forma qualitativa do dispositivo.



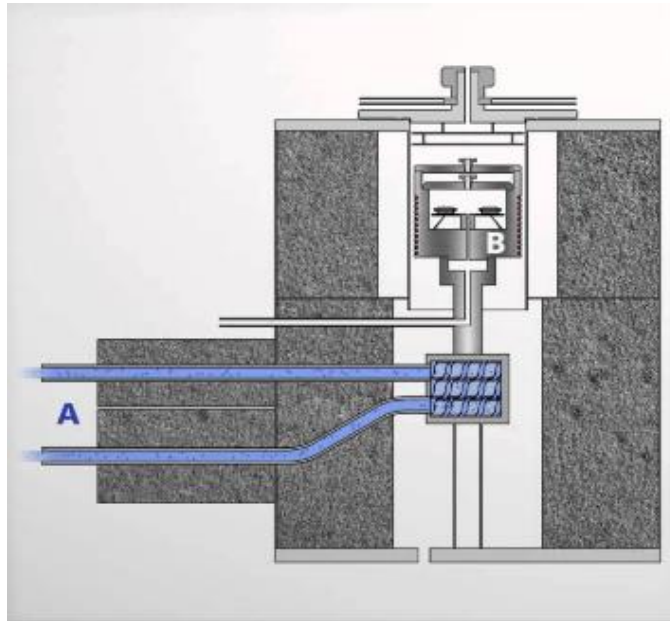
**FIGURA 51:** CURVA DE EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

### 6.3 Caracterização térmica (DSC)

As ligas com memória de forma Nitinol (NiTi) apresentam variações entre si, dependendo do teor de Níquel e Titânio encontrados em cada uma. Para conhecer melhor a liga usada nesse projeto, foram realizados ensaios para caracterização térmica e mecânica do material, a fim de conhecer propriedades como temperatura de início e final de transformação em martensita ( $M_s$ ,  $M_f$ ) e austenita ( $A_s$ ,  $A_f$ ).

O experimento consistiu na caracterização térmica de um fio de SMA, realizado no Laboratório Mecanon da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O equipamento utilizado foi o DSC (Digital Scanning Calorimeter) – NETZCH 200 F3 Maia que permite a identificação das temperaturas de mudança de fase do material. Além desse, foi utilizado nitrogênio líquido para o resfriamento do SMA e uma balança digital para medir a massa do material ensaiado.

Para o início do experimento, uma pequena amostra do fio de SMA de 9,80 mg que se encontra em seu estado martensítico a temperatura ambiente foi colocada em um cadinho, 39,4 mg, e inserida no DSC. A partir de então começa a se aplicar ciclos de aquecimento e resfriamento no material, que variam entre  $-20^\circ\text{C}$  e  $140^\circ\text{C}$  a uma taxa de  $10,0\text{ K/min}$ , gerando transformações de fase. Para se obter um resfriamento mais eficiente foi utilizado nitrogênio líquido, acelerando o processo através de uma convecção forçada. Uma ilustração esquemática é mostrada na Figura 52.

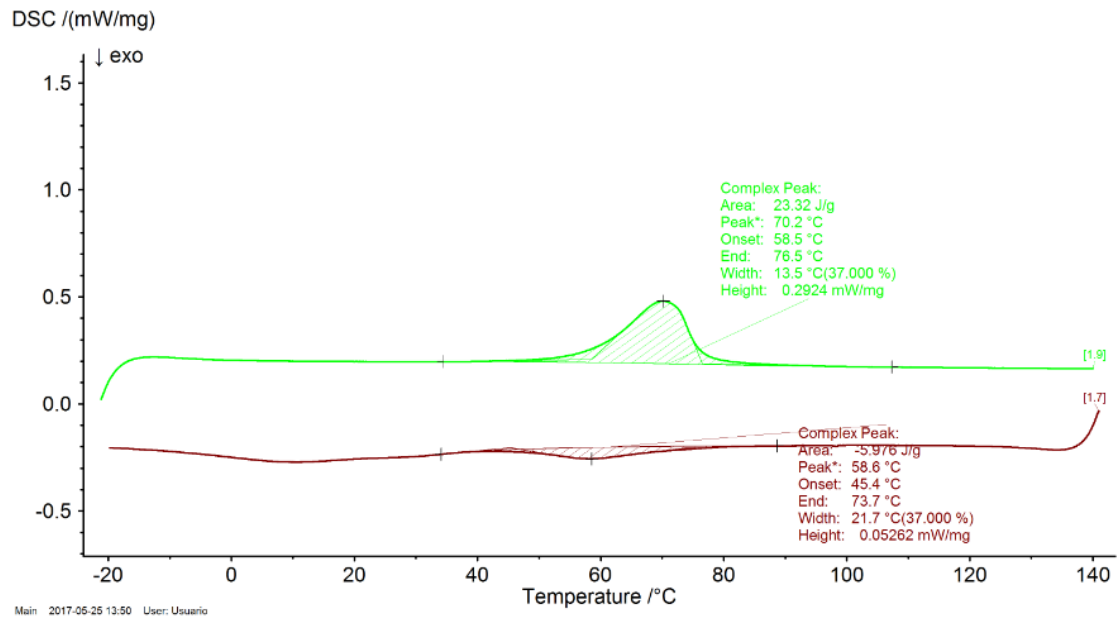


**FIGURA 52:** FIGURA ESQUEMÁTICA DO FUNCIONAMENTO DO DSC

Com o auxílio de um software de computador, são inseridos na máquina valores máximos e mínimos de temperatura, gerando curvas de aquecimento e resfriamento que o material será submetido. É importante ressaltar que a temperatura máxima do ensaio deve ser superior ao valor de transformação final de austenita ( $A_f$ ) do material; assim como o valor mínimo ensaiado, deve ser abaixo da transformação final da martensita ( $M_f$ ).

Um fluxo de calor é fornecido ao corpo de prova para variar sua temperatura entre os valores estipulados anteriormente, o equipamento DSC analisa essa quantidade de fluxo de calor cedido ao material e, a partir dele, gera seus resultados. Entretanto, ao sofrer transformações de fase, o material ensaiado pode absorver mais energia (reação endotérmica) ou liberar energia (reação exotérmica), fazendo com que a quantidade de fluxo de calor necessária para variar sua temperatura se altere.

A partir dessa alteração, é possível se obter as temperaturas iniciais e finais de transformação de fase do material ( $A_s$ ,  $M_s$ ,  $A_f$ ,  $M_f$ ), como mostra a Figura 53. Nessa figura, pode-se notar uma área hachurada verde no gráfico representando o momento em que ocorre uma reação endotérmica no material, na qual ele absorve mais energia e, conseqüentemente, é necessário um fluxo maior de calor cedido ao mesmo. E, de maneira inversa, a área hachurada vermelha evidencia uma reação exotérmica no material, gerando uma liberação de energia, necessitando de um fluxo menor de calor cedido ao corpo de prova.



**FIGURA 53:** RESULTADO DO CORPO DE PROVA SMA ENSAIADO NO EQUIPAMENTO DSC

Os resultados obtidos pelo ensaio térmico podem ser observados pela Tabela 3 e auxiliam para um melhor conhecimento do comportamento do material SMA.

**TABELA 3:** RESULTADOS OBTIDOS PELA CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA A PARTIR DO DSC

Temperaturas (°C)	
$M_f$	45,4
$M_s$	73,7
$A_s$	58,5
$A_f$	76,5

## 6.4 Construção do aparato experimental

Inicialmente, foi construído um modelo simples que buscasse atender os mesmos princípios adotados na análise numérica com o intuito de se realizar uma comparação dos resultados. A partir de um tubo de nylon com 180mm, dois fios de SMAs com 245mm de comprimento e 0,5mm de diâmetro, elementos de fixação e uma base em aço galvanizado, construiu-se o modelo apresentado na Figura 54. A rotação do tubo é possível devido a uma das extremidades de cada fio estar fixada ao tubo enquanto a outra fixada à estrutura.



**FIGURA 54:** APARATO EXPERIMENTAL

Ambos os fios foram carregados mecanicamente antes de serem fixados no aparato com a utilização de uma máquina de tração Instron, conforme pode ser visto na Figura 55, onde foram alongados em torno de 6% com os esforços de tração de 70N. Esse carregamento acontece para garantir que a estrutura dos fios seja martensita não-maclada.





**FIGURA 55:** UTILIZAÇÃO DA MÁQUINA DE TRAÇÃO INSTRON

Esse mecanismo tem relação com a válvula idealizada quando relaciona o mesmo sistema de rotação do tubo de nylon com o da camisa da válvula. A partir deste modelo mais simples foi possível definir as variáveis que poderiam interferir no sistema ideal e verificar o comportamento dele submetido a diversas correntes.

O aquecimento dos fios é feito a partir de uma fonte de alimentação de corrente elétrica externa onde seus contatos são fixados em dois parafusos, um preso ao suporte, outro ao tubo de nylon, realizando assim o carregamento térmico.

Foi montada no fio inferior uma célula de carga para realizar as medições das forças envolvidas, conforme pode ser visto na Figura 56.



**FIGURA 56:** APARATO EXPERIMENTAL COM A CÉLULA DE CARGA

O aquecimento dos fios foi realizado em baterias de ensaios na faixa de corrente elétrica de 0,5 a 2,5 A, com variações de 0,5 A.

Foi utilizado também um transferidor para que as medições relativas às rotações fossem realizadas durante os ensaios.

Foram realizados 4 ciclos para cada bateria, com o intuito de se impor um treinamento dos fios para cada comportamento, retirando-se assim um valor médio para cada bateria. Além da exigência da estabilização dos comportamentos de força e rotação para cada etapa, que ocorreram, em média, aos seis minutos nos casos de menor corrente e assim foram estipulados para os casos de maior corrente, onde a estabilização foi mais difícil e demorada para ocorrer.

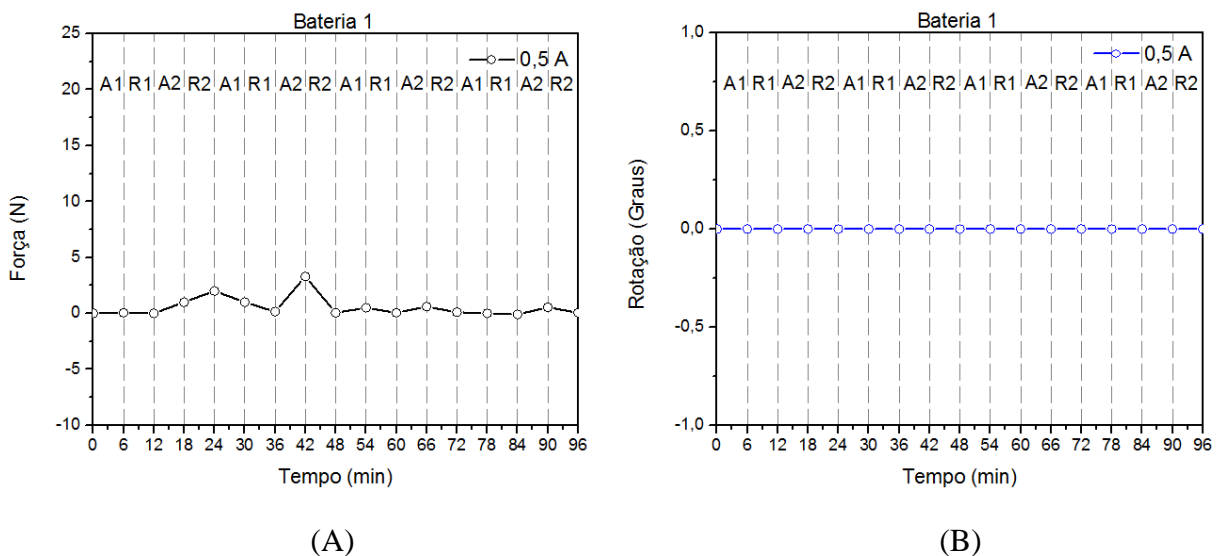
## 6.5 Resultados Experimentais

Foram executadas algumas baterias de teste com o intuito de avaliar o impacto do aumento da corrente no funcionamento do aparato. A célula de carga foi posicionada no fio inferior e a partir dos valores obtidos foram gerados alguns gráficos que relacionam a corrente com a força e a rotação e, embora a célula de carga apresente os valores de força do fio 2 (a partir das forças de reação), o sistema sofre com atrito do fio com o material de Nylon afetando os valores obtidos.

Dessa forma, foi possível analisar e, posteriormente, comparar os resultados de desempenho obtidos por cada bateria. A comparação foi feita entre a Bateria 1 (0,5 A), Bateria 2 (1,0 A), Bateria 3 (1,5 A), Bateria 4 (2,0 A), Bateria 5 (2,5 A), caso 3 (idêntico ao modelo numérico 3 proposto, com 2,5 A) e o caso 4 (idêntico ao caso numérico 4 proposto, com 2,5 A).

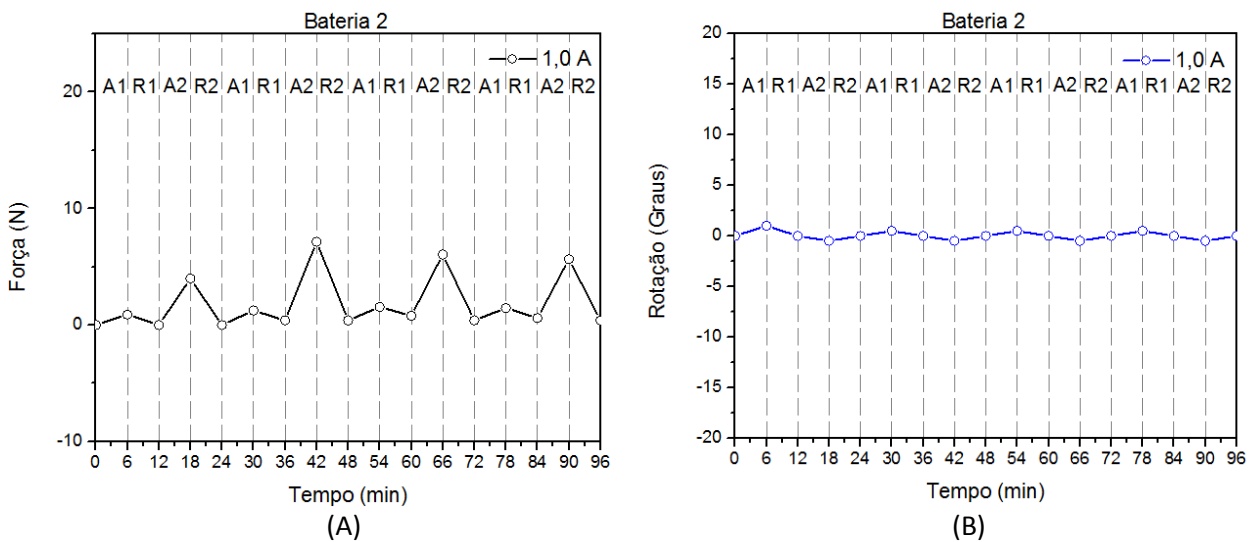
### 6.5.1 Baterias experimentais similares ao caso 1 numérico

Foram realizados ensaios experimentais com carregamentos térmicos similares aos encontrados no modelo numérico do caso 1. Os ciclos de carregamentos térmicos são similares aos mostrados na Figura 32. Primeiramente, procede-se o aquecimento e o resfriamento de um fio para em seguida aquecer e resfriar o próximo. A Figura 57 (A) apresenta os valores de força média em função do tempo durante os ciclos de aquecimento e resfriamento, atingindo valores muito baixos para o fio 1, porém valor máximo de aproximadamente 5 N para o fio 2. Já a Figura 57 (B) mostra o deslocamento angular em função do tempo, o sistema não apresentou variação, ou seja, para esses valores de corrente ainda não é possível notar qualquer variação na rotação.



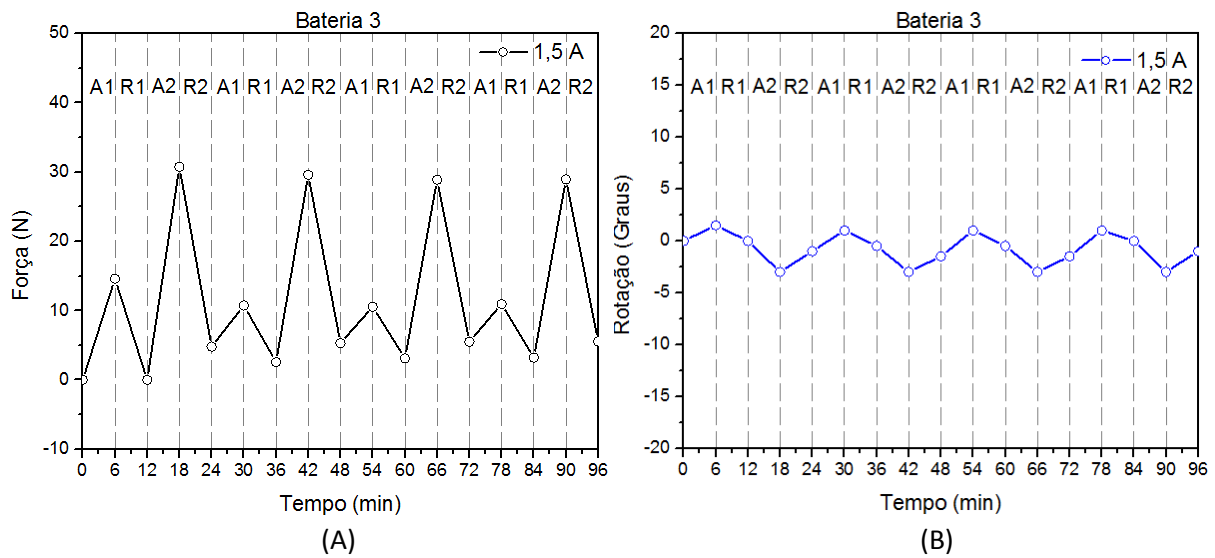
**FIGURA 57:** GRÁFICOS QUE RELACIONAM A FORÇA (A) E A ROTAÇÃO (B) COM A CORRENTE DE 0,5 A

No caso da bateria 2, Figura 58, quando analisamos os mesmos gráficos para a corrente de 1 A, temos o primeiro aquecimento acima de 2 N e os aquecimentos seguintes em torno do valor de 7,5 N, gerando resultados em relação à força bem superior ao de 0,5 A quando tratamos somente do fio 1. Sobre o aquecimento no fio 2, embora seja visível que o sistema sofre uma variação, esses esforços não são significativos comparados ao primeiro fio, conforme apresentado na Figura 58 (A). Agora tratando da rotação, o sistema começa a mostrar sinais de influência da corrente, embora os valores sejam muito próximos de zero, conforme Figura 58 (B).



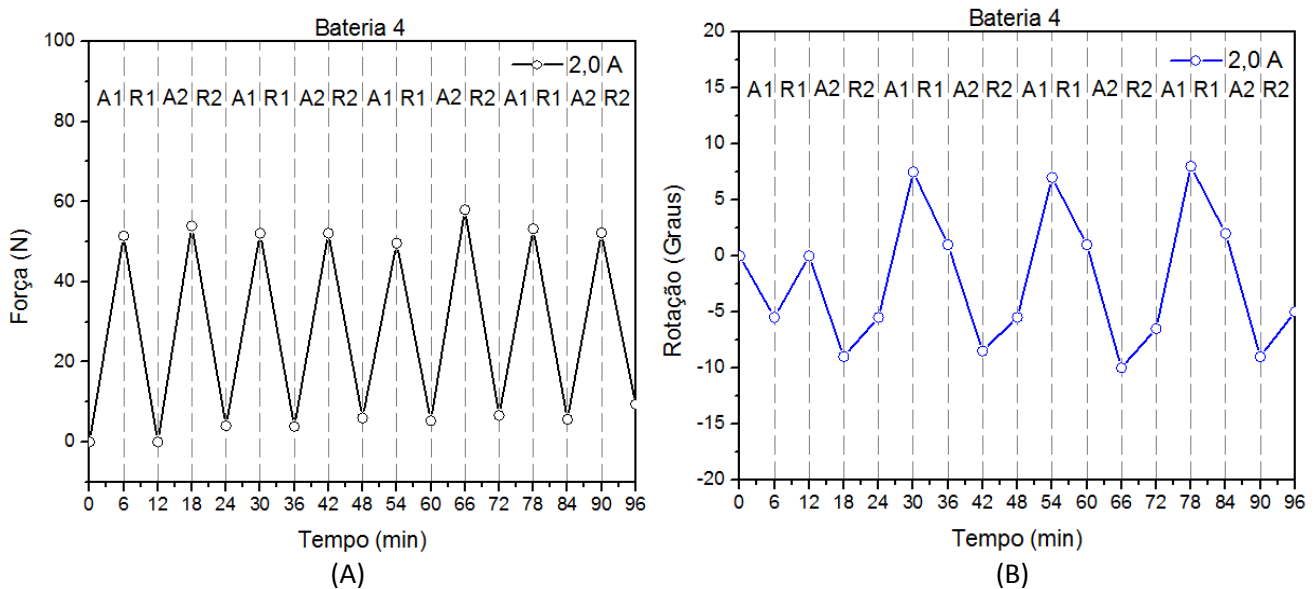
**FIGURA 58:** COMPORTAMENTO DA FORÇA (A) E DA ROTAÇÃO (B) AO LONGO DO ENSAIO, PARA A CORRENTE DE 1,0 A

Na Figura 59 (A) e (B), são apresentados os resultados da bateria 3, onde temos dois gráficos que especificam a força e a rotação para a corrente de 1,5 A, respectivamente. Quando analisamos o gráfico de força, Figura 59 (A), temos valores máximos de 30 N. Na Figura 59 (B), nota-se uma rotação de aproximadamente 5 graus durante os ciclos de aquecimento e resfriamento.



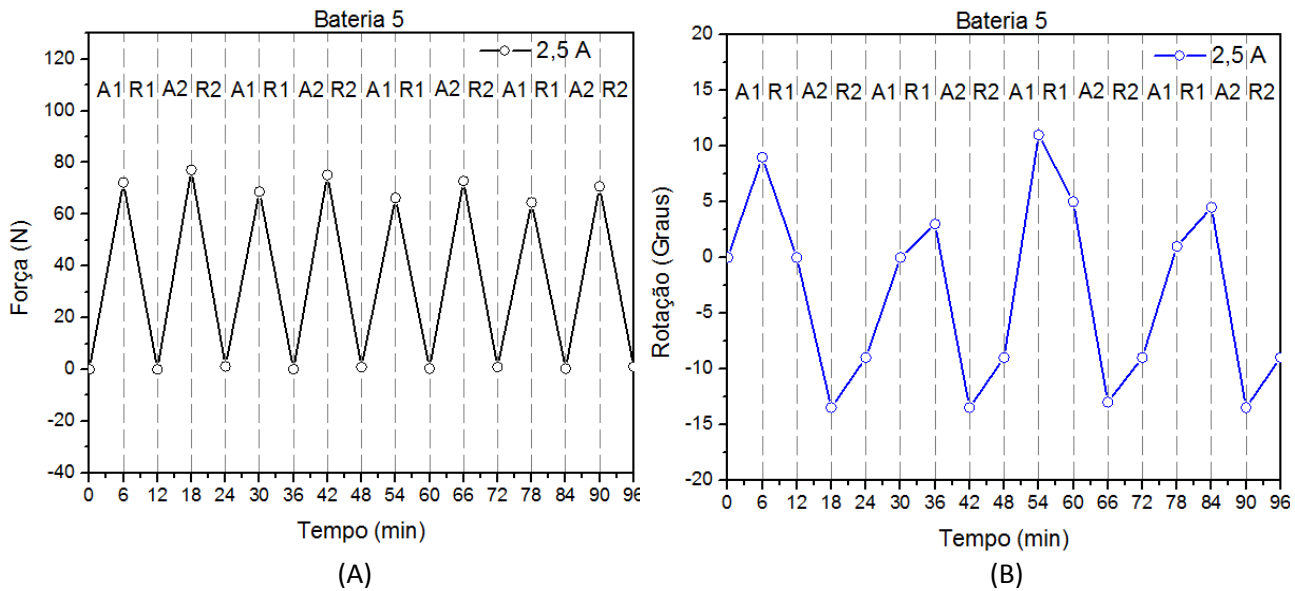
**FIGURA 59:** COMPORTAMENTO DA FORÇA (A) E DA ROTAÇÃO (B) AO LONGO DO ENSAIO, PARA A CORRENTE DE 1,5 A

Ao se impor uma corrente de 2,0 A durante a bateria 4 obtém-se os resultados apresentados na Figura 60 (A) e (B). Diferentemente dos gráficos de tensão até agora, os valores de tensão começam a se aproximar e já apresentam valores na ordem de 60 N. Ao se analisar a rotação, nota-se que os valores que se aproximam de 20 graus de variação.



**FIGURA 60:** COMPORTAMENTO DA FORÇA (A) E DA ROTAÇÃO (B) AO LONGO DO ENSAIO, PARA A CORRENTE DE 2,0 A

Para a corrente máxima de 2,5 A, relativo à bateria 5, obtém-se os valores representados pela Figura 61(A) e (B). Quando se analisa a Figura 61 (A) pode-se observar que, para ambos os fios, os valores de força são aproximadamente iguais e próximos a 80 N. Já para o caso da rotação, nota-se que o tubo atinge variações de rotação máxima em valores que se aproximam dos 25 graus.

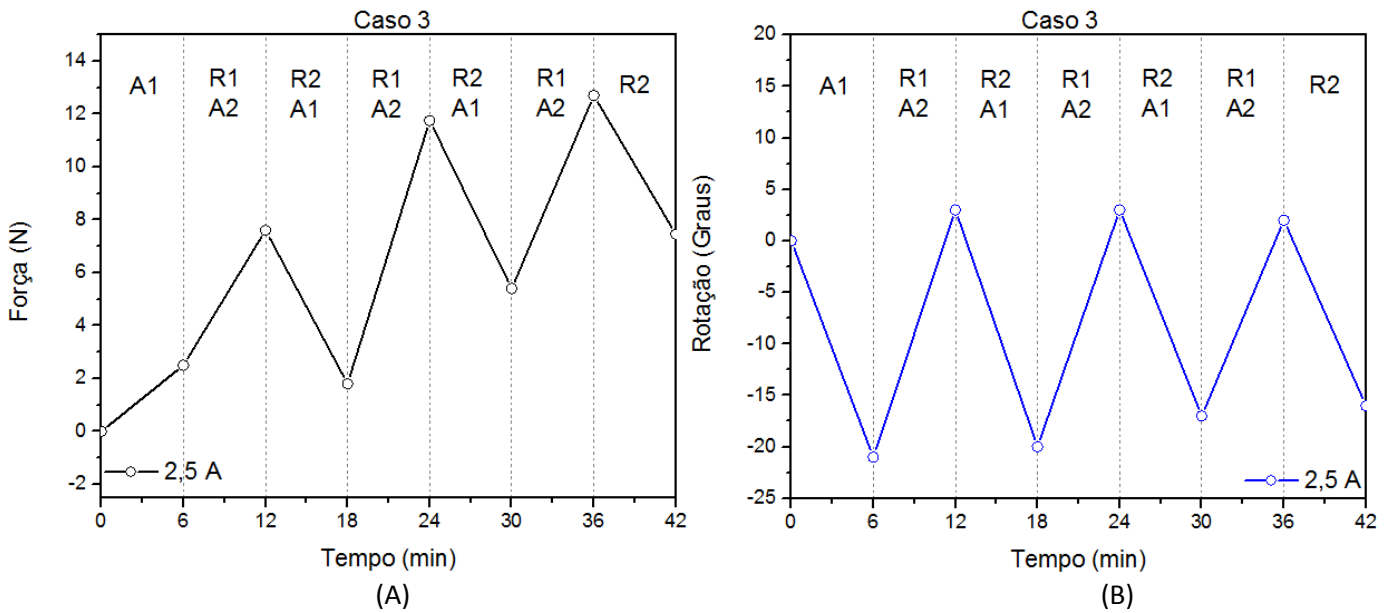


**FIGURA 61:** COMPORTAMENTO DA FORÇA (A) E DA ROTAÇÃO (B) AO LONGO DO ENSAIO, PARA A CORRENTE DE 2,5 A

### 6.5.2 Bateria experimental similar ao caso 3 numérico

O modelo proposto tem o objetivo de se aproximar ao caso numérico onde existe o aquecimento e resfriamento de maneira intercalada entre os fios de SMA, ou seja, enquanto um fio sofre aquecimento, o outro será resfriado, e vice-versa (ver figura 40 para maiores detalhes). Nesse caso, os gráficos “Força x Tempo” e “Rotação x Tempo” visam evidenciar os resultados das análises. Entretanto, como foi observado que para correntes pequenas a resposta do fio é cada vez menor, analisamos neste modelo somente para a corrente de 2,5 A (a corrente máxima utilizada no caso anterior).

Na Figura 62, tem-se gráficos que especificam a força (A) e a rotação (B) para a corrente de 2,5 A realizadas a partir do estudo de caso 3. Quando se analisa a Figura 62 (A), têm-se valores de força aumentando e chegando a 13 N, à medida que os ciclos vão ocorrendo. Esse fenômeno pode ser explicado pela força de resistência do fio que não resfriou completamente enquanto o outro começa a aquecer. Agora quando se trata de rotação, a Figura 62 (B) apresenta ciclos muito bem definidos com variação de rotação em torno de 25 graus.

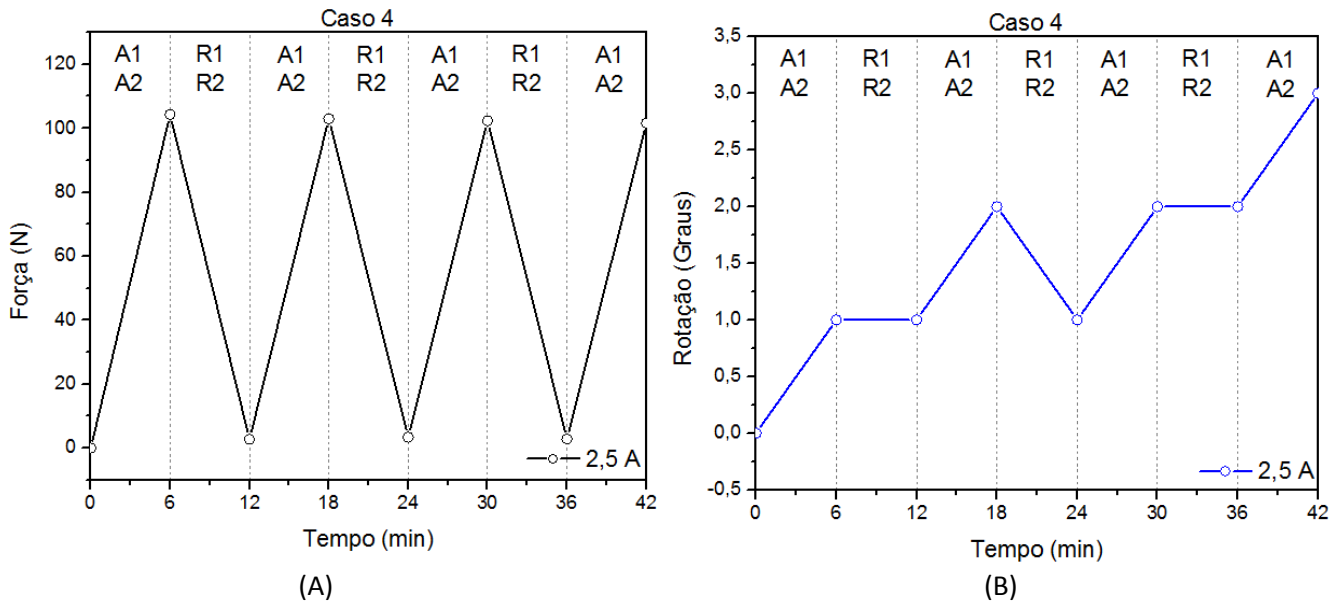


**FIGURA 62:** RELAÇÃO DA FORÇA (A) E DA ROTAÇÃO (B) COM A CORRENTE PARA O CASO 3

### 6.5.3 Bateria experimental similar ao caso 4 numérico

O caso 4, também levando em consideração seu estudo numérico, tem por objetivo avaliar o impacto do aquecimento e esfriamento ao mesmo tempo em ambos os fios (ver figura 44 para maiores detalhes). Ou seja, foram aplicados ciclos de aquecimento-resfriamento de maneira sobreposta, enquanto um dos fios sofre aquecimento/resfriamento, o outro também sofrerá o mesmo efeito, ao mesmo tempo, como mostra a Figura 63.

Conforme o primeiro gráfico, Figura 63 (A), a força apresenta resultados bem cíclicos chegando a valores em torno de 100 N. Já quanto à variação de rotação, Figura 63 (B), não há valores significativos, ou seja, em um caso de válvula real, este ciclo não apresentaria variação de rotação.



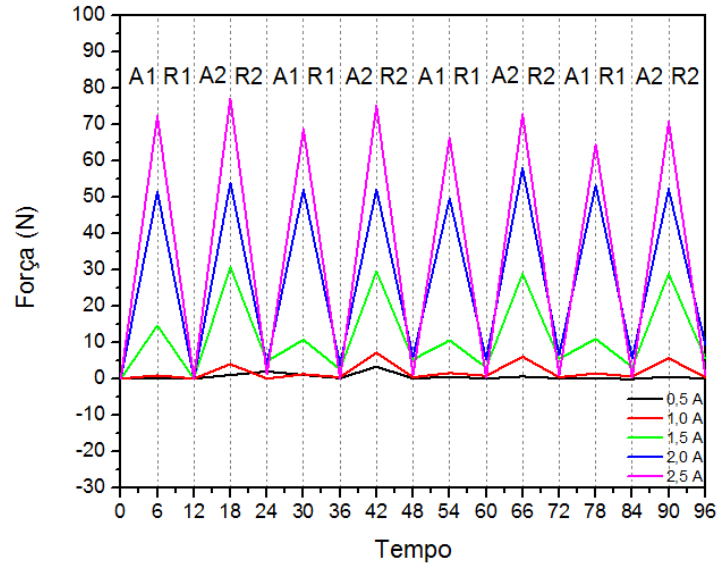
**FIGURA 63: RELAÇÃO DA FORÇA E DA ROTAÇÃO COM A CORRENTE PARA O CASO 4**

#### 6.5.4 Comparativos entre baterias experimentais

##### 6.5.4.1 Comparativos das forças nas baterias do caso 1

A Figura 64 mostra um gráfico comparativo entre as forças medidas nos fios 1 e 2, para cada valor de corrente elétrica utilizada durante o ensaio experimental. A partir desta análise pode-se notar que, quanto maior a corrente que passa pelos fios SMA, maiores serão as forças máximas atuantes em cada uma dessas baterias. Além disso, também é possível notar que a variação da força atuante entre dois pontos consecutivos também é maior, quanto maior for a corrente elétrica usada.

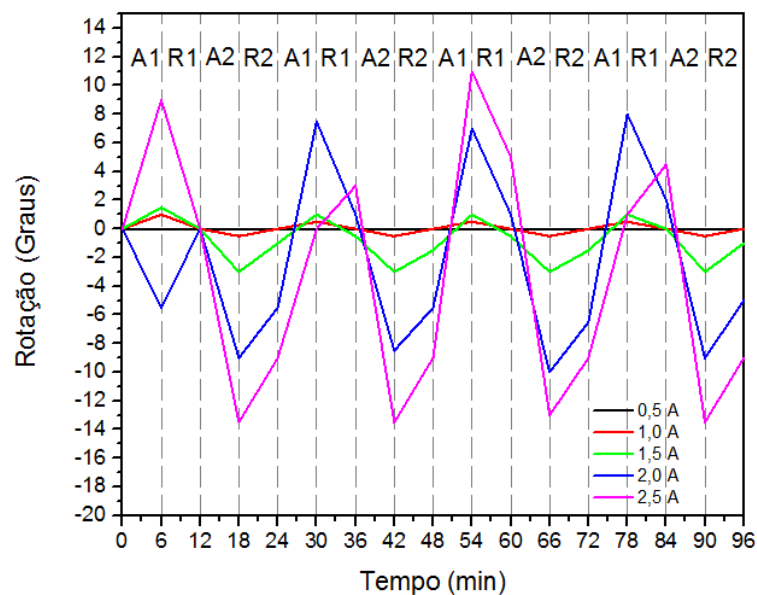




**FIGURA 64:** COMPORTAMENTO DAS FORÇAS ATUANTES NO FIO ESQUERDO (FIO 1) PARA CADA CORRENTE ELÉTRICA

#### 6.5.4.2 Comparativos das rotações nas baterias do caso 1

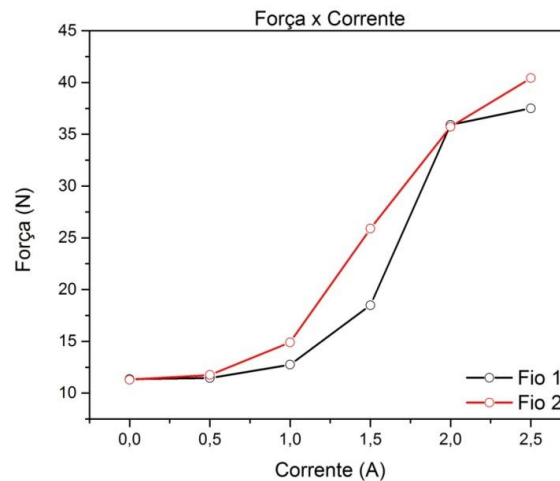
Na Figura 65 pode-se notar a variação angular registrada para cada corrente elétrica usada. Através dessa comparação, nota-se que essa variação do sistema entre 1,0 A e 1,5 A é relativamente baixa, quando comparada às demais correntes. Já a curva relativa a 2,5 A é a que apresenta a maior variação em sua rotação, sendo assim, a que apresenta a melhor eficiência para esse sistema proposto.



**FIGURA 65:** RELAÇÃO DAS ROTAÇÕES REGISTRADAS AO LONGO DO EXPERIMENTO PARA CADA BATERIA

### 6.5.4.3 Comparativo da força média entre as baterias do caso 1

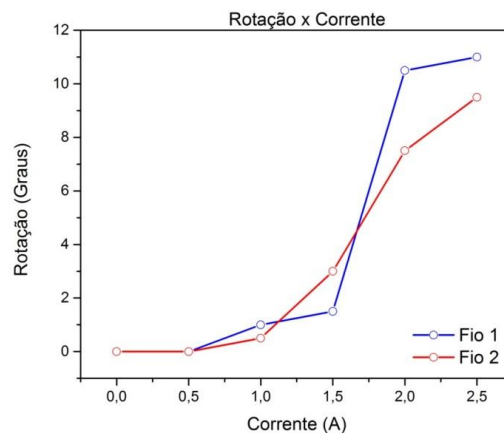
Para efeitos comparativos, foram expostos os valores de força média para cada bateria (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 A), Figura 66. É demonstrado um crescimento significativo da força atuante conforme se aumenta a corrente elétrica que passa pelo fio SMA.



**FIGURA 66:** VALORES MÉDIOS DE FORÇA OBTIDOS PARA CADA CORRENTE ELÉTRICA

### 6.5.4.4 Comparativo da variação máxima de rotação entre baterias do caso 1

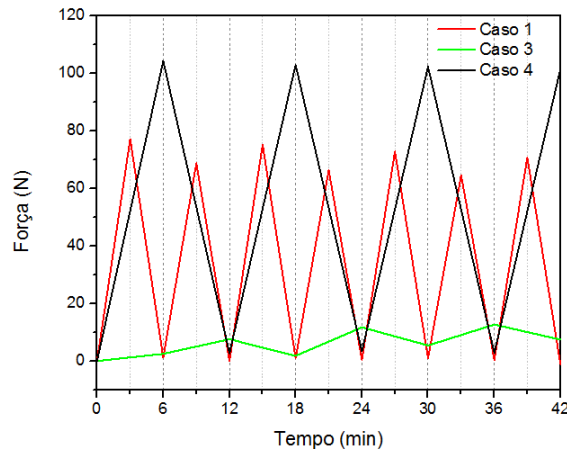
O gráfico da Figura 67 apresenta as variações máximas das rotações obtidas para cada bateria (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 A) para os fios 1 e 2. Assim, é possível notar que, quanto maior é a corrente elétrica que passa pelo fio SMA, maior também é a variação máxima de rotação obtida pelo sistema.



**FIGURA 67:** VALORES MÁXIMOS DE ROTAÇÃO REGISTRADOS PARA CADA CORRENTE ELÉTRICA APLICADA AO LONGO DO ENSAIO

#### 6.5.4.5 Comparativo de forças entre casos 1, 3 e 4

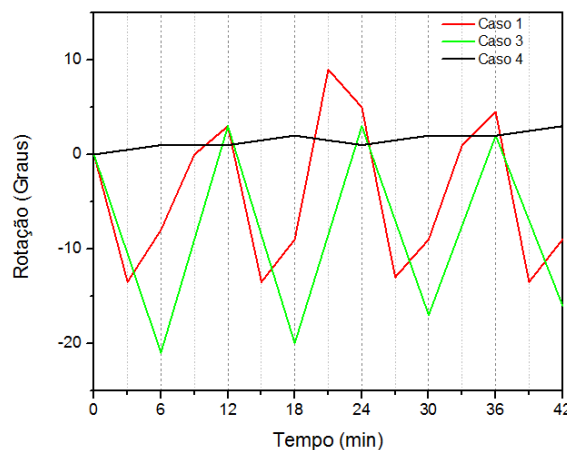
A Figura 68 apresenta uma comparação entre as forças obtidas nos casos testados no aparato experimental. Nela pode-se notar que o caso 4 possui a maior variação nos valores da força entre dois pontos consecutivos. Além disso, o gráfico ainda mostra que o caso 3 apresentou uma menor variação entre seus valores, se apresentando de maneira, relativamente, constante.



**FIGURA 68:** COMPARATIVO DAS FORÇAS ATUANTES AO LONGO DO ENSAIO PARA CADA CASO DE CICLO TÉRMICO

#### 6.5.4.6 Comparativo de rotação entre modelos

No gráfico a seguir, Figura 69, é apresentado um gráfico comparando os valores obtidos com a variação angular do sistema quando submetido aos seus respectivos ciclos térmicos. Assim, o caso 4 possui a menor variação ao longo do ensaio experimental, se mostrando pouco eficiente para o sistema em questão. Já os casos 1 e 3 apresentaram uma variação semelhante e mais satisfatória.



**FIGURA 69:** RELAÇÃO DAS ROTAÇÕES REGISTRADAS AO LONGO DO ENSAIO PARA CADA CASO DE CICLO TÉRMICO

## Capítulo 7

### 7 Conclusões

A demanda por produtos complexos que desafiam os padrões, garantindo qualidade, confiabilidade, segurança e facilidade operacional têm crescido paralelamente à tendência do mercado de apoiar projetos de engenharia com o uso de materiais inteligentes. A possibilidade de miniaturização sem perda de qualidade tem ligação direta ao uso de ligas com memória de forma (SMAs) em dispositivos mecânicos devido à sua variação de propriedades mecânicas em função de transformações de fase induzidas por temperatura, tensão ou combinação de ambos. Tais características possibilitam o desenvolvimento de válvulas adaptativas, conferindo assim um vasto campo para inovações tecnológicas.

Com este objetivo, foi realizada uma revisão bibliográfica para identificar o potencial de aplicação das SMAs em válvulas nos diversos setores da engenharia e tendências. Neste trabalho, optou-se por válvulas de camisa deslizante, que tem seu funcionamento na transferência do movimento linear em rotacional para abertura e fechamento. Esse modelo de válvula foi escolhido por ser um modelo simplificado altamente adaptável e sem grandes variáveis de acionamento.

Foram realizadas análises numéricas e experimentais de quatro casos de análise sobre o modelo de válvula proposto. Cada um desses modelos variava a configuração de carregamentos térmicos aplicados ao material SMA. Com isso foi possível verificar a eficácia e a eficiência de cada caso, além de comprovar se os resultados obtidos estavam de acordo com o que estava previsto.

A partir dessas análises, pode-se concluir que o caso de análise 2 se mostrou pouco eficiente para a proposta de atuador. Seus resultados da análise numérica apresentaram uma deformação consideravelmente menor do que a do caso 1, que foi usado como comparativo. Entretanto, esse caso 2 poderia ser melhor aproveitado em, por exemplo, um ambiente em que apenas houvesse acesso a um dos fios SMA para variação de temperatura.

A análise numérica do Caso 3 mostrou que ele possui uma eficiência melhor que a do Caso 1, por ter um menor tempo de resposta para um atuador. A análise experimental também apresentou boas variações na rotação ao longo do ensaio.

O Caso de análise 4 se mostrou muito pouco eficaz, a partir da análise experimental. Apresentando quase nenhuma rotação ao longo do experimento, como já era esperado para essa configuração de ciclos térmicos.

A partir dessas análises, podemos determinar quais os modelos mais adequados visando a funcionalidade da válvula, entretanto para trabalhos futuros é possível desenvolver ainda mais o aparato experimental através de um sensor de descolamento angular e uma câmera de medição de temperatura. Desta maneira, além de obter mais informações sobre o comportamento dos fios, seria possível se aproximar ainda mais de um modelo real do equipamento.

## Capítulo 8

### 8 Referências Bibliográficas

ANDREASEN G. F. and HILLEMANN T. B. “An evaluation of 55 cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics”. J. Am. Dent. Assoc., v. 82, pp. 1373-1375, 1971.

AQUINO, A. S. “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, 2011.

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

AZEVEDO, A. J. M. “Análise de Fadiga em Fios com Memória de Forma Submetidos a Ciclos Termomecânicos”, Dissertação de Mestrado, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

BAÊTA-NEVES A.P., SAVI M.A. and PACHECO P.M.C.L. “On the Fremond’s Constitutive Model for Shape Memory Alloys”. Mechanics Research Communications, v. 31(6), pp. 677-688, 2004.

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

BANDEIRA E. L., SAVI M. A., MONTEIRO JR. P. C. C. and ANTOUN NETTO, T., “Finite Element Analysis of Shape Memory Alloy Adaptive Trusses with Geometrical Nonlinearities”, Archive of Applied Mechanics, vol. 76(3-4), pp.133-144, 2006.

CARROZZA, M.C; ARENA, A.; ACCOTO, D.; MENCIASSI, A.; DARIO, P. “A SMA-actuated miniature pressure regulator for a miniature robot for colonoscopy”. Sensors and Actuators A: Physical, v. 105(1), p.119–131, 2003.

CASATI, R.; PASSARETTI, F.; TUISSI, A., “Effect of electrical heating conditions on functional fatigue of thin NiTi wire for shape memory actuators”, *Procedia Engineering* 10, 2011.

CRAGG A., LUND G., RYSAVY J., CASTANEDA F., CASTANEDA -Zuniga W. and AMPLATZ K. “Nonsurgical placement of arterial endoprostheses: a new technique using nitinol wire”. *Radiology*, v. 147, pp. 261-263, 1983.

DESROCHES R. and DELEMONT M. “Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys”. *Engineering Structures*, v. 24(3), pp. 325-332, 2002.

DONG Y., BOMING, Z. and JUN L. “A changeable aerofoil actuated by shape memory alloy”. *Materials Science and Engineering A*, v. 485, pp. 243–250, 2008.

DYNALLOY, “Flexinoldatasheet”, disponível em: <<http://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>>, Acesso em: 02/07/2017.

ELWALEED, A.K; MOHAMED, N.A.; MOHD, J. M. N.; MOHD, M.M. “A new concept of a linear smart actuator”. *Sensors and Actuators A*, v. 123, pp. 244–249, 2007.

GAO, F.; DENG, H.; ZHANG, Y. “Hybrid Actuator Combining Shape Memory Alloy with DC Motor for Prosthetic Fingers”. *Sensors and Actuators A Physical*, 2014.

GILBERTSON, Eric et al. “Design of a Thermally-Actuated Gas Lift Safety Valve.” *Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2011.675–684.

HALLIBURTON, “Intelligent completions”, disponível em: <<http://www.halliburton.com/en-US/ps/well-dynamics/well-completions/intelligent-completions/default.page?node-id=hfqel9vs>>, Acesso em: 02/07/2017.

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

IYER, S. S.; HADDAD, Y. M. “Intelligent materials – An overview” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 58, 1994.

JORNAL GGN, “A pesquisa em petróleo e gás no Brasil”, disponível em: <<http://jornalggm.com.br/noticia/a-pesquisa-em-petroleo-e-gas-no-brasil>>, Acesso em: 02/07/2017.

KIM, B.; LEE, M.; LEE, Y.; KIM, Y.; LEE, G. “An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator”. *Sensors and Actuators A*, v. 125, pp. 429–437, 2006.

KOHL M., KREVEET B. and JUST E. “SMA Micro-gripper system”. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97-98, pp. 646-652, 2002.

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

LIYANAGE, Jayantha P., 2006, Asócio-technical perspective on integrated operations for high-risk and complex industrial assets: experience from North sea oil & gás Industry, paper accepted to the 1<sup>o</sup> World Congress on Engineering Asset management (WCEAM), Gold Coast, Australia.

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

MACHADO, L. G.; SAVI, M.A. e PACHECO, P.M.C.L. “Nonlinear Dynamics and Chaos in Coupled Shape Memory Oscillators”, *International Journal of Solids and Structures* 40, 2003.

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

MONTEIRO J. R., P.C.C.; SILVA, L. L.; NETTO, T. A.; SAVI, M. A. “Experimental investigation of the influence of the heating rate in an SMA actuator performance”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013.



MONTEIRO P.C.C, MONTEIRO L.L.S., SAVI M.A., NETTO T.A., PACHECO P. M. C. L. and PAIVA T. “A comparative analysis of different shape memory alloy actuator configurations”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp.1–13, 2016.

NAMAZU, T.; HASHIZUME, A.; INOUE, S. “Thermomechanical tensile characterization of Ti–Ni shape memory alloy films for design of MEMS actuator”. *Sensors and Actuators A*, v. 139, pp. 178–186, 2007.

NPTEL, “Shape memory alloy (SMA) based actuators”, disponível em: <[http://nptel.ac.in/courses/112104040/lecture34/34\\_2.htm](http://nptel.ac.in/courses/112104040/lecture34/34_2.htm)>, Acesso em: 03/04/2017.

NESPOLI, A.; BESSEGHINI, S; PITTACCIO, S.; VILLA, E.; VISCUSO, S. “The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical Devices: A review on shape memory alloy mini-actuators”. *Sensors and Actuators A*, v. 158, pp. 149–160, 2010.

OLIVEIRA, S; Um modelo constitutivo tridimensional para descrever os efeitos de memória de forma e pseudoelástico em ligas com memória de forma, Dissertação de D.Sc., COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

PAIVA A., SAVI M.A., BRAGA A.M.B. and PACHECO P.M.C.L. “A Constitutive Model for Shape Memory Alloys Considering Tensile-Compressive Asymmetry and Plasticity.” *International Journal of Solids and Structures*, v. 42(11-12), pp. 3439-3457, 2005.

PAIVA A., SAVI M.A., e PACHECO P.M.C.L. “Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma”. São Paulo: Série Arquimedes, v.2, pp. 1-30, 2003.

PAIVA, A. e SAVI, M.A. “An overview of constitutive models for shape memory alloys”. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 1, 2006.

PAIVA, T. L. “Análise numérica de diferentes configurações de atuadores com memória de forma”, Dissertação de Mestrado, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

PAIXÃO, R. B. and RENTES, R. B. “Implementação de sistema de caracterização de fadiga em ligas de memória de forma submetidas a ciclos termomecânicos”. Projeto Final, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

PICCINI, M.; TOWE, B. “A shape memory alloy microvalve with flow sensing”. *Sensors and Actuators A*, v. 128, pp. 344–349, 2006.

RODRIGUEZ, J. C.; FIGUEROA, A. R. “Intelligent Completions and Horizontal Wells Increase Production and Reduce Free-Gas and Water in Mature Fields” In: *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Lima, Peru. Proceedings... Society of Petroleum Engineers, 2010.

SAVI, M.A; PACHECO, P. M. C. L.; GARCIA, M. S.; AGUIAR; R. A. A.; SOUZA, L. F. G.; HORA, R. B. “Analysis of the geometric nonlinear effect on the mechanical behavior of pseudoelastic shape memory alloy helical springs”, *23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 2015.

SAVI M.A., PAIVA A., BAËTA-NEVES A.P. and PACHECO, P.M.C.L. “Phenomenological Modeling and Numerical Simulation of Shape Memory Alloys: A Thermo-plastic-phase Transformation Coupled Model”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 13(5), pp. 261-273, 2002.

SILVA, L. L. et al. “On the Nonlinear Behavior Of The Piezoelectric Coupling On Vibration-Based Energy Harvesters”. 2015.

SmartLab, “Pseudoelastic behavior”, disponível em <http://smart.tamu.edu/overview/smaintro/simple/pseudoelastic.html>, acesso em: 03/04/2017.

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

STRITTMATTER, J.; GUMPEL, P. “Shape memory actuator for hydraulic valve” *ACTUATOR Proc. of 9th International Conference on New Actuators*, 2004.

TERÇO, H. “Mão acionada por SMA, relatório final de iniciação”. *Relatório de Iniciação Científica, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Brasil*, 2016.

THOMAS, J. E. et al. “Fundamentos de engenharia de petróleo”. Rio de Janeiro: ed. Interciência, 2004.

WILDE K., GARDONI P. and FUJINO Y., “Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges”, *Engineering Structures*, v. 23(3), pp. 222–229, 2000.

ZHANG, J.J. and YIN, Y.H. “SMA-based bionic integration design of self-sensor actuator-structure for artificial skeletal muscle”, *Sensors and Actuators A*, v. 181, pp. 94–102, 2012.