

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

**Desenvolvimento de um Dispositivo Inteligente  
Acionado por Memória de Forma em um Protótipo de  
Leme Para Embarcações**

João Pedro Aguilera Cardoso

Orientadores:

Prof. Sergio A. Oliveira

Prof. Luciana Loureiro da S. Monteiro

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2017**

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

**Desenvolvimento de um Dispositivo Inteligente  
Accionado por Memória de Forma em um Protótipo de  
Leme Para Embarcações**

João Pedro A. Cardoso

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

Orientadores:

Prof. Sergio A. Oliveira

Prof. Luciana Loureiro da S. Monteiro

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2017**



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho sobretudo à minha família, que sempre depositou sobre mim sua mais sincera confiança, e sempre me retribuiu com sua mais terna gratidão.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Dalmo e Anna, meu irmão José, e à Karina, Paula, Mariana e Raphaela por terem me emprestado um pouquinho de sua paciência e afeto sempre que este doloroso processo se sobrepôs a mim.

Agradeço também aos meus orientadores Sergio e Luciana por me oferecerem todo o suporte e atenção para que eu fosse capaz de terminar este projeto.

## RESUMO

A utilização de ligas com memória de forma em dispositivos atuadores se popularizou ao longo das últimas décadas. Suas características únicas, como a habilidade de restituir seu formato original ao receber um impulso térmico possibilitaram a redução de custos, peso e complexidade em sistemas que antes dependiam de soluções pneumáticas ou uso de motores. Este trabalho estuda, portanto, a possibilidade da substituição do sistema convencional de controle de direção na navegação de embarcações a partir da proposição de um leme acionado por fios ou molas compostas por uma liga com memória de forma.

**Palavras-chave:** Ligas com memória de forma, Atuadores, Leme, Materiais inteligentes.

## ABSTRACT

The use of shape memory alloys in actuating devices became popular over the last decades. Its unique features, such as the ability to restore its original shape by receiving a thermal boost, have made it possible to reduce costs, weight and complexity in systems that previously relied on pneumatic solutions or engine use. This work therefore studies the possibility of replacing the conventional steering control system in the navigation of boats from the proposition of a rudder driven by wires or springs composed by an alloy with shape memory.

**Keywords:** Shape Memory Alloys, Actuators, Rudder, Smart materials.

# Sumário

<b>RESUMO</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 Introdução</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2 Organização do Trabalho</b> .....	<b>14</b>
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>15</b>
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1 Fundamentação Teórica</b> .....	<b>27</b>
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>34</b>
<b>4.1 Projeto do Leme Inteligente</b> .....	<b>34</b>
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>37</b>
<b>5.1 O Protótipo do Leme Inteligente</b> .....	<b>37</b>
<b>5.2 Testes Mecânicos E Ensaio Térmico</b> .....	<b>44</b>
<b>5.3 Apresentação dos Componentes e Resultados das Caracterizações</b> .....	<b>46</b>
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>54</b>
<b>6.1 Metodologia dos testes de desempenho</b> .....	<b>54</b>
<b>6.2 Roteiro dos testes</b> .....	<b>55</b>
<b>Capítulo 7</b> .....	<b>56</b>
<b>7.1 Resultados Obtidos</b> .....	<b>56</b>
<b>Capítulo 8</b> .....	<b>67</b>
<b>8.1 Trabalhos futuros</b> .....	<b>67</b>
<b>Capítulo 9</b> .....	<b>68</b>
<b>9.1 Conclusão</b> .....	<b>68</b>
<b>Capítulo 10</b> .....	<b>69</b>
<b>10.1 Referências Bibliográficas</b> .....	<b>69</b>

## Lista de figuras

<i>Figura 1-1: Princípio de funcionamento de um leme de navegação</i> .....	12
<i>Figura 1-2: Leme controlado por sistema de polias</i> .....	13
<i>Figura 2-1: Diagrama de densidade de energia de atuação</i> .....	16
<i>Figura 2-2 Frequência de Atuação</i> .....	16
<i>Figura 2-3: Atuador SMA típico</i> .....	18
<i>Figura 2-4: Representação esquemática da densidade de potência como função do peso para as tecnologias de atuação mais comuns</i> .....	19
<i>Figura 2-5: Sequência de funcionamento de um Retrieval Basket de Nitinol</i> .....	20
<i>Figura 2-6: Esquema de funcionamento de um dos módulos de uma tela táctil ilustrando o comportamento do atuador nas suas duas posições de trabalho</i> .....	21
<i>Figura 2-7: Arqueamento ajustável com liga memória de forma (Shape memory alloy adjustable chamber ou SMAAC). Conceito de atuador interno no controle de superfície.</i> .....	22
<i>Figura 2-8: Modelo e descrição de movimento do atuador proposto</i> .....	23
<i>Figura 2-9: Protótipo de espelho retrovisor lateral movido por atuadores SMA</i> .....	24
<i>Figura 2-10: Protótipo de espelho retrovisor lateral movido por atuadores SMA</i> .....	24
<i>Figura 2-11: Posição dos fios na matriz do atuador</i> .....	25
<i>Figura 2-12: (a) movimento curvo (b) movimento de torção e (c) movimento curvo e em torção</i> .....	26
<i>Figura 2-13: Posição dos três marcadores visuais ao serem captados por uma das câmeras</i> ..	26
<i>Figura 3-1: Transformação de fase por indução de temperatura de uma liga SMA onde <math>M_s</math> é a temperatura inicial de formação da martensita, <math>M_f</math> é a temperatura final de formação da martensita <math>A_s</math> é a temperatura inicial de formação da austenita e <math>A_f</math> é a temperatura final de formação da austenita</i> .....	28
<i>Figura 3-2a: Esquematização ilustrativo do efeito de memória de forma em uma liga SMA</i> .....	28
<i>Figura 3-2b: Esquematização ilustrativo do efeito de memória de forma em uma liga SMA</i> .....	29
<i>Figura 3-2c- Efeito de memória de forma, One-Way</i> .....	30
<i>Figura 3-3a: Efeito memória de forma com tensão assistida</i> .....	31
<i>Figura 3-3b – Efeito memória de forma Two-Way</i> .....	32
<i>Figura 3-4a: Fenômeno da pseudoelasticidade</i> .....	32
<i>Figura 3-4b- Fenômeno da pseudoelasticidade</i> .....	33
<i>Figura 4-1: Projeto do Leme Inteligente na posição neutra</i> .....	34
<i>Figura 4-2: Leme na direção boreste. A temperatura na mola SMA 1 é maior que <math>A_f</math></i> .....	35

<i>Figura 4-3: Leme na direção bombordo. A temperatura na mola SMA 2 é maior que <math>A_f</math></i>	36
<i>Figura 5-1: Protótipo do leme inteligente usando fios SMA</i>	37
<i>Figura 5-2: Posição neutra do leme</i>	38
<i>Figura 5-3: Representação geométrica da relação entre o comprimento do fio e o ângulo do leme</i>	39
<i>Figura 5-4: Decomposição do comprimento do fio</i>	39
<i>Figura 5-5: Baixo ângulo de atuação do primeiro protótipo</i>	40
<i>Figura 5-6: Segundo protótipo com molas SMA em sua atuação</i>	41
<i>Figura 5-7: Segundo protótipo com mola SMA ativada.</i>	42
<i>figura 5-8: Máquina Instron® para ensaios de tração</i>	45
<i>Figura 5-9: Calorímetro diferencial de varredura DSC 200 F3 Maia</i>	45
<i>Figura 5-10: Ensaio de tração para o fio SMA de 0,5mm</i>	47
<i>Figura 5-11: Análise Térmica Diferencial do fio SMA de 0,5mm</i>	48
<i>Figura 5-12: Exemplos das molas SMA escolhidas</i>	49
<i>Figura 5-13: Resultado do teste de tração da mola SMA, onde a mesma apresenta um alongamento ligeiramente mais que 10 mm ao receber uma carga de 6N</i>	49
<i>Figura 5-14: Resultado de uma das amostras verificadas</i>	50
<i>Figura 5-15: Molas de aço de <math>K \cong 28 \text{ N/m}</math></i>	51
<i>Figura 5-16: Ensaio de tração da mola de aço</i>	52
<i>Figura 5-17: Arduino Uno</i>	52
<i>Figura 5-18: Sensor acelerômetro MPU-6050</i>	53
<i>Figura 6-1: Fonte elétrica ICEL PS-700</i>	54
<i>Figura 7-1: Ciclos de dois minutos e máxima corrente de 1A</i>	57
<i>Figura 7-2: Ciclos de quatro minutos e máxima corrente de 1A</i>	58
<i>Figura 7-3: Ciclos de dois minutos e máxima corrente de 1,5A</i>	59
<i>Figura 7-4: Ciclos de quatro minutos e máxima corrente de 1,5A</i>	60
<i>Figura 7-5: Ciclos de dois minutos e máxima corrente de 2A</i>	61
<i>Figura 7-6: Ciclos de quatro minutos e máxima corrente de 2A</i>	62
<i>Figura 7-7: Ciclos de dois minutos máxima corrente de 2,5A</i>	63
<i>Figura 7-8: Ciclos de quatro minutos e máxima corrente de 2,5A</i>	64
<i>Figura 7-9: Variação do máximo ângulo alcançado com relação à corrente</i>	65

# Capítulo 1

## 1.1 Introdução

Com os avanços tecnológicos característicos da sociedade contemporânea, a busca por novas soluções está sempre presente nos diversos campos da indústria. Na mecânica, o principal motor inovador está na busca por materiais que preencham não só as características primárias de seu uso, mas que tenham também outras aplicações, tornando-se assim mais completos. Esta classe de novos materiais, comumente chamados de materiais inteligentes se destaca por possuir características adaptativas, modificando suas propriedades físicas a partir da imposição de um estímulo externo, que pode ser mecânico, elétrico, magnético ou térmico.

Dentre os materiais inteligentes, se destacam as ligas com memória de forma (do inglês *Shape Memory Alloy* - SMA). As SMAs são uma classe de materiais metálicos que demonstram a capacidade de restabelecer sua forma original mesmo após sofrerem altas deformações, desde que nelas seja aplicada um campo de temperatura, o que resulta em transformações de fase na microestrutura do material (LAGOUDAS, 2008; OLIVEIRA, 2008).

Graças a essa capacidade, as SMAs apresentam aplicabilidade em diversas áreas, desde biomédica até aeronáutica. Como dito anteriormente, as ligas com memória de forma podem sofrer grandes deformações reversíveis e também produzir grandes forças quando se restringe o seu deslocamento, fazendo com que o uso destes materiais se torne extremamente atraente para diferentes aplicações, substituindo elementos convencionais de atuação como por exemplo, o uso de bombas, válvulas ou eixos. Muitas vezes faz com que seu uso seja preferido em situações com limitação espacial ou de peso.

Baseando-se no uso de uma liga SMA este trabalho propõe apresentar um atuador que sirva como alternativa aos lemes usados para a navegação de barcos e dispositivos marinhos em geral. Seu uso é recomendado em situações onde há a limitação de espaço ou peso é indicado para dispositivos de menor porte.

O leme é um dispositivo de controle de direção em aeronaves ou embarcações. Seu funcionamento consiste no desvio do fluxo do fluido em questão, gerando um momento capaz de mudar a direção do veículo para que seja alcançada uma posição previamente pretendida, conforme mostra o diagrama esquemático na figura 1-1

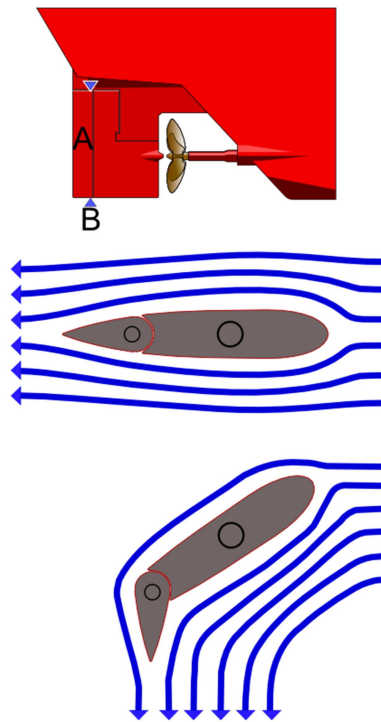


Figura 1-1: Princípio de funcionamento de um leme de navegação

Atualmente, existem diversos tipos de lemes no mercado, cada um com sua particularidade. O modelo mais simples, utilizado em pequenas embarcações, tem seu funcionamento projetado através de polias e cabos. Como apresentado na Figura 1-2, a rotação do timão é transmitida à saia do leme, possibilitando seu movimento.



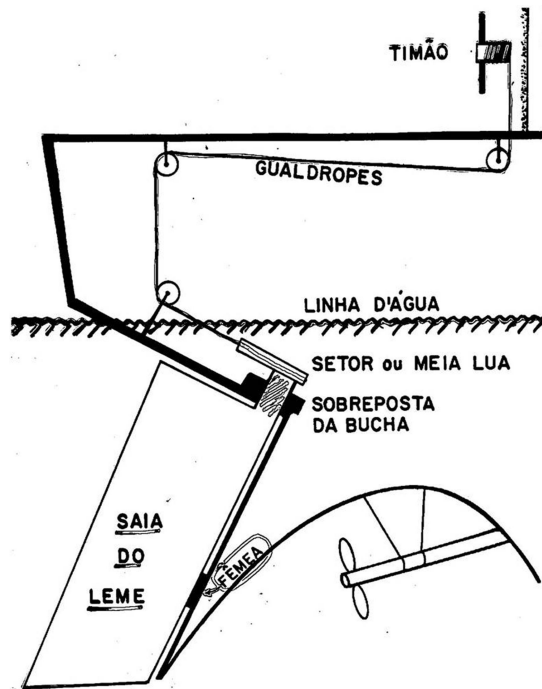


Figura 1-2: Leme controlado por sistema de polias

Mesmo em navios de grande porte, o funcionamento do leme continua seguindo o mesmo princípio, porém um sistema de transmissão hidráulica é adicionado para que a força a ser realizada no timão não ultrapasse o valor médio que um ser humano é capaz de realizar sem que haja desconforto.

Em sistemas hidráulicos e eletro-hidráulicos, a pressão é realizada por bombas hidráulicas, que podem ser acionadas através de motores elétricos, ou por meios exclusivamente mecânicos (transmissão hidráulica pura). Essas bombas realizam um papel crucial ao gerar a pressão requerida para que o leme seja rotacionado.

Esses sistemas geralmente ocupam um grande espaço físico no interior da embarcação e são responsáveis por um aumento significativo do seu peso. Além disso, por serem complexos, exigem que haja um cuidado permanente na sua utilização, fazendo com que tenham um alto custo de manutenção.

O objetivo deste projeto é propor o desenvolvimento de um atuador inteligente como alternativa aos sistemas atuais de controle do leme de um barco. Essa alternativa possibilitaria uma redução drástica no peso total do sistema, no espaço ocupado pelo mesmo, e nos custos de manutenção.

## **1.2 Organização do Trabalho**

No capítulo 2 será apresentada ao leitor uma revisão bibliográfica, onde serão explicitados estudos na área e conceitos que serão usados como referência no decorrer do trabalho.

No capítulo 3 serão apresentados os fundamentos teóricos do comportamento das SMAs.

No capítulo 4 o leitor será apresentado ao projeto do leme inteligente e a detalhes de seu funcionamento.

No capítulo 5 será apresentado ao leitor o processo de desenvolvimento dos protótipos e de escolha dos materiais e componentes.

O capítulo 6 apresenta metodologia de trabalho, explicitando os procedimentos realizados para a implementação do experimento e a rotina dos testes.

No capítulo 7 serão apresentados os resultados obtidos e reflexões acerca dos dados.

No capítulo 8 será apresentado as conclusões e sugestões para trabalhos futuros os quais serão de grande valia para o prosseguimento e o desenvolvimento do projeto do leme.

No capítulo 4 serão apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na composição deste trabalho

## Capítulo 2

### 2.1 Revisão Bibliográfica

Ao longo das últimas décadas, graças aos avanços conquistados nas áreas de ciência e tecnologia, o conhecimento acerca do comportamento de diversos materiais alcançou um novo patamar. Este fenômeno, impulsionado pelas descobertas no que tange a microestrutura desses materiais tornou possível o desenvolvimento de novas ligas, que apresentam propriedades até então pouco exploradas. Essa nova classe de materiais, os materiais inteligentes, surge para preencher uma demanda por materiais mais versáteis, que possibilitam soluções mais leves, fortes e com propriedades funcionais (térmicas, elétricas, magnéticas, etc.). Os materiais que mais se destacam nesta classe são os piezelétricos, capazes de gerar carga elétrica a partir da realização de uma força mecânica aplicada e vice versa, os eletrostrictivos, que mudam sua forma a partir da aplicação de um campo elétrico, magnetostrictivos, capazes de mudar sua forma a partir da aplicação de um campo magnético e as ligas com memória de forma (LAGOUDAS, 2008).

As Ligas com memória de forma (SMA) foram descobertas por Arne Olander em 1932, enquanto que o termo memória de forma foi descrito por Vernon em 1941 por conta de seu material dental composto de polímeros. A importância de materiais com memória de forma só foi reconhecida quando William Buehler e Frederick Wang descobriram o efeito de memória de forma na liga de níquel-titânio (NiTi) em 1962, que ficou conhecida por Nitinol (nome derivado a partir da composição da liga e o local em que foi descoberto, o *Naval Ordnance Laboratory*). Desde então a demanda por SMAs em aplicações técnicas e engenharias tem aumentado substancialmente, chegando ao mercado em diversos campos comerciais como na área automobilística, biomédica, aeroespacial e até mesmo na indústria da moda (JANI, 2014).

Como apresentam capacidades adaptativas, os materiais inteligentes são capazes de modificar suas propriedades físicas quando recebem um estímulo adequado. Sua atuação varia de acordo com o material, e sua capacidade é geralmente avaliada através da densidade de energia de ativação (trabalho disponível liberado por unidade de volume) e a frequência de atuação, como visto nas Figuras 2-1 e Fig. 2-2 (LAGOUDAS, 2008; PAIVA, 2017).

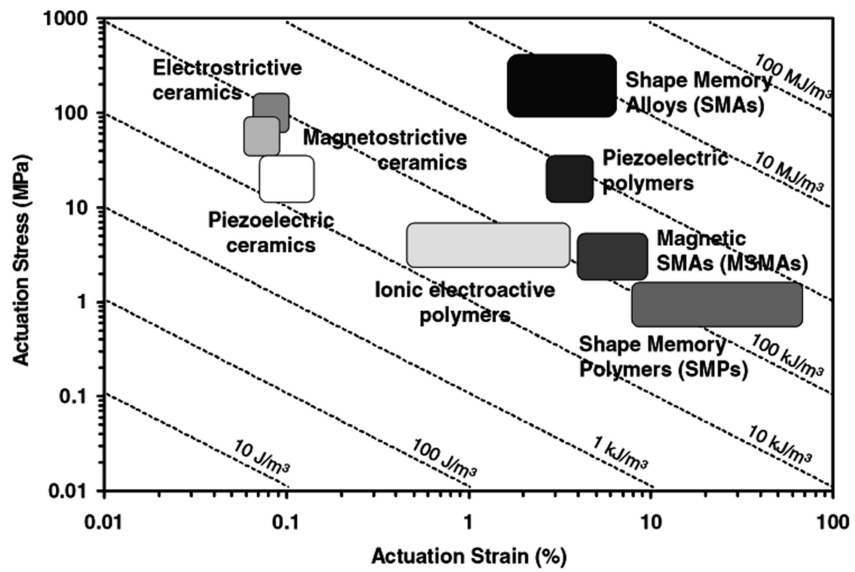


Figura 2-1: Diagrama de densidade de energia de atuação (LAGOUDAS, 2008)

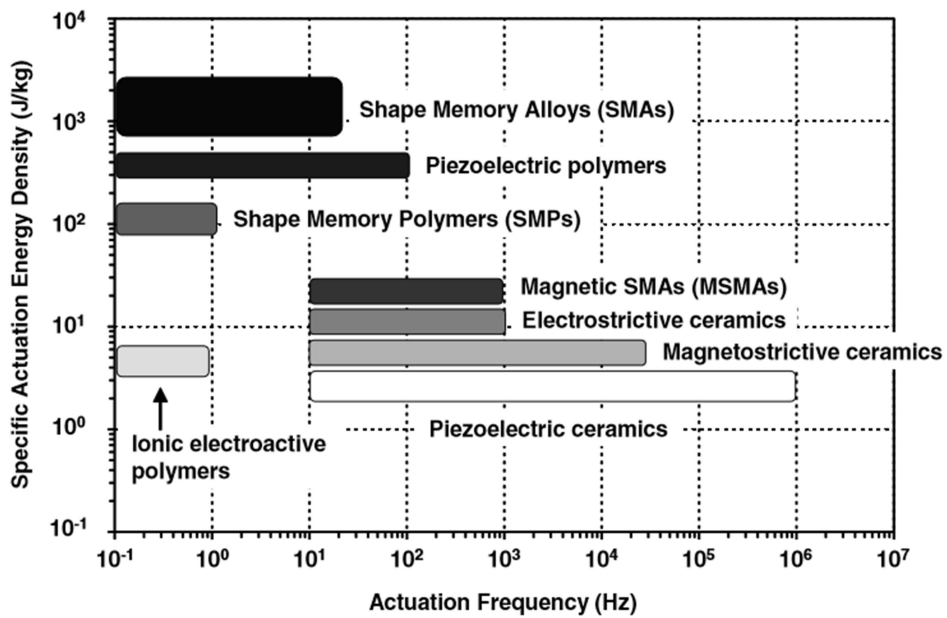


Figura 2-2 Freqüência de Atuação (LAGOUDAS, 2008)

Conforme observado nas Figuras 2-1 e 2-2, apesar de apresentar uma alta densidade de energia de atuação, as ligas de memória de forma não possuem uma frequência de atuação elevada, visto que sua atuação depende da troca de calor do atuador com o ambiente. Isso significa que em sistemas onde o tempo de atuação é determinante, será necessário um controle maior do processo de troca de calor, como por exemplo um sistema de controle de resfriamento forçado, resultando assim num abreviamento do tempo de resposta do atuador com elemento SMA (PAIVA, 2017; ROMANO, 2008).

As ligas de memória de forma (SMAs) se destacam principalmente pelo seu uso em diferentes tipos de sensores e atuadores. Por se tratar de um material inteligente, sua aplicabilidade se difunde em diversos campos, tais como nas áreas de engenharia automotiva, aeroespacial, médica, civil e de comunicação (PAIVA, 2017; CRAGG *et al.*, 1983; WILDE *et al.*, 2000; DONG *et al.*, 2008). Não só ligas metálicas apresentam o comportamento de memória de forma. Materiais como compósitos, espumas e películas finas também apresentam este fenômeno (LESTER *et al.* 2015). Porém as ligas metálicas geralmente ocupam a principal matéria prima no uso de atuadores e sensores SMA. Dentre elas é importante destacar o NiTi, as ligas à base de Fe como FeMnSiCrNi e à base de cobre como por exemplo CuAlNi e CuZnAl (SATO *et al.*, 1982; CINGOLANI *et al.*, 1999; PAIVA, 2017).

Dentre as SMAs, as ligas Nitinol (termo usado para as ligas à base de NiTi) são as que mais apresentam aplicações comerciais. Durante a década de 1970, 8 anos após sua descoberta, algumas aplicações biomédicas foram desenvolvidas. Mas foi somente a partir de 1990 que as ligas com base em NiTi se popularizaram comercialmente e seu uso se difundiu. Dentre suas características está na sua alta recuperação quando deformada, na faixa de 6%, três vezes mais que a liga CuZnAl por exemplo. (LAGOUDAS, 2008).

Por conta de seu comportamento, as SMAs se tornaram uma das melhores opções em projetos de atuadores. Alguns de seus efeitos, como a pseudoelasticidade, a SATWME (Stress Assisted Two Way Memory Effect) e o SME (Shape Memory Effect) são o que garantem a sua aplicabilidade. Estes atuadores geralmente são empregados em situações onde é necessária a aplicação de pequenas forças ou deslocamentos, mas também podem estar associados a sistemas que exijam grandes forças ou torques de atuação (PAIVA, 2017; NESPOLI *et al.*, 2010; JANSEN *et al.* 2004).

Existem muitas vantagens no uso de SMAs em mini-atuadores. Conforme explica NESPOLI *et al.*, (2010) as vantagens mais relevantes são a simplicidade do mecanismo, ausência de sujeira, atuação silenciosa, remotabilidade, habilidade sensorial e a baixa tensão elétrica aplicada. As SMAs também apresentam algumas desvantagens, como a possibilidade de fadiga, baixa velocidade de resposta e um comportamento não linear (IKUTA, 1990).

A Figura 2-3 apresenta um atuador com efeito SATWME. Este, por sua vez, consiste em um efeito de memória de forma reversível, porém sem estar livre de tensão. O acionamento de um dispositivo utilizando este efeito ocorre da seguinte forma: o sistema possui um elemento linear com uma mola de aço acoplada a uma mola SMA. A etapa inicial consiste em pré-carregar mecanicamente a mola de SMA na fase martensítica induzindo uma variante induzida por tensão, que após a descarga mecânica esta passa a apresentar uma deformação residual. Ao aquecer-se o conjunto até uma temperatura tal que acima de  $A_f$  (temperatura final de transformação para austenita) o material sofre uma transformação para a fase austenítica provocando uma diminuição de seu comprimento, deformando a mola de aço. Quando a mola SMA é resfriada, devido à força de restauração produzida pela mola de aço, faz com que o elemento SMA ao invés de retornar à sua fase martensítica original, induzida por temperatura, retorne à variante induzida por tensão, voltando a apresentar a deformação residual.



Figura 2-3: Atuador SMA típico (NESPOLI *et al.*, 2010)

Como visto na Figura 2-3, um típico atuador de SMA não possui muitos elementos. Dentre eles se destacam a estrutura mecânica, o elemento de SMA, um segundo elemento que pratique uma força restituidora, no caso da imagem uma mola SUS304, uma unidade de controle responsável pelo aquecimento da SMA, podendo ser realizado via corrente elétrica, e outros elementos que facilitam o acoplamento do atuador (PAIVA, 2017).

Há uma crescente demanda no mercado por projetos mecânicos que tenham uma maior eficiência. Em termos práticos, isso se traduz na demanda de produtos mais simples, leves, compactos, silenciosos e de baixo custo. Ao comparar-se com outros sistemas atuadores, as SMAs possuem um lugar de destaque ao preencher essa lacuna. A figura 2-4 abaixo caracteriza essa vantagem ao relacionar os diferentes sistemas num gráfico que compara a quantidade de potência por peso desses sistemas com seu peso total.

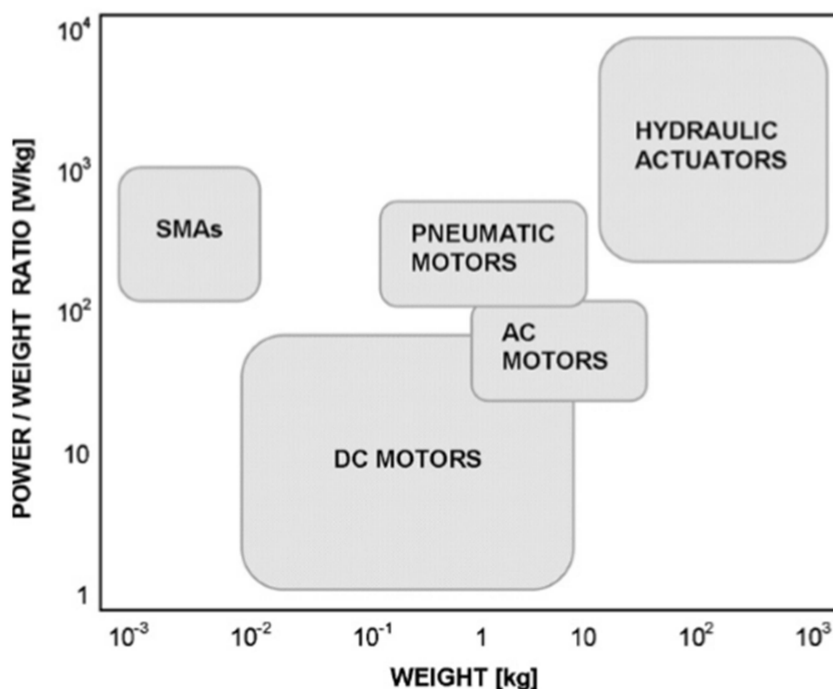


Figura 2-4: Representação esquemática da densidade de potência como função do peso para as tecnologias de atuação mais comuns (NESPOLI *et al.*, 2010).

Por conta de suas características únicas, as SMAs ganharam destaque na área médica. Impulsionadas pela busca por técnicas cirúrgicas menos invasivas, as ligas NiTi se tornaram solução na criação de pequenas garras, fios, válvulas e outros micro equipamentos. Dentre estes instrumentos está o *retrieval basket* (figura 2-5), que é usado na remoção de pedras nos rins e em ductos biliares. Ele é inserido no interior de um conduit em sua forma encolhida, e se expande ao formato aberto a partir de um aquecimento, que ocorre somente quando o dispositivo se encontra na posição correta. Produtos como esse já estão disponíveis no mercado. (AURICCHIO *et al.*, 2015)

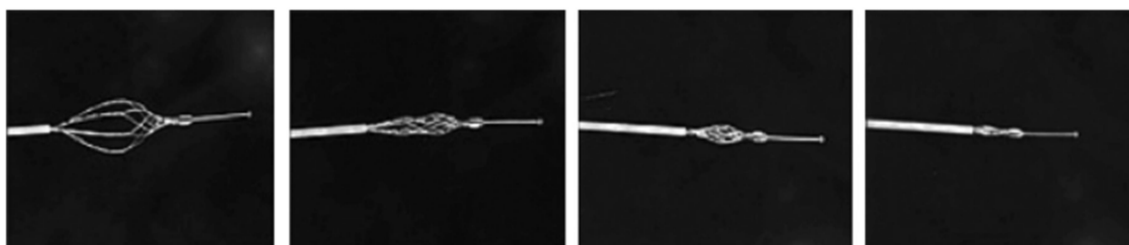


Figura 2-5: Sequência de funcionamento de um *Retrieval Basket* de Nitinol.

MATSUNAGA *et al.*, (2005) propuseram o uso de micro-atuadores SMA no desenvolvimento de telas táteis para aplicação em dispositivos de leitura em braile e em mapas 3-D interativos. A informação, seja na forma de caracteres ou gráfica, é mostrada de maneira dinâmica a partir da movimentação vertical de pequenos pinos em rede.

A figura 2-6 mostra que as molas SMAs se contraem e fazem com que os pinos se movimentem para cima ou para baixo quando determinada corrente elétrica é fornecida, via um circuito de condução. Tubos de material magnetizado são conectados em cada pino e um ímã permanente fixa a posição dos pinos nos estados ‘cima’ e ‘baixo’. Esse mecanismo de ancoragem magnética faz com que o consumo elétrico com os atuadores SMAs se reduzam vertiginosamente, já que a corrente elétrica é fornecida somente quando os pinos são movimentados para baixo e para cima. O circuito de condução realiza a atuação dos pinos de maneira simultânea a partir de uma comuta de alta velocidade no endereçamento da entrada elétrica.



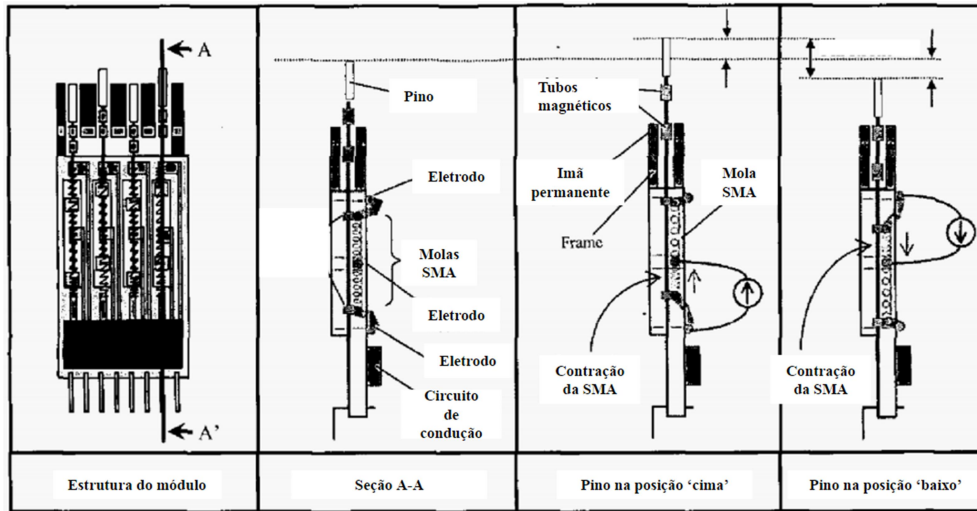


Figura 2-6: Esquema de funcionamento de um dos módulos de uma tela táctil ilustrando o comportamento do atuador nas suas duas posições de trabalho. (MATSUNAGA *et al.*, 2005)

Uma outra aplicação proposta são as asas inteligentes para aeroplanos. Por conta da interação aerodinâmica entre as asas e o ar, é comum o formato das asas de um avião se adaptar à situação em que se encontra. Ao aproveitar o fenômeno de memória de forma, esta mudança no formato aerodinâmico das asas pode ser realizado com muito mais eficiência. (HUMBEECK, 1999; BEAUCHAMPS *et al.*, 1992). BEAUCHAMPS *et al.* (1992) exemplifica uma asa desse tipo como mostrado na figura 2-7.

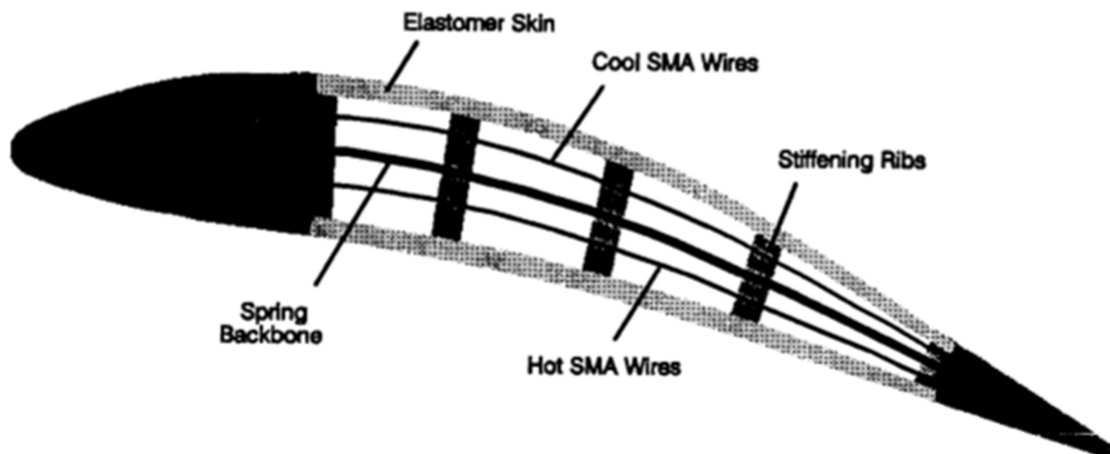


Figura 2-7: Arqueamento ajustável com liga memória de forma (*Shape memory alloy adjustable chamber* ou SMAAC). Conceito de atuador interno no controle de superfície.

Em linhas gerais o conceito de controle de superfície SMAAC oferece um arqueamento de asa ajustável a partir de uma atuação SMA, controlando o voo de veículos hidrodinâmicos ou aerodinâmicos. O conceito SMAAC emprega o uso de uma coluna flexível que é atuada por fios SMA que se contraem. E é coberta por uma pele elastomérica maleável, que produz formato ajustável da asa.

A vantagem de tal sistema é que em casos específicos, é que ele realiza uma força de elevação muito maior do que com o uso de paletas rígidas. Além disso, o SMAAC deixa um rastro muito menos turbulento ao ser comparado com asas comuns (HUMBEECK, 1999).

DROSSEL *et al.* (2015) propôs a criação de um atuador rotativo para a movimentação de abas de ventilação para aplicações automotivas. Para isso, seu estudo baseou o projeto a partir de uma abordagem matemática, usando um algoritmo de otimização, alcançando uma maior correlação entre as variáveis de projeto e suas especificações.

Seu objetivo é utilizar dois grupos de fios SMAs de maneira que sua posição previna qualquer movimentação em direções não desejadas, assim poupando o atuador da necessidade que guias, reduzindo assim seu peso total. A figura 2-8 exemplifica a realização do movimento rotatório do atuador SMA, capaz de alcançar o máximo ângulo e torque pretendido. Sua composição consiste de sua estrutura externa (1), um eixo interno (que é a parte a ser rotacionada) (2) e os dois grupos de fios SMA (3) e (4). Para facilitar a troca dos fios, hão

também terminais de parafusos para fixação dos mesmos (5). Para o controle de posicionamento o atuador está equipado com um *encoder* de efeito Hall que detectam com precisão o quanto o eixo rotaciona (6).

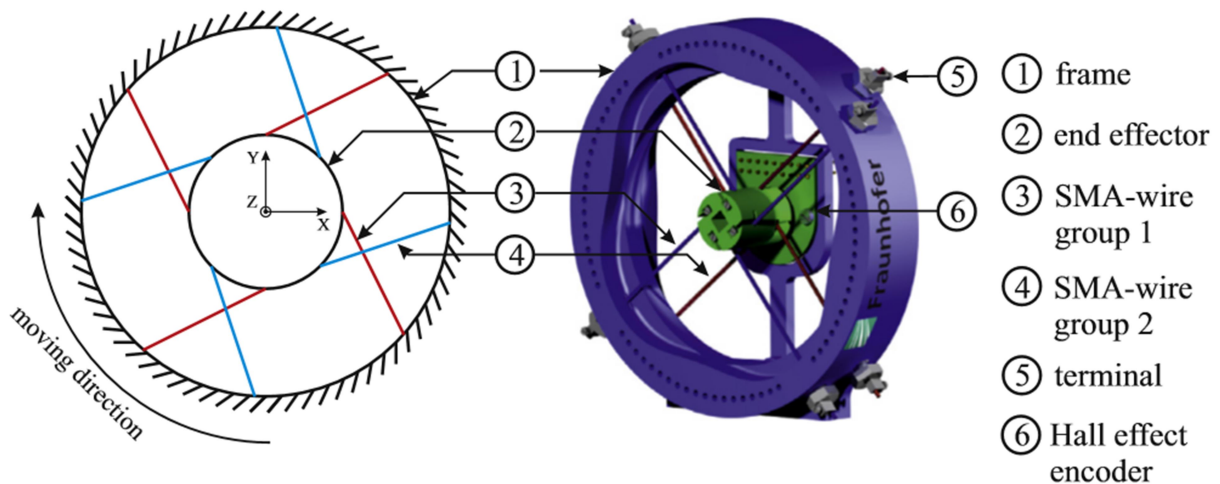


Figura 2-8: Modelo e descrição de movimento do atuador proposto (DROSSEL *et al.*, 2015)

Com o objetivo de desenvolver uma solução mais leve e compacta, WILLIAMS *et al.* (2010) propõem o projeto de um retrovisor lateral automotivo que atenda as necessidades de seu uso, como o alcance de movimento, a estabilidade de sua posição e sua controlabilidade.

Os retrovisores laterais típicos têm seu funcionamento tipicamente realizado a partir de dois motores de corrente contínua e um jogo de engrenagens. Um atuador SMA por sua vez, reduziria o número de componentes necessários e facilitaria a montagem do mesmo. O objetivo principal do estudo é diminuir os custos de produção e simplificar seu funcionamento.

Como visto na figura 2-9, o atuador consiste basicamente de uma articulação esférica e quatro fios SMAs. Uma mola carregada fornece estabilidade ao espelho quando não há atuação. Enquanto a atuação ocorre, a força dos fios SMA desengata a junta esférica e o movimento é realizado.

O atuador proposto rotaciona o espelho em torno de seus dois eixos, como mostrado na figura 2-10. Quando um dos fios é aquecido via efeito Joule, o mesmo contrai graças a sua transformação de fase. Pelo ajuste da corrente elétrica, é possível alcançar o controle da temperatura no fio. Ao controlar a temperatura, o nível de atuação é controlado. Com o uso de um algoritmo de controle especialmente criado, é possível controlar a posição do espelho de maneira orientada.

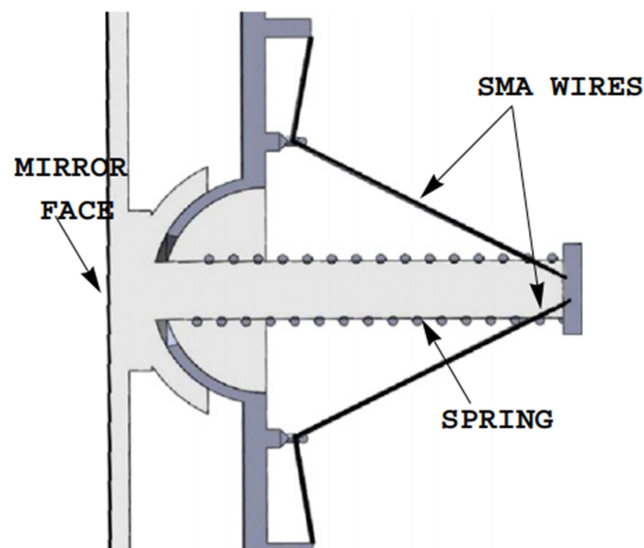


Figura 2-9: Protótipo de espelho retrovisor lateral movido por atuadores SMA (WILLIAMS *et al.*, 2010)

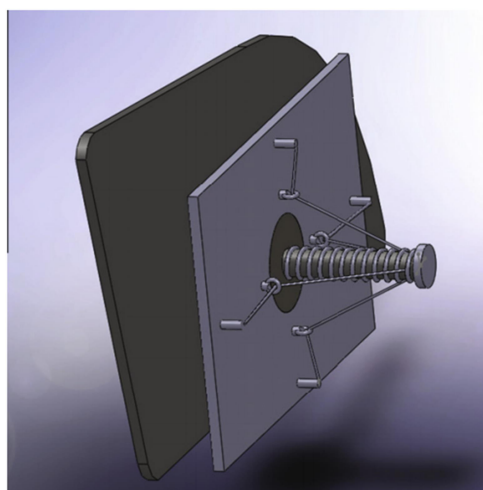


Figura 2-10: Protótipo de espelho retrovisor lateral movido por atuadores SMA (WILLIAMS *et al.*, 2010)

RODRIGUE *et al.*, (2015) propõe um atuador SMA capaz de curvar, torcer e uma combinação dos dois em mais de uma direção. Seu funcionamento se baseia no uso de múltiplos fios SMA que podem ser atuados em arranjos diversos, gerando o movimento desejado. Como visto na figura 2-11 cada atuador consiste de uma matriz retangular de dimetilpolisiloxano que envolve quatro fios. Dois deles na superfície superior e dois na superfície inferior. Isolantes plásticos envolvem os fios nos pontos em que eles se cruzam, evitando qualquer condução térmica.

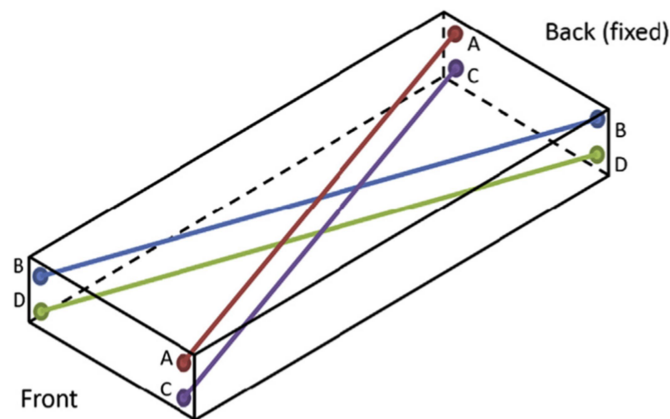


Figura 2-11: Posição dos fios na matriz do atuador proposta por RODRIGUE *et al.*, (2015)

Como visto na figura 2-12 o atuador pode ser induzido a um movimento de torção pelo ativamento de fios que possuam excentricidade opostas. Os fios B + C produziram, por exemplo uma torção no sentido horário.

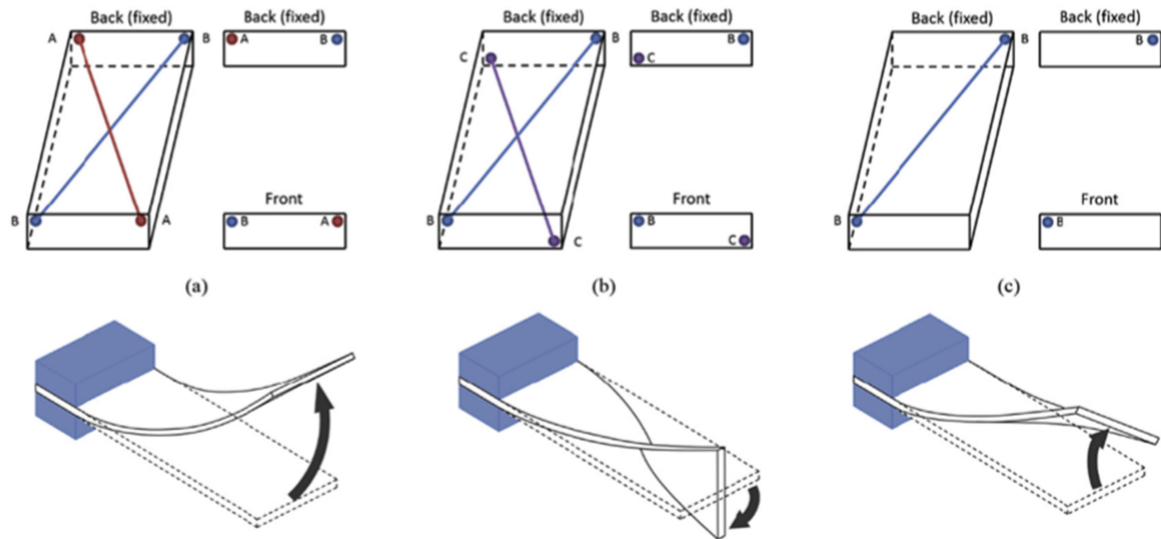


Figura 2-12: (a) movimento curvo (b) movimento de torção e (c) movimento curvo e em torção (RODRIGUE *et al.*, 2015)

Com o objetivo de medir a deformação exata do atuador nos seus diferentes modos, um segmento em forma de T com 3 marcadores visuais foi adicionado à parte frontal do atuador, como mostrado na figura 2-13. Duas câmeras foram instaladas, captando a movimentação dos pontos em dois planos ortogonais, X-Y e X-Z. Usando esse arranjo, a posição tridimensional dos marcadores pode ser definida nos pontos máximos de atuação.

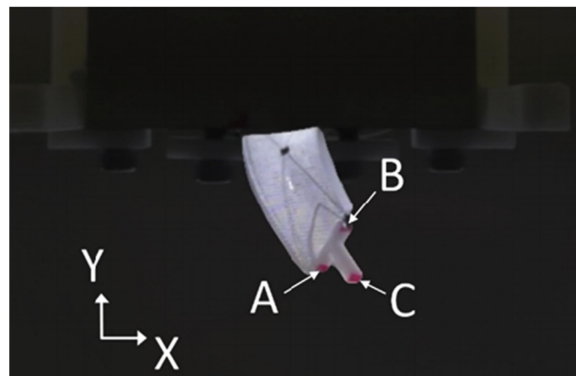


Figura 2-13: Posição dos três marcadores visuais ao serem captados por uma das câmeras

## Capítulo 3

### 3.1 Fundamentação Teórica

As ligas com memória de forma têm atraído muita atenção nos dias hoje, elas compõem a classe dos chamados materiais inteligentes, além de serem também funcionais. Grande parte de seu sucesso deriva de suas características únicas, como o efeito de memória de forma, e pseudoelasticidade. Ambas se realizam a partir da transformação martensítica, que ocorre em sua microestrutura, e sua transformação reversa (OTSUKA *et al.*, 1998).

As SMAs, quando trabalhadas em intervalos típicos de temperatura, apresentam duas fases, cada uma com estrutura cristalográfica única e, portanto, com propriedades diferentes. Uma se manifesta em alta temperatura, e é chamada austenita (A). A outra ocorre em baixa temperatura, e é chamada martensita (M). A austenita, que é geralmente cúbica, se diferencia da martensita justamente pelo arranjo atômico de sua microestrutura. A martensita por sua vez apresenta-se em células tetragonais, ortorrômbicas ou monoclinicas. Diferente das ligas ferrosas a transformação entre as estruturas das ligas de memória de forma não ocorre por difusão atômica, mas por uma distorção de cisalhamento na rede. Esta transformação é conhecida como transformação martensítica. Cada cristal de martensita formado apresenta uma direção em sua orientação, chamada de variante. Os arranjos de variantes martensíticas podem existir de duas formas: martensita maclada e martensita não maclada. A martensita maclada é formada por uma combinação de variantes “auto acomodadas”. A martensita não maclada por sua vez se especifica pela formação de uma variante dominante em sua região. Essa transformação de fase reversível entre a austenita e a martensita é o que torna o fenômeno de memória de forma possível (LAGOUDAS, 2008).

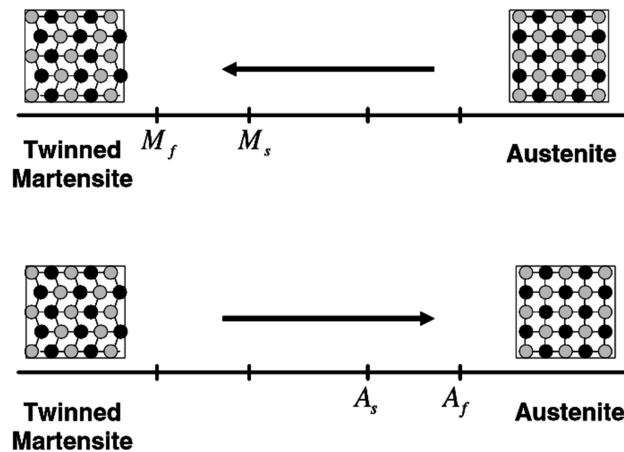


Figura 3-1: Transformação de fase por indução de temperatura de uma liga SMA onde  $M_s$  é a temperatura inicial de formação da martensita,  $M_f$  é a temperatura final de formação da martensita  $A_s$  é a temperatura inicial de formação da austenita e  $A_f$  é a temperatura final de formação da austenita (LAGOUDAS, 2008).

Como visto na figura 3-2 se um carregamento mecânico for aplicado no material quando o mesmo se encontra numa situação de baixa temperatura, ou seja com composição 100% martensítica maclada, algumas de suas variantes serão reorientadas, favorecendo a direção do carregamento, dando origem à martensita não maclada, onde  $\sigma_s$  é a tensão inicial de formação de martensita não maclada e  $\sigma_f$  é a tensão final de formação da mesma.

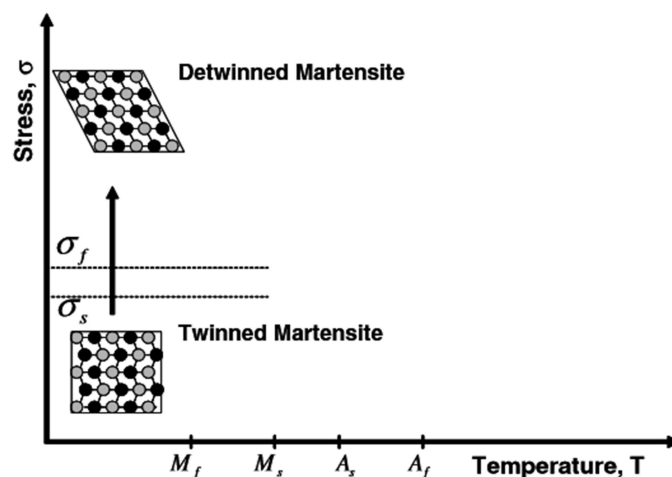


Figura 3-2a: Esquemática ilustrativa do efeito de memória de forma em uma liga SMA (LAGOUDAS, 2008)..



Como visto na figura 3-2b a microestrutura do material permanece a mesma quando o carregamento cessa, porém quando a temperatura é aumentada em um valor acima de  $A_f$ , a rede atômica recupera sua formação original ao voltar a transformar-se em austenita. Este é o efeito é conhecido como efeito de memória de forma. A figura 3-2c apresenta o gráfico

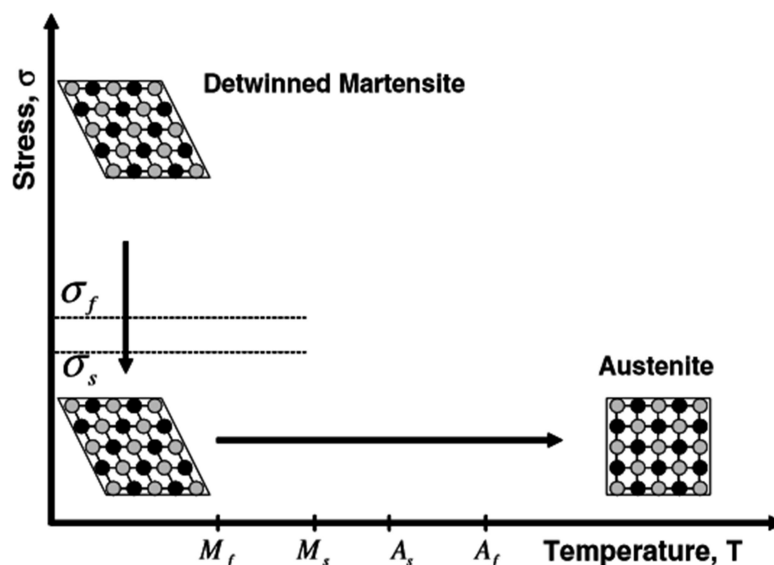


Figura 3-2b: Esquemática ilustrativa do efeito de memória de forma em uma liga SMA (LAGOUDAS, 2008)..

A figura 3-2c mostra o mesmo comportamento da SMA apresentado na Figura 3-2b. No ponto B da figura a SMA se encontra a baixa temperatura. Sob essa condição, a amostra da SMA tem uma fase martensítica maclada (twined). A partir deste ponto a liga é submetida a um carregamento mecânico, ocasionando um processo de reorientação na formação da martensita não maclada (detwined). Quando ocorre o descarregamento e este estiver concluído, a amostra da SMA apresenta uma deformação residual. A recuperação desta deformação residual é realizada através do aumento da temperatura ocasionando a transformação da fase martensita para austenita. Este é o efeito de memória de forma, também conhecida como One-Way efeito memória de forma

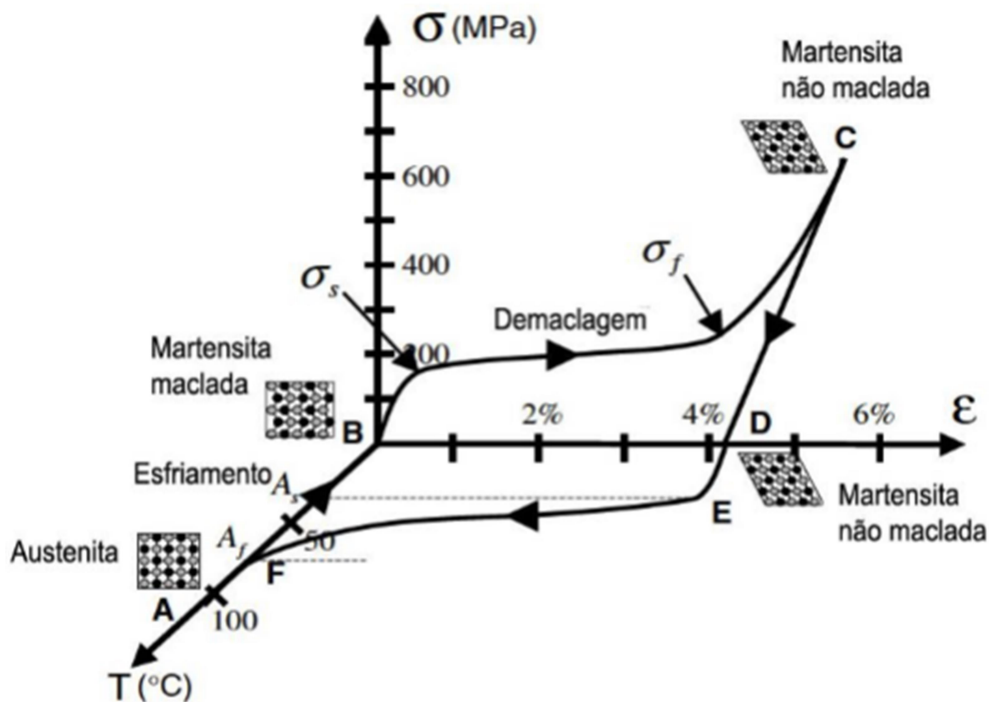


Figura 3-2c- Efeito de memória de forma, One-Way (LAGOUDAS, 2008).

Apesar do efeito memória de forma garantir a recuperação do formato inicial da peça, uma nova tensão acima de  $\sigma_f$  teria que ser aplicada e uma deformação gerada para que o efeito fosse novamente observado. Por conta disso é comum que os atuadores possuam elementos restituidores de posição que apliquem cargas permanentes aos elementos SMA. Estas cargas seriam responsáveis por deformar o material quando o mesmo fosse resfriado, formando diretamente martensita não maclada em sua microestrutura. O reaquecimento da peça resultaria na recuperação de seu formato original mesmo que a carga continuasse a ser aplicada. Uma esquematização do processo descrito acima pode ser vista na figura 3-3a. É importante ressaltar que as temperaturas de mudança de fase dependem fortemente da magnitude da carga aplicada, de modo que quanto maior a carga, mais energia térmica é necessária para que haja uma recuperação na forma da peça.

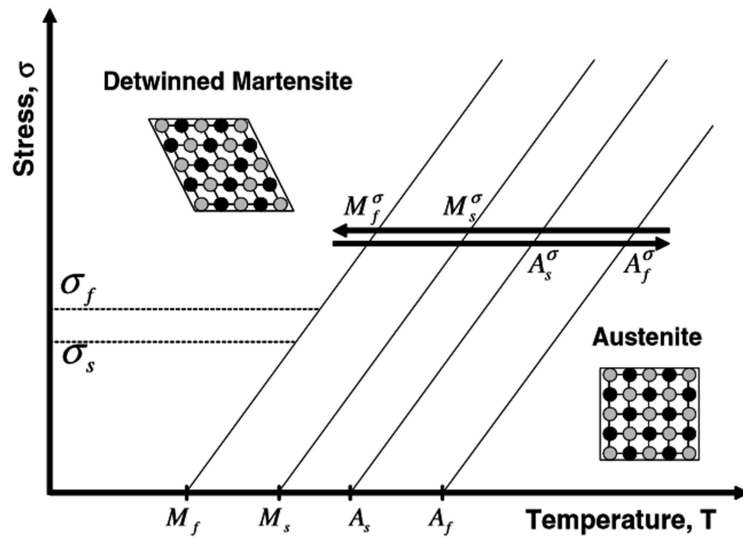


Figura 3-3a: Efeito memória de forma com tensão assistida (LAGOUDAS, 2008)..

A figura 3-3b mostra o mesmo comportamento da SMA apresentado na Figura 3-3a. Conforme a figura 3-3b, no ponto 1, a SMA se encontram na fase martensita maclada, A partir do ponto 1 é aplicado um carregamento de tensão até o ponto 2, o qual é mantido. Em seguida um carregamento térmico é aplicado a SMA, onde irá ocorrer uma transformação de fase da martensita não maclada para a fase austenita a alta temperatura (ponto 3), seguido de um resfriamento onde ocorre a transformação da fase austenita para a fase martensita maclada a baixa temperatura e em seguida um carregamento mecânico onde a martensita maclada se transforma em martensita não maclada, reiniciando o ciclo.

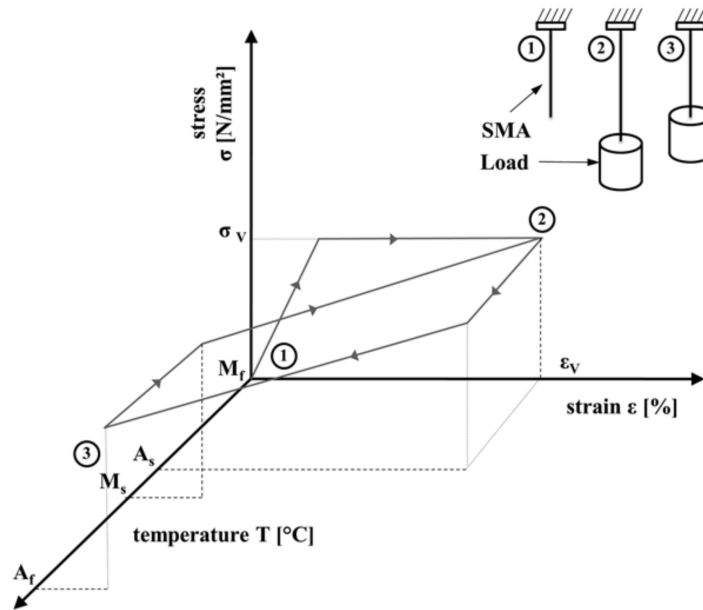


Figura 3-3b – Efeito memória de forma Two-Way (CZECHOWICS, 2015)

Modificar a temperatura não é a única maneira de alterar a microestrutura de uma liga SMA. Mesmo que a temperatura esteja acima de  $A_f$ , é possível produzir martensita não maclada ao aplicar uma carga mecânica no material. Como visto na figura 3-4a, o material mantém-se deformado enquanto a carga é aplicada, mas o mesmo recupera sua forma inicial quando a carga cessa. Este fenômeno é conhecido por pseudoelasticidade.

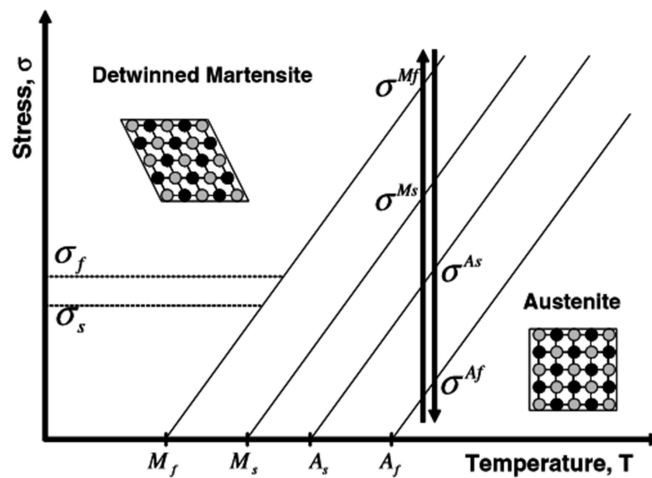


Figura 3-4a: Fenômeno da pseudoelasticidade. (LAGOUDAS, 2008)

A figura 3-4b mostra o mesmo comportamento da SMA apresentado na Figura 3-4a. No ponto O a SMA se encontra na fase Austenita. Devido a um carregamento mecânico ocorre um aumento de tensão até o ponto A onde se inicia a transformação de fase da austenita para a martensita não maclada. Esta transformação termina no ponto B. Ao ser descarregada a tensão, quando o descarregamento mecânico se encontra no ponto C, começa a transformação inversa da fase martensita não maclada para a fase da austenita, terminando quando o descarregamento atinge o ponto D.

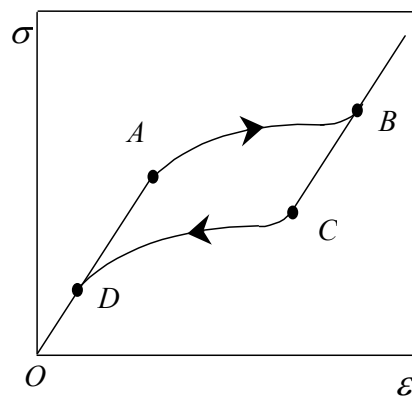


Figura 3-4b- Fenômeno da pseudoelasticidade.

## Capítulo 4

### 4.1 Projeto do Leme Inteligente

Para o desenvolvimento do leme, primeiro deve-se considerar os detalhes do seu funcionamento. Para isso, definiu-se que o mesmo teria três posições de trabalho: A primeira seria neutra, onde não há desvio de fluxo realizado (Figura 4-1). Na segunda o leme estaria virado a boreste (direita), desviando o fluxo de água para a direita da embarcação e, portanto, alterando sua direção também para a direita. E na terceira posição, o leme viraria a bombordo (esquerda), desviando o fluxo e a embarcação para a sua esquerda.

Por conta da necessidade de atuação em duas direções distintas, optou-se pelo uso de duas molas SMA posicionadas em ambos os lados do leme, e duas molas de aço, responsáveis pela restituição das posições.

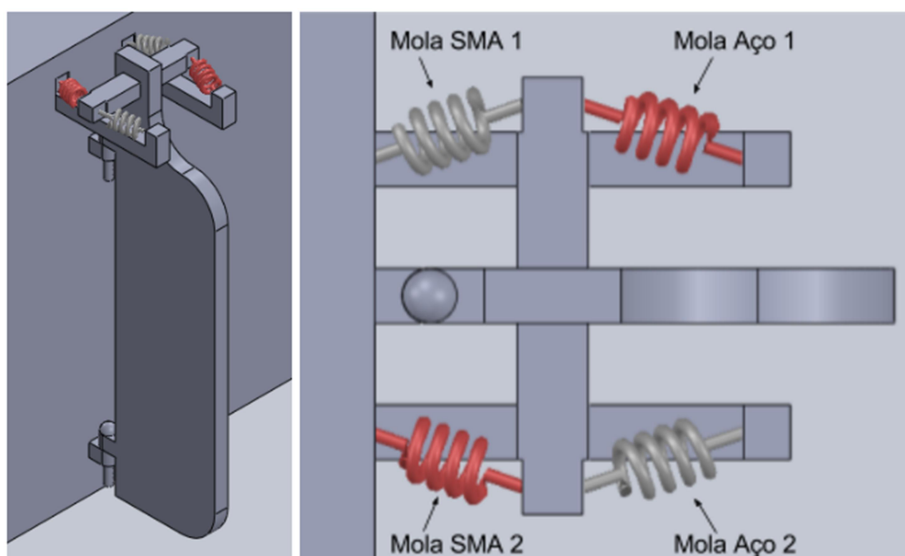


Figura 4-1: Projeto do Leme Inteligente na posição neutra.

Na posição neutra, ambas as molas SMA estão deformadas, e sua microestrutura é composta inteiramente de martensita não maclada, para isto, as molas são pré-carregadas mecanicamente antes da instalação. Para que a posição 2 seja ativada (Figura 4-2), a temperatura da mola SMA 1 é aumentada via efeito joule para um valor acima de  $A_f$ , fazendo com que sua

microestrutura se recupere, encolhendo, portanto, o comprimento da mola e movimentando o leme a boreste. Quando a mudança de direção da embarcação não for mais necessária, a passagem de corrente é cessada fazendo com que a mola SMA 1 se resfrie e seja novamente deformada pela mola Aço 1, voltando, portanto, à posição neutra (Figura 4-1).

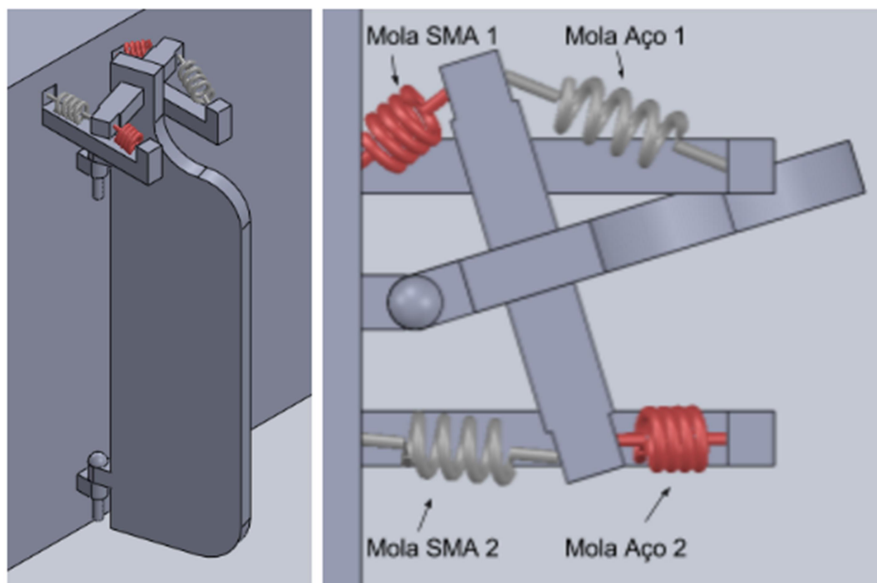


Figura 4-2: Leme na direção boreste. A temperatura na mola SMA 1 é maior que  $A_f$

Para que a posição 3 seja ativada (Figura 4-3), a temperatura da mola SMA 2 é aumentada também via efeito joule para um valor acima de  $A_f$ , encolhendo o comprimento da mola e movimentando o leme a bombordo. Quando a mudança de direção da embarcação não for mais necessária, a passagem de corrente é cessada fazendo com que a mola SMA 2 se resfrie e seja novamente deformada pela mola Aço 2.

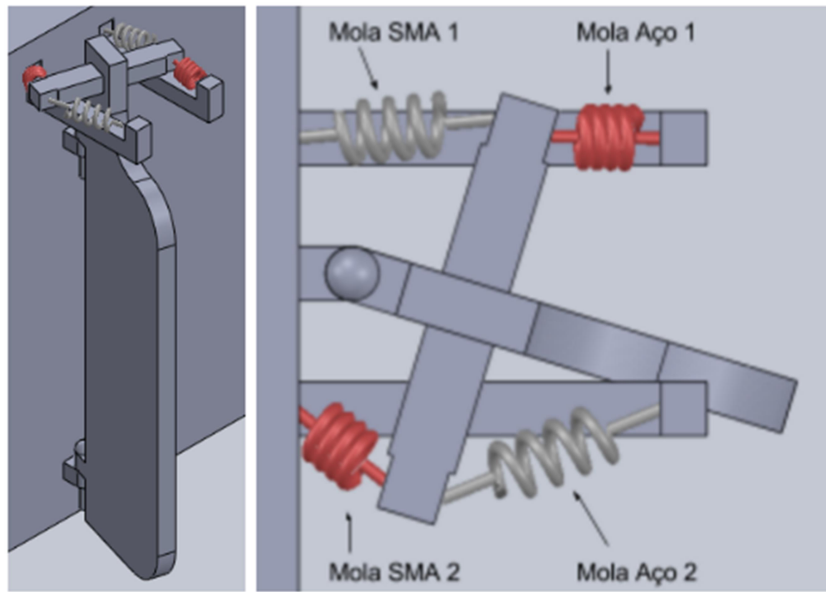


Figura 4-3: Leme na direção bombordo. A temperatura na mola SMA 2 é maior que  $A_f$ .



## Capítulo 5

### 5.1 O Protótipo do Leme Inteligente

A construção de um modelo experimental do leme proposto foi realizada para que sua aplicabilidade fosse atestada. Para isso, usou-se uma base fixa retangular, de madeira, um eixo em seu centro, e um dispositivo retangular representando o setor ou meia-lua do leme. Neste dispositivo, foi instalado um rolamento em seu centro e quatro olhais em suas extremidades. Na placa de madeira mais quatro olhais foram instalados para permitir a montagem das molas.

A primeira versão do protótipo se propôs a testar a aplicabilidade de fios SMA no lugar das molas propostas no projeto do leme inteligente, com o motivo de averiguar a possibilidade de usá-las em uma situação real de atuação.

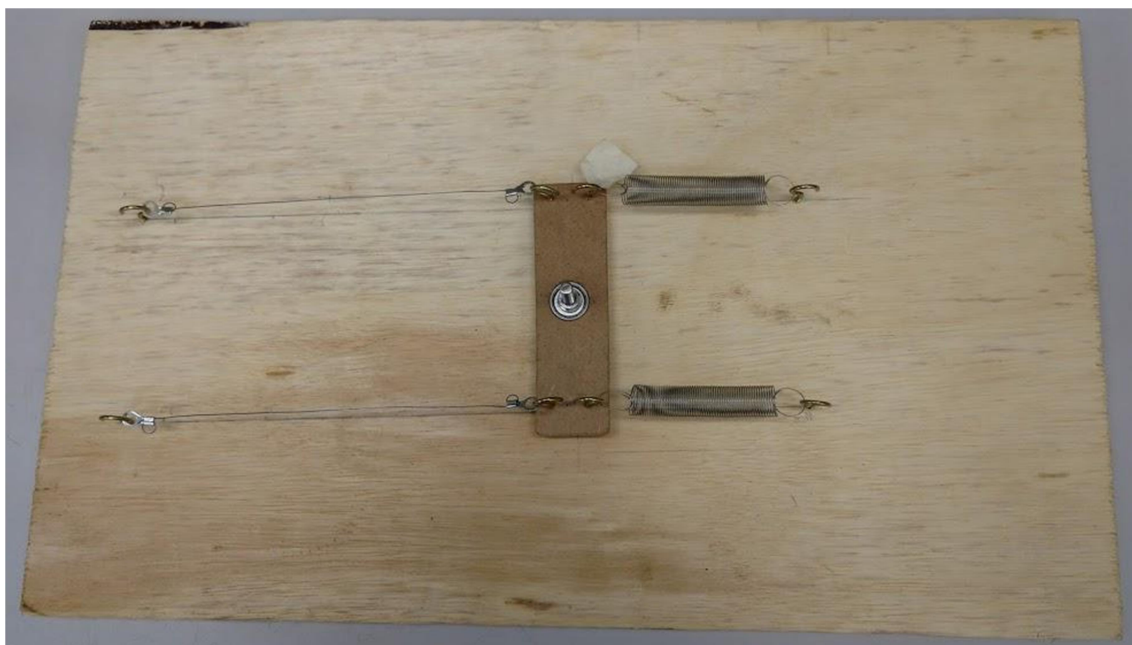


Figura 5-1: Protótipo do leme inteligente usando fios SMA.

O movimento gerado pelos fios atuadores de NiTi é diretamente relacionado com a deformação total do fio a ser recuperada. A deformação por sua vez é dependente do comprimento inicial do fio, e pode alcançar teóricamente até 8% deste comprimento sem que

apresente deformações plásticas, desconsiderando os efeitos de fadiga. Quando o leme se encontra na posição neutra ambos os fios já estão pré-deformados em 4%. Este valor é definido para que possam ser ativados quando o movimento em um sentido é necessário, e deformados mais 4% quando o movimento necessário for na direção oposta.

A partir destes dados, desenvolveu-se um método matemático para definir qual o maior ângulo alcançado pelo leme a partir de um par de fios de comprimento definido ( $l_0$ ) na posição neutra do leme (figura 5-2).

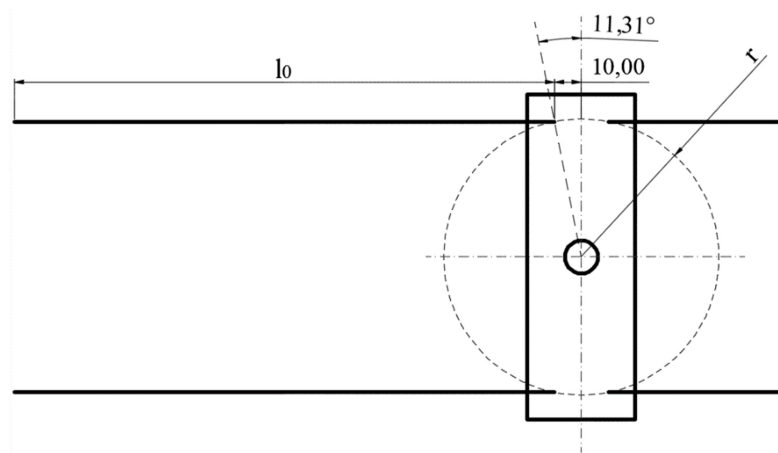


Figura 5-2: Posição neutra do leme.

Como visto na imagem 5-3, esta formulação pode ser representada geometricamente e a partir da relação do comprimento variável do fio ( $l_{fio}$ ) ao ângulo de giro do leme ( $\theta$ ).

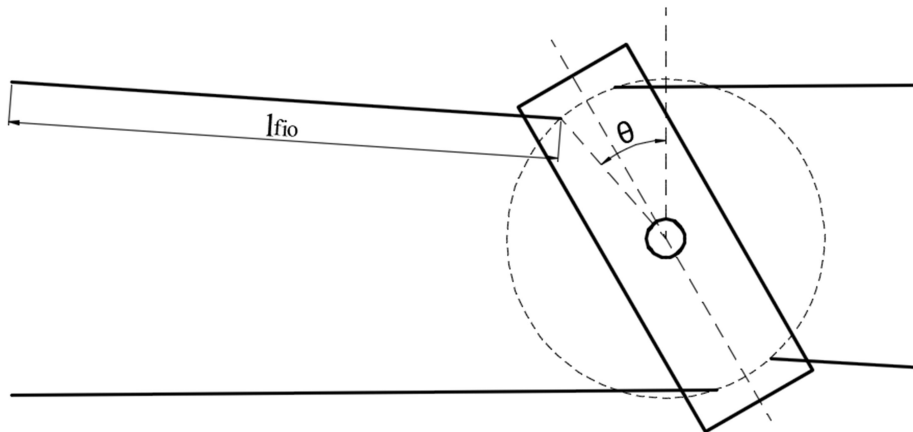


Figura 5-3: Representação geométrica da relação entre o comprimento do fio e o ângulo do leme

O comprimento do fio pode ser calculado como uma hipotenusa composta por dois catetos, como demonstrado na figura 5-4.

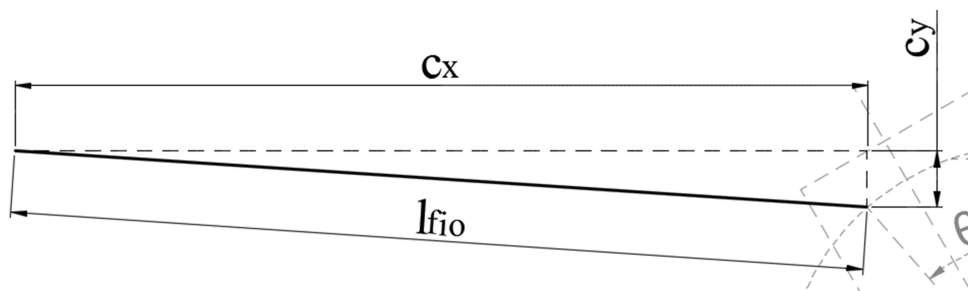


Figura 5-4: Decomposição do comprimento do fio

Logo,

$$l_{fio} = \sqrt{c_x^2 + c_y^2} \quad (1)$$

Como visto na figura 5-1, o olhal que fixa o fio SMA no dispositivo retangular não está verticalmente alinhado com o eixo que o fixa na base de madeira. Sua posição, conforme mostrada na figura 5-2 está a 10 mm da linha de centro do dispositivo, gerando um ângulo de 11,31°.

Logo por trigonometria é possível deduzir que:

$$c_x = l_0 + 10 - (r \times \text{sen}(11,31^\circ + \theta)) \quad (2)$$

$$c_y = r \times \{(\cos(0^\circ) - \cos(11,31^\circ + \theta)) - (\cos(0^\circ) - \cos(11,3^\circ))\} \quad (3)$$

Onde, de acordo com o protótipo  $l_0 = 200$  mm e  $r = 50,99$  mm

A partir desta formulação podemos calcular que o ângulo máximo alcançado pelo leme sem que o fio SMA seja deformado além de 8% é aproximadamente  $10^\circ$ . O que se mostra insuficiente para a aplicação que o dispositivo se propõe realizar. O comprimento do fio na posição neutra do leme deve ultrapassar 800 mm para que o mesmo alcance um ângulo de  $45^\circ$ , o que impossibilitaria seu uso em embarcações de menor comprimento. Como visto na figura 6-5 o baixo ângulo de atuação calculado se demonstrou condizente com os resultados obtidos pelo protótipo, invalidando a continuidade de seu desenvolvimento.

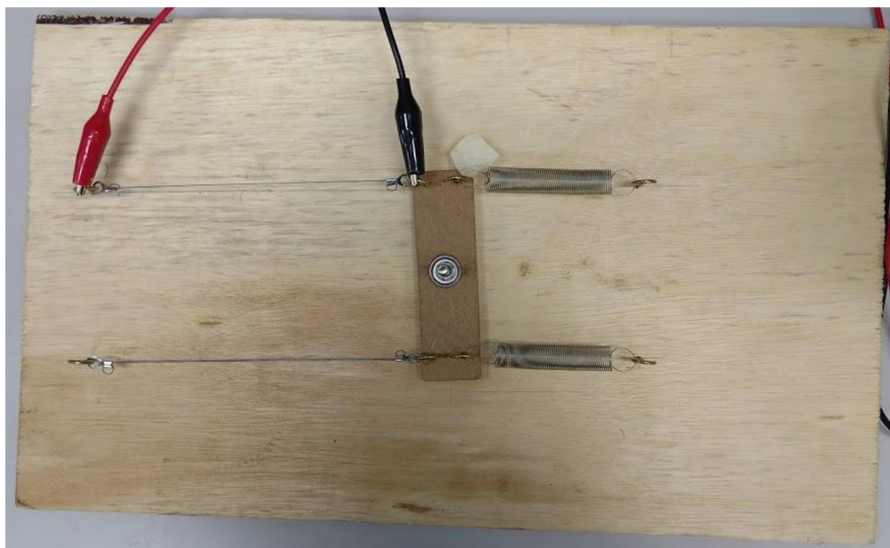


Figura 5-5 Baixo ângulo de atuação do primeiro protótipo.

A partir disso, decidiu-se pela construção de um protótipo com molas SMA (figura 5-5) na sua atuação. A vantagem das molas sobre os fios SMA é que as mesmas podem se deformar muitas vezes mais do que um fio, chegando a até 5 vezes o próprio tamanho, garantindo melhores ângulos de atuação em espaços mínimos.

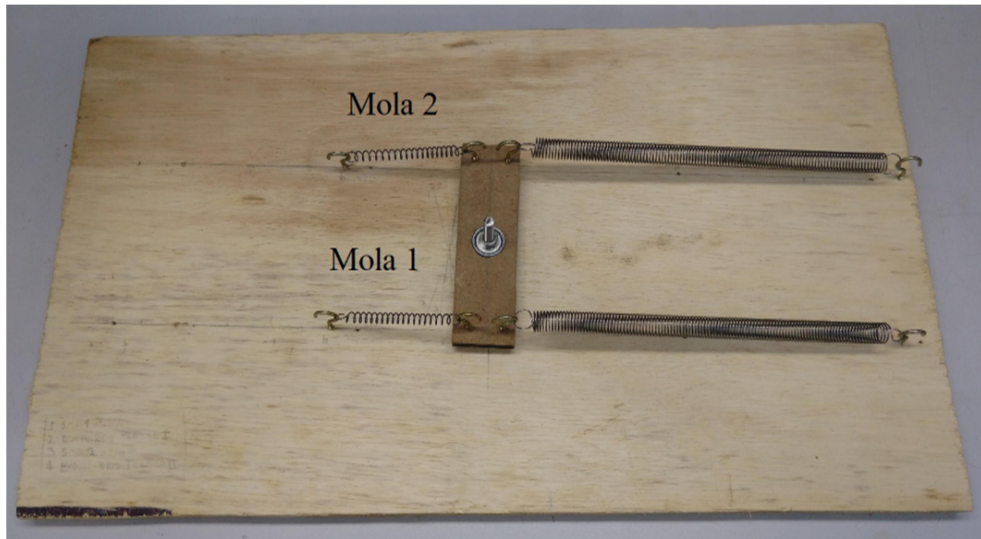


Figura 5-6: Segundo protótipo com molas SMA em sua atuação

A mola SMA usada na segunda versão do protótipo tem, de acordo com o fabricante *DYNALLOY, Inc.*, as seguintes características:

Tabela 5-1 – Características das molas SMA

Comprimento inicial:	29 mm
Comprimento máximo:	140 mm
Corrente máxima suportada:	3 A
Diâmetro do fio:	750 $\mu\text{m}$
$A_f$ :	70-80°C

A fim de respeitar essas características, e obedecendo a geometria, conforme apresentada anteriormente, definiu-se experimentalmente que o valor ótimo de  $l_0$  é 93mm, gerando em média 30° de movimentação em ambos os sentidos, e alcançando um  $l_{max}$  de 119,3mm.

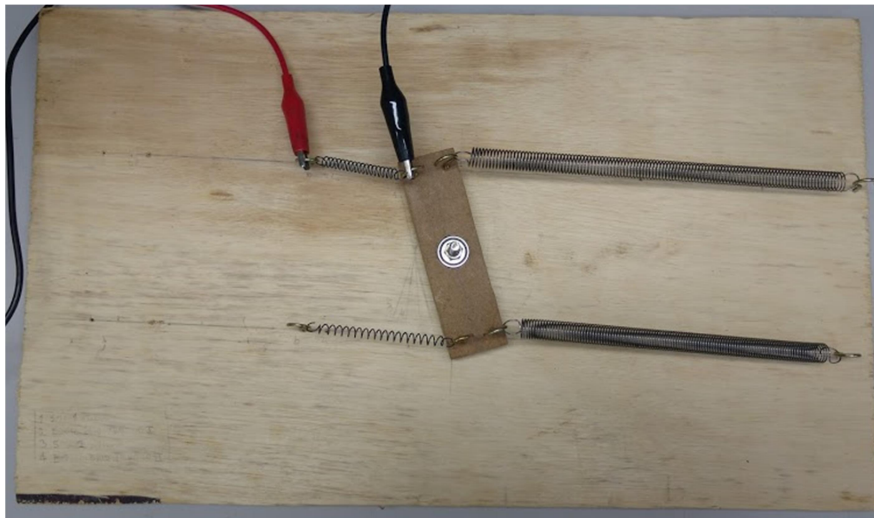


Figura 5-7: Segundo protótipo com mola SMA ativada.

Além da formulação usada para definir a quantidade de giro obtida pelo atuador, desenvolveu-se uma formulação para determinar o tempo aproximado para que o sistema seja acionado. Este tempo refere-se ao tempo necessário para que a liga com memória de forma aqueça e esfrie. O acionamento do atuador ocorre devido a passagem de corrente elétrica, ocasionando o aquecimento da liga com memória de forma, devido ao efeito Joule.

A corrente elétrica do sistema é definida pela equação

$$V = RI \quad (4)$$

Onde  $V$  é a tensão elétrica (5),  $I$  é a corrente elétrica  $R$  é a resistência elétrica que é definida por

$$R = \rho \frac{l_o}{A} \quad (5)$$

onde  $\rho$  é a resistividade do material ( $\Omega\text{m}$ ),  $l_o$  é o comprimento inicial do fio da mola (m) e  $A$  é a área da seção transversal do fio da mola.

A resistividade do material varia com a fase cristalográfica em que se encontra a liga, conforme a equação

$$\rho = \rho_M + \xi(\rho_A - \rho_M) \quad (6)$$

onde  $\rho_A$  é a resistividade do material na fase austenita ( $\Omega\text{m}$ ),  $\rho_M$  é a resistividade do material na fase martensítica ( $\Omega\text{m}$ ) e  $\xi$  é a fração volumétrica da austenita. O calor necessário para aquecer os fios de liga com memória de forma é calculado pela equação

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t \quad (7)$$

Que relaciona a corrente elétrica do sistema de atuação com o calor gerado.

A equação

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (8)$$

Relaciona a energia calorífica com o valor da temperatura do sistema, onde  $Q$  é a quantidade de energia térmica (J),  $\Delta t$  é a variação de tempo que a corrente fica aplicada a mola,  $\Delta T$  é a variação de temperatura do fio (K),  $m$  é a massa da mola (kg),  $c$  é o calor específico do material (J/(Kg.K)). A massa da mola de liga com memória de forma pode ser obtida pela equação da massa específica do material.

$$M_e = \frac{m}{v} = \frac{m}{A \cdot l_0} \quad (9)$$

Onde  $M_e$  é a massa específica do material  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$  e  $v$  é o volume do fio ( $m^3$ ).

Substituindo a equação 4 e 5 na equação 7 tem-se:

$$Q = \frac{V^2 \cdot A}{\rho \cdot l_0} \Delta T \quad (10)$$

Substituindo a equação 9 na equação 10 tem-se:

$$Q = M_e \cdot A \cdot l_0 \cdot \Delta T \quad (11)$$

Logo:

$$\Delta t = \frac{M_e \cdot \rho \cdot l_0^2}{V^2} \cdot c \cdot \Delta T \quad (12)$$

onde  $\Delta t$  é o tempo necessário para aquecer a mola de liga de memória de forma.

Para definir o tempo para resfriar a mola de liga com memória de forma utiliza-se a equação que descreve a energia de dissipação durante o resfriamento, considerando que o resfriamento ocorre por convecção.

$$P = h \cdot A_c \cdot \Delta T \quad (13)$$

onde  $P$  é a potência dissipativa por convecção (J/s),  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção (J/sm<sup>2</sup>K).  $A_c$  é a área da superfície que troca calor com o ambiente ( $m^2$ ).

A potência dissipada é:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \quad (14)$$

logo:

$$\Delta t = \frac{M_e \cdot A \cdot l_o \cdot c}{h \cdot A_c} \quad (15)$$

## 5.2 Testes Mecânicos E Ensaio Térmicos

A fim de caracterizar os elementos mecânicos que compõem o projeto, dois principais testes foram realizados: O Ensaio de Tração e o Ensaio Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC).

Em um ensaio de tração, o corpo de prova é submetido a um esforço que tende a alongá-lo, com o objetivo de descobrir seu comportamento diante de um esforço variável. Seu resultado consiste em um gráfico força x deformação que fornece informações importantes, como por exemplo a tensão última de ruptura,  $\sigma_{ult}$ , tensões de transição entre martensita maclada e martensita não maclada ou constantes elásticas.

Os ensaios de tração apresentados neste trabalho foram realizados em uma máquina *Instron®* para ensaios de tração apresentado na figura 5-7.





Figura 5-8 - Máquina *Instron*® para ensaios de tração

O ensaio DSC foi realizado para a obtenção das temperaturas de transformação de fase. Um calorímetro diferencial de varredura(DSC), modelo DSC 200 F3 Maia, ilustrado na figura 5-8, foi utilizado.

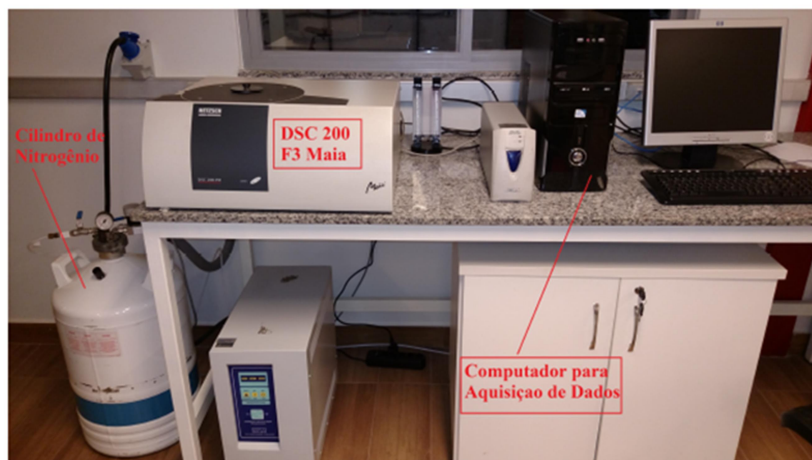


Figura 5-9: Calorímetro diferencial de varredura *DSC 200 F3 Maia*.

Esta análise verifica como o fluxo de calor varia no interior de uma amostra do material a ser medido e o relaciona com o fluxo de calor de uma amostra de referência, e é monitorada como uma função da temperatura, gerando como resultado um gráfico. Em temperaturas específicas onde há a ocorrência de fenômenos físicos, como a transição cristalina de fases, é possível observar picos na variação de entalpia. Estas temperaturas, no escopo deste projeto, serão as temperaturas de formação da austenita,  $A_s$  e  $A_f$ , e da martensita,  $M_s$  e  $M_f$ .

### **5.3 Apresentação dos Componentes e Resultados das Caracterizações**

O primeiro elemento caracterizado foi o fio de liga de memória de forma, de liga NiTi com diâmetro de 0,5mm. Para a caracterização do mesmo foram realizados um ensaio de tração e DSC.

Como visto no gráfico apresentado pela figura 5-9 o fio apresenta tensão última de ruptura,  $\sigma_{ult}$ , de aproximadamente 713 Mpa. É possível também identificar a zona de transição entre martensita maclada e martensita não-maclada. Esta transição é notória visto que existem três nítidas regiões no gráfico, até aproximadamente 15N onde há martensita maclada em predominância, entre 15N e 90N onde há a transição de martensita maclada para martensita não-maclada e a partir de 90N onde há 100% de formação de martensita não-maclada.

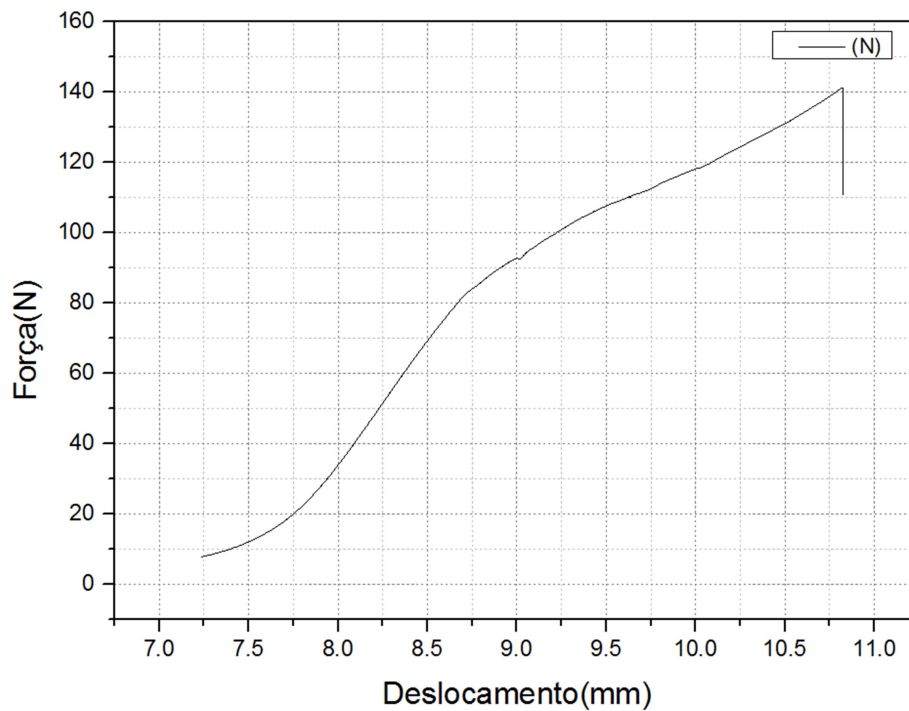


Figura 5-10 Ensaio de tração para o fio SMA de 0,5mm.

No gráfico apresentado na figura 5-10 pode ser visto o resultado da Análise Térmica Diferencial (DSC) da liga que compõe o fio SMA. Os resultados mostram que a temperatura inicial de formação da austenita  $A_s$  está em torno de  $57^{\circ}\text{C}$  e a temperatura final de formação da austenita  $A_f$  está em torno de  $77^{\circ}\text{C}$ .

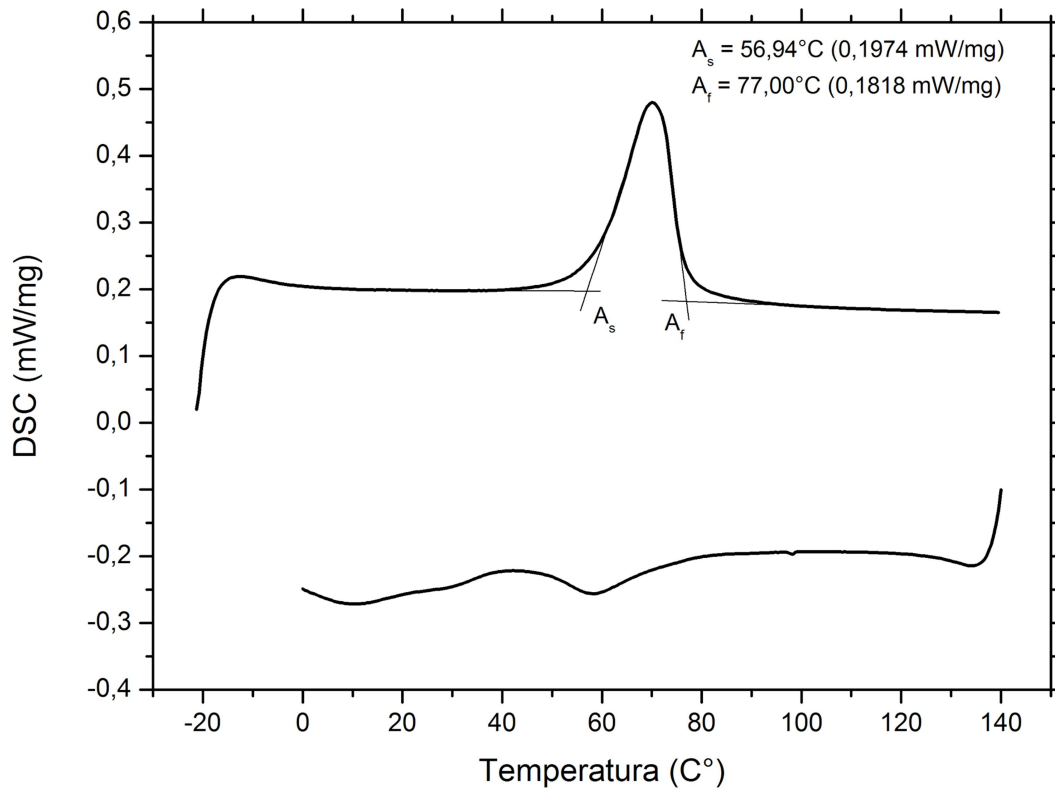


Figura 5-11: Análise Térmica Diferencial do fio SMA de 0,5mm.

De acordo com o fabricante, as molas SMA escolhidas apresentam 750  $\mu\text{m}$  de diâmetro de fio, podem ser estendidas ou deformadas até um total de aproximadamente 140 mm, usando uma força de aproximadamente 6N. Quando aquecida, pode contrair até aproximadamente 30mm, gerando em média uma força de 8,4N com uma corrente de 3 Amperes. A mola possui 6 mm de diâmetro externo e sua temperatura de formação final da austenita,  $A_f$ , ocorre entre 70°C e 80°C. Sua representação pode ser vista na figura 5-11.



Figura 5-12: Exemplos das molas SMA escolhidas.

Para que houvesse confiabilidade nos dados fornecidos pelo fabricante, com o objetivo de dimensionar molas de aço que operassem de maneira eficiente tal como definido em projeto, dois ensaios foram realizados na mola. Um ensaio de tração para averiguar a relação entre força suportada e deslocamento, e o DSC para descobrir as temperaturas de transformação de fase da liga de memória de forma que compõe as molas. O ensaio de tração pode ser visto na figura 5-13

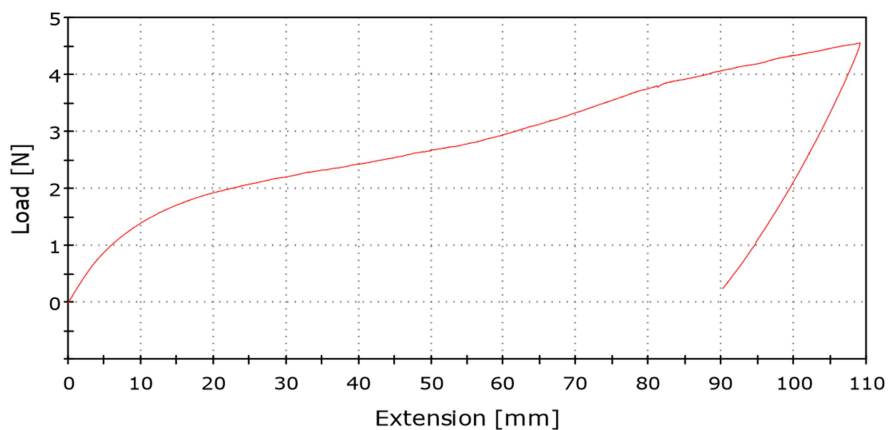


Figura 5-13: Resultado do teste de tração da mola SMA.

Para o DSC da mola, foram coletadas três amostras para a realização dos testes. As figuras abaixo representam os resultados obtidos utilizando o software de análise do equipamento, *Proteus® Analysis*. As temperaturas obtidas estão listadas na Tabela 5-2 assim como os valores médios encontrados e os desvios padrão, onde  $A_s$  representa a temperatura onde tem início a formação da austenita,  $A_f$  representa a temperatura final para a formação da

austenita,  $M_s$  é a temperatura onde tem início a formação da martensita e por fim,  $M_f$  é a temperatura onde tem fim a transformação da martensita. Foi observada ainda a existência de uma fase intermediária, fase R, durante a transformação austenita  $\rightarrow$  martensita.

Tabela 5-2: Temperaturas de transformação obtidas

Amostra	$A_s$ (°C)	$A_f$ (°C)	$M_s$ (°C)	$M_f$ (°C)
<b>1</b>	60.40	73.90	11.20	-14.90
<b>2</b>	60.30	74.00	11.20	-15.00
<b>3</b>	60.30	74.00	11.20	-15.00
<b>Valor Médio</b>	60.33	73.97	11.20	-14.97
<b>Desvio Padrão</b>	0.06	0.06	-	0.06

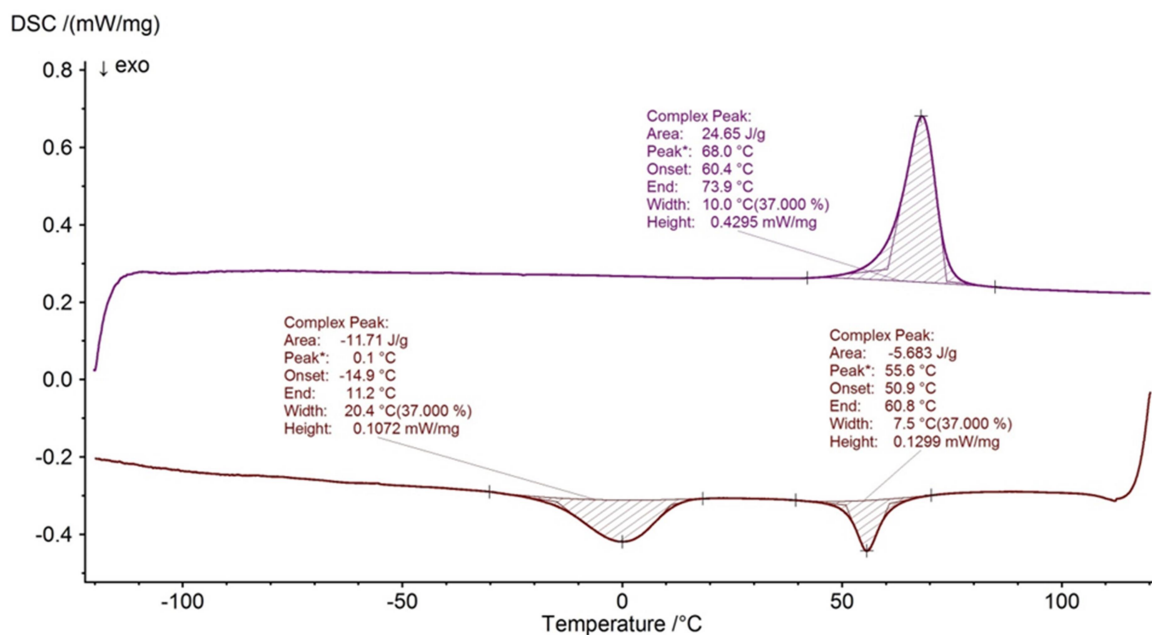


Figura 5-14: Resultado de uma das amostras verificadas.

A partir destes resultados e das especificações do projeto, as mola de aço foram dimensionadas e escolhidas. Sua representação pode ser vista na figura 5-14. Seu requisito mais importante é ter rigidez superior às molas SMA, para que a posição inicial do leme seja restituída com sucesso.



Figura 5-15: Molas de aço de comprimento 8mm e  $K \cong 28 \text{ N/m}$

O par de molas de aço foi adquirido em uma loja especializada, porém, apesar das duas molas serem compostas pelo mesmo material, e dividirem o mesmo número de espiras, comprimento e diâmetro externo, possuem módulos de elasticidade levemente discordantes, gerando um desbalanceamento na posição neutra do leme, mas não influenciando na qualidade dos resultados obtidos. Da mesma maneira que a mola SMA, o teste utilizado definir o  $K$  da mola de aço foi realizado na máquina Instron de ensaio de tração, e o gráfico do ensaio se encontra na figura 5-15. Para o cálculo do módulo elástico, a região elástica da mola foi parametrizada por interpolação com auxílio do programa Microsoft Excel®. Na instalação das molas no aparato houve uma pré-deformação da mesma para que o comprimento inicial fosse 10mm, assim garantindo o trabalho da mesma na parte elástica

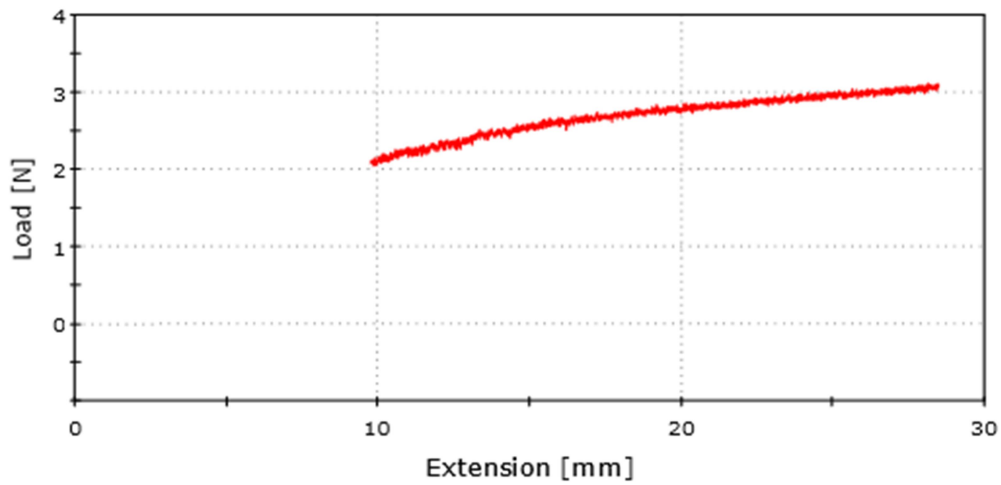


Figura 5-16: Ensaio de tração da mola de aço.

Para dar confiabilidade aos resultados do protótipo foram instalados no mesmo um conjunto de sensores de posição, e um programa foi escrito para melhor acompanhamento dos resultados.

Os sensores são controlados e enviam informações por um microcomputador Arduino Uno (Figura 5-16), que fornece ao usuário informações como o ângulo do leme varia com relação ao tempo.

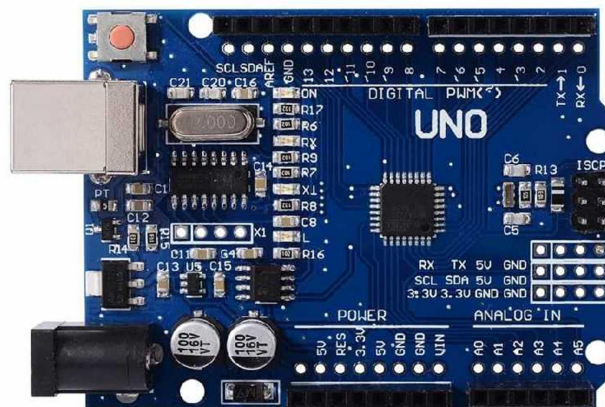


Figura 5-17: Arduino Uno



Para a medição da posição angular do leme, o sensor MPU-6050 (figura 5-17) foi utilizado. Ele possui um acelerômetro e um giroscópio, ambos com 3 eixos de medição e um sensor de temperatura embutido.

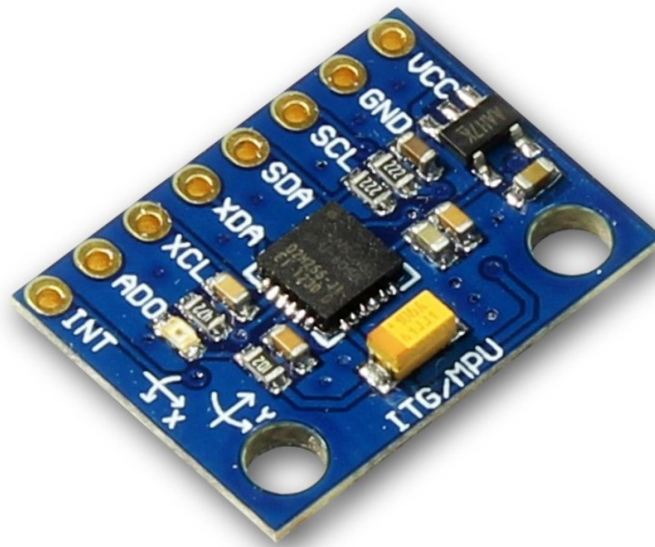


Figura 5-18: Sensor acelerômetro MPU-6050

## Capítulo 6

### 6.1 Metodologia dos testes de desempenho

O objetivo dos testes experimentais é examinar o comportamento do leme a partir de diversos ciclos de carregamento térmico nas molas SMA. Para isso será utilizada a fonte ICEL PS-7000 que possui um modo de distribuição de valor fixo de corrente.



Figura 6-1: Fonte elétrica ICEL PS-700

Os ciclos serão divididos em quatro grupos, cada qual com corrente máxima ( $i_{max}$ ) constante, que serão 1,0A; 1,5A; 2,0A e 2,5A.

Os ciclos em cada grupo seguirão um roteiro básico de testes mostrados a seguir.

## 6.2 Roteiro dos testes

Os procedimentos experimentais foram definidos com o objetivo de variar o tempo de aplicação de corrente e de resfriamento, com o intuito de verificar a mudança no comportamento das molas SMA quando as mesmas tem um maior periodo para resfriar-se:

ETAPA 1 - Ciclos de dois minutos:

- Carregamento até  $I_{max}$  na mola 1 em aproximadamente 3 segundos;
- Permanência de corrente  $I_{max}$  por 30 segundos;
- Descarregamento até que se cesse a corrente na mola 1 em aproximadamente 3 segundos;
- Tempo de repouso para resfriamento da mola 1 durante 30 segundos;
- Carregamento até  $I_{max}$  na mola 2 em aproximadamente 3 segundos;
- Permanência de corrente  $I_{max}$  por 30 segundos;
- Descarregamento até que se cesse a corrente na mola em aproximadamente 3 segundos;
- Tempo de repouso para resfriamento da mola 2 durante 30 segundos;
- Ciclo repetido novamente mais 4 vezes.

ETAPA 2 - Ciclos de quatro minutos:

- Carregamento até  $I_{max}$  na mola 1 em aproximadamente 3 segundos;
- Permanência de corrente  $I_{max}$  por 60 segundos;
- Descarregamento até que se cesse a corrente na mola 1 em aproximadamente 3 segundos;
- Tempo de repouso para resfriamento da mola 1 durante 60 segundos;
- Carregamento até  $I_{max}$  na mola 2 em aproximadamente 3 segundos;
- Permanência de corrente  $I_{max}$  por 60 segundos;
- Descarregamento até que se cesse a corrente na mola em aproximadamente 3 segundos;
- Tempo de repouso para resfriamento da mola 2 durante 60 segundos;
- Ciclo repetido novamente mais 4 vezes.

## Capítulo 7

### 7.1 Resultados Obtidos

No momento da realização dos ensaios percebeu-se que a corrente gerada pela fonte ICEL PS-7000 gera também um campo magnético capaz de alterar as leituras do sensor MPU-6050. Percebeu-se também que o mesmo não apresenta uma resposta constante, exibindo uma leitura angular que difere da posição real, mesmo quando não há campo magnético presente. A partir desta resposta difusa decidiu-se pela mudança no método de obtenção dos dados. Uma câmera foi posicionada de modo a capturar toda a movimentação realizada pelo leme, e suas informações foram captadas ponto a ponto a partir de um software de edição de vídeo para que os gráficos pudessem ser construídos.

A seguir serão apresentados os resultados dos testes realizados e as considerações acerca do comportamento documentado. Para entendimento do resultado é importante ressaltar o motivo para que os valores de corrente apresentados variem entre  $-2,5A$  e  $2,5A$ . Por convenção admitiu-se que a variação demonstrada no gráfico ocorrida entre 0 e  $2,5A$  corresponderia ao valor da corrente na mola SMA número 1, que quando ativada provoca movimentação no sentido horário (ângulo positivo). E a variação demonstrada no gráfico como ocorrida entre 0 e  $-2,5A$  corresponderia ao valor da corrente na mola SMA número 2, que provoca movimentação no sentido anti-horário do leme (ângulo negativo). A ordem da apresentação dos gráficos respeita o crescimento da movimentação alcançada.

A figura 7-1 mostra o gráfico resultante do teste de ciclo de dois minutos e corrente máxima de  $1A$ .

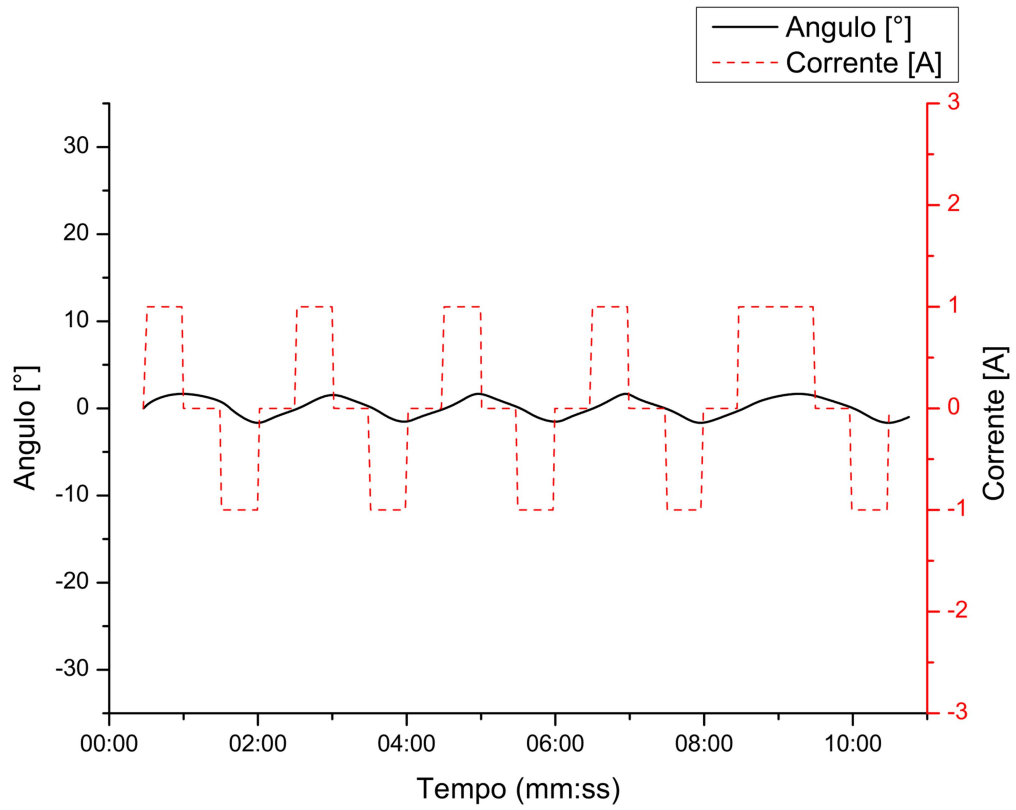


Figura 7-1: Ciclos de dois minutos e máxima corrente de 1A.

A figura 7-2 mostra o gráfico resultante do teste de ciclo de quatro minutos e corrente máxima de 1A.

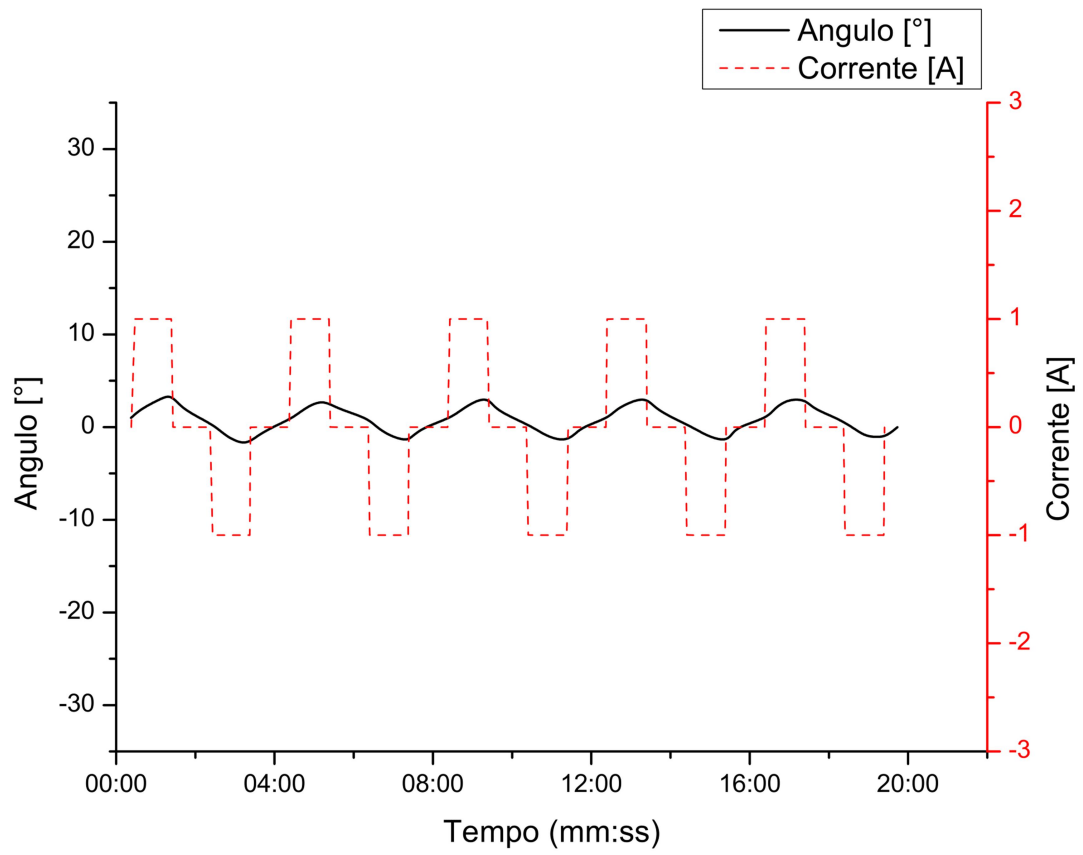


Figura 7-2: Ciclos de quatro minutos e máxima corrente de 1A.

A figura 7-3 mostra o gráfico resultante do teste de ciclo de dois minutos e corrente máxima de 1,5A.

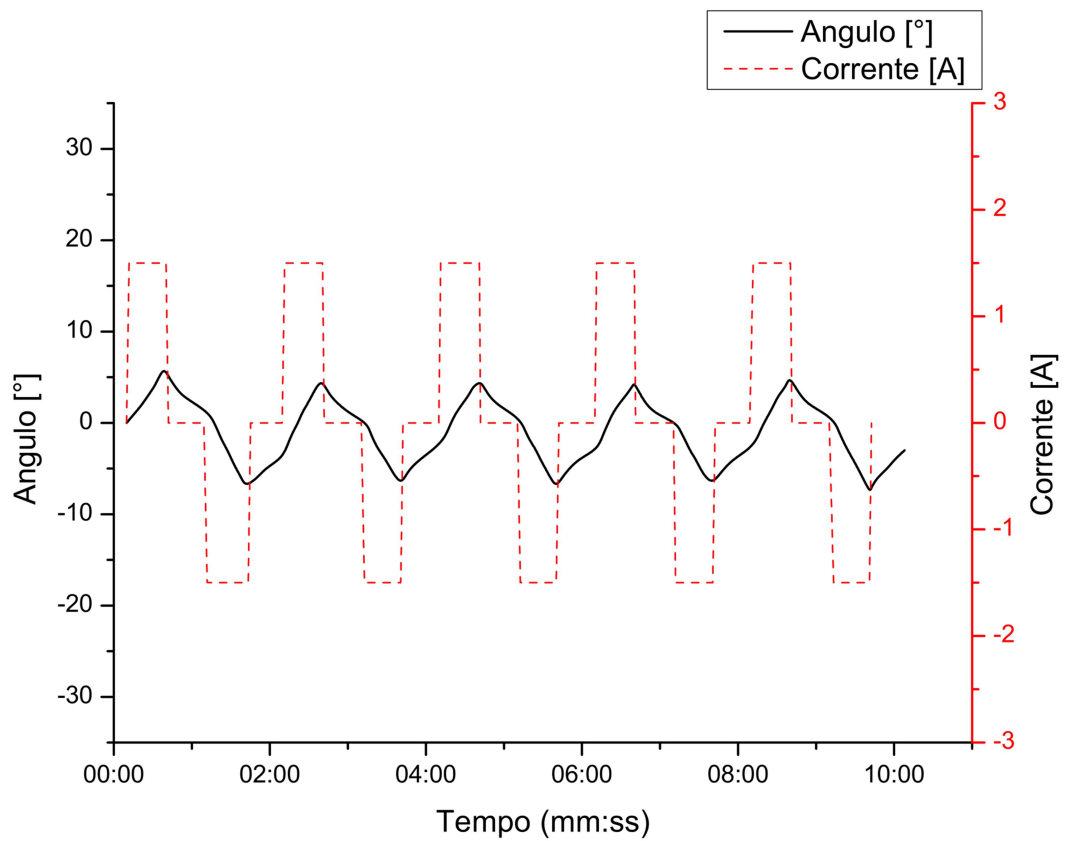


Figura 7-3: Ciclos de dois minutos e máxima corrente de 1,5A.

A figura 7-4 mostra o gráfico resultante do teste de ciclo de quatro minutos e corrente máxima de 1,5A.

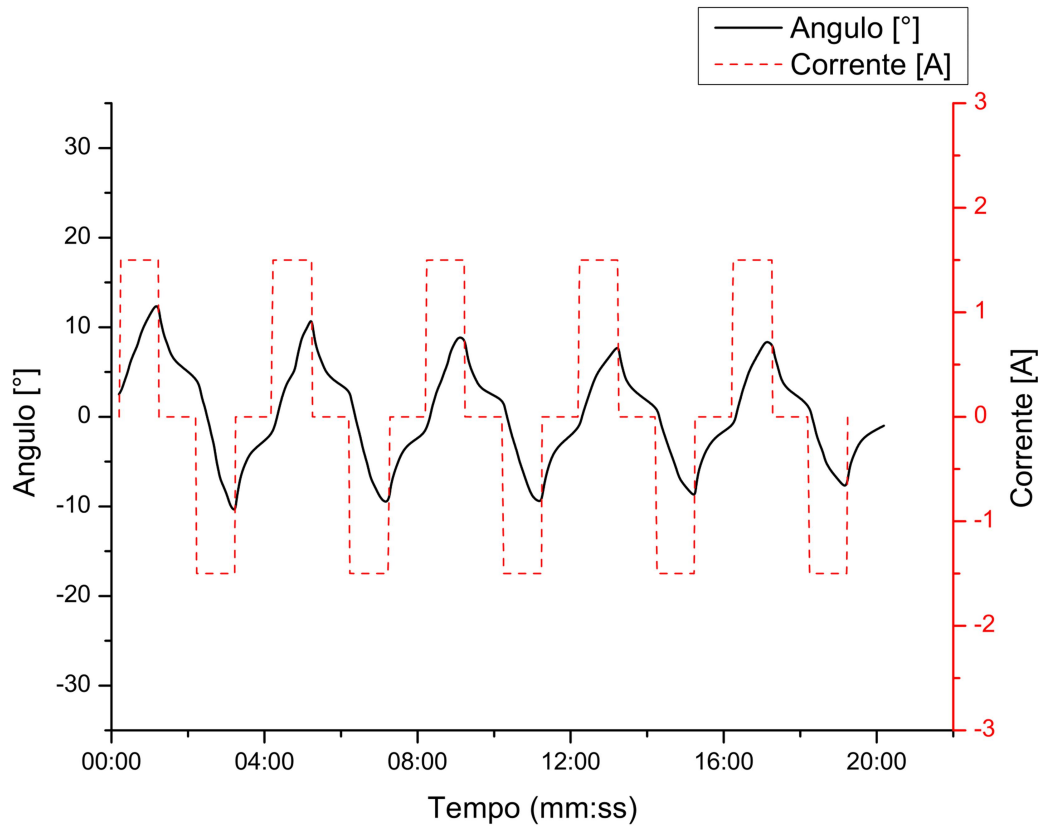


Figura 7-4: Ciclos de quatro minutos e máxima corrente de 1,5A.

A figura 7-5 mostra o gráfico resultante do teste de ciclo de dois minutos e corrente máxima de 2A.



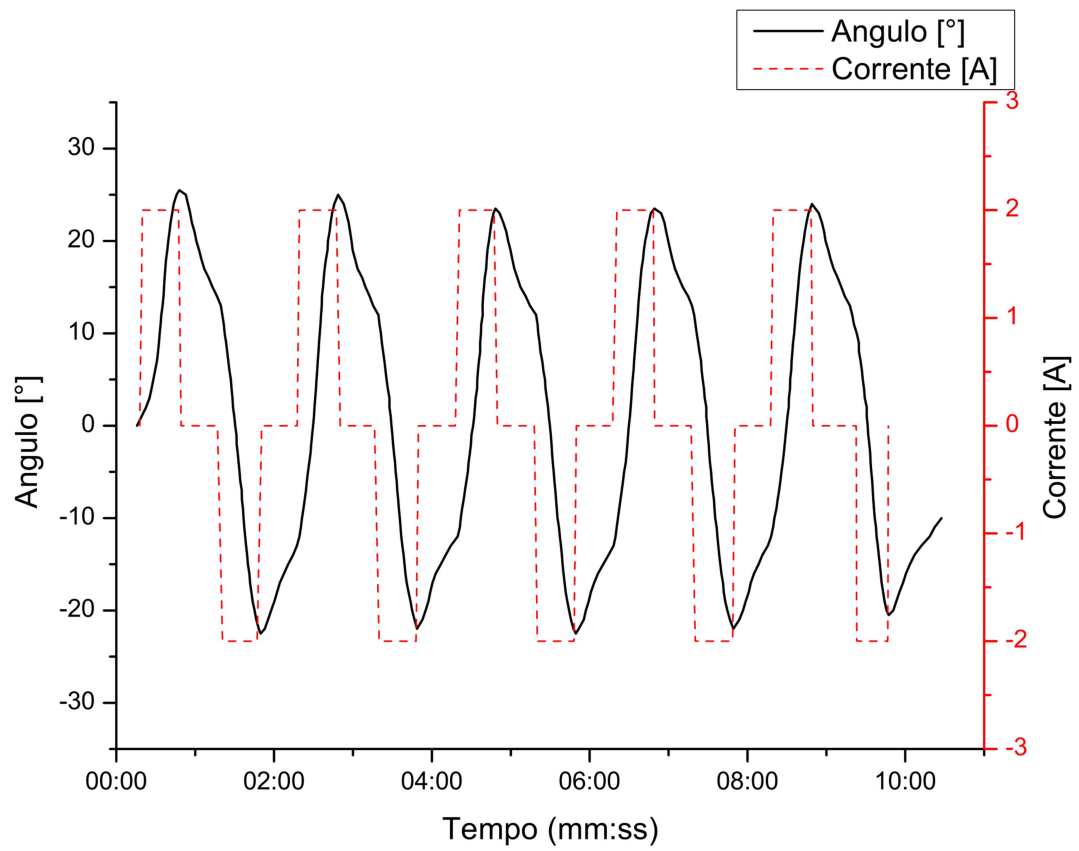


Figura 7-5: Ciclos de dois minutos e máxima corrente de 2A.

A figura 7-6 mostra o gráfico resultante do teste de ciclo de quatro minutos e corrente máxima de 2A.

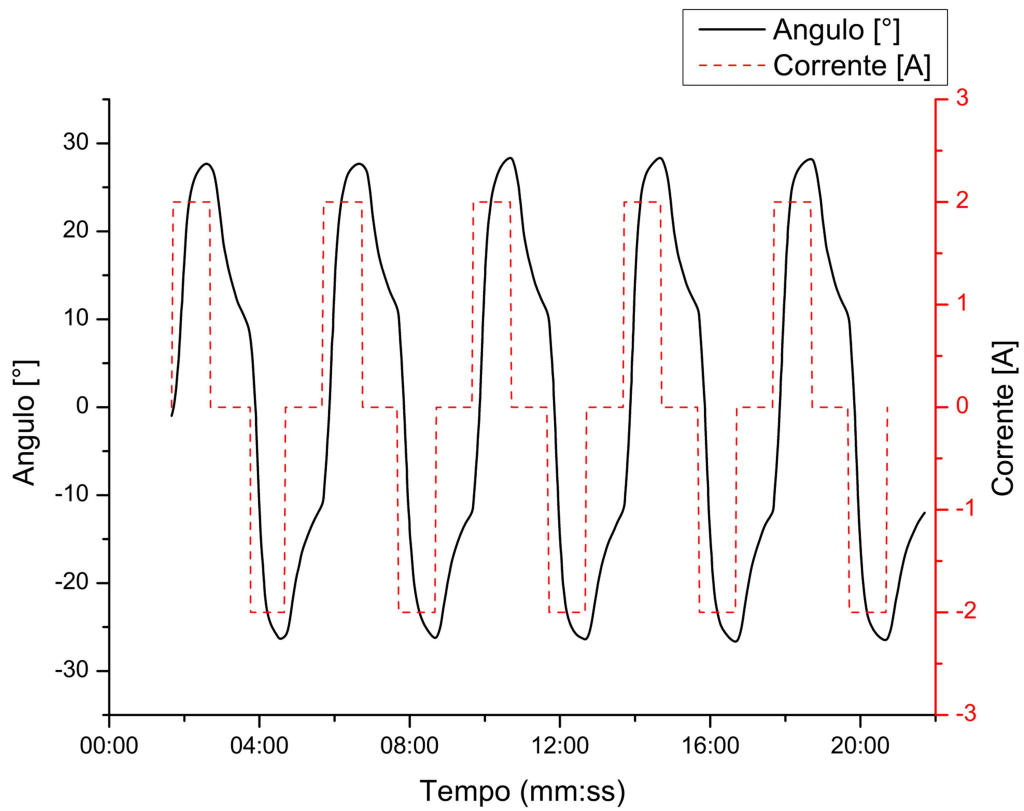


Figura 7-6: Ciclos de quatro minutos e máxima corrente de 2A.

A figura 7-7 mostra o gráfico resultante do teste de ciclo de dois minutos e meio e corrente máxima de 2,5A.

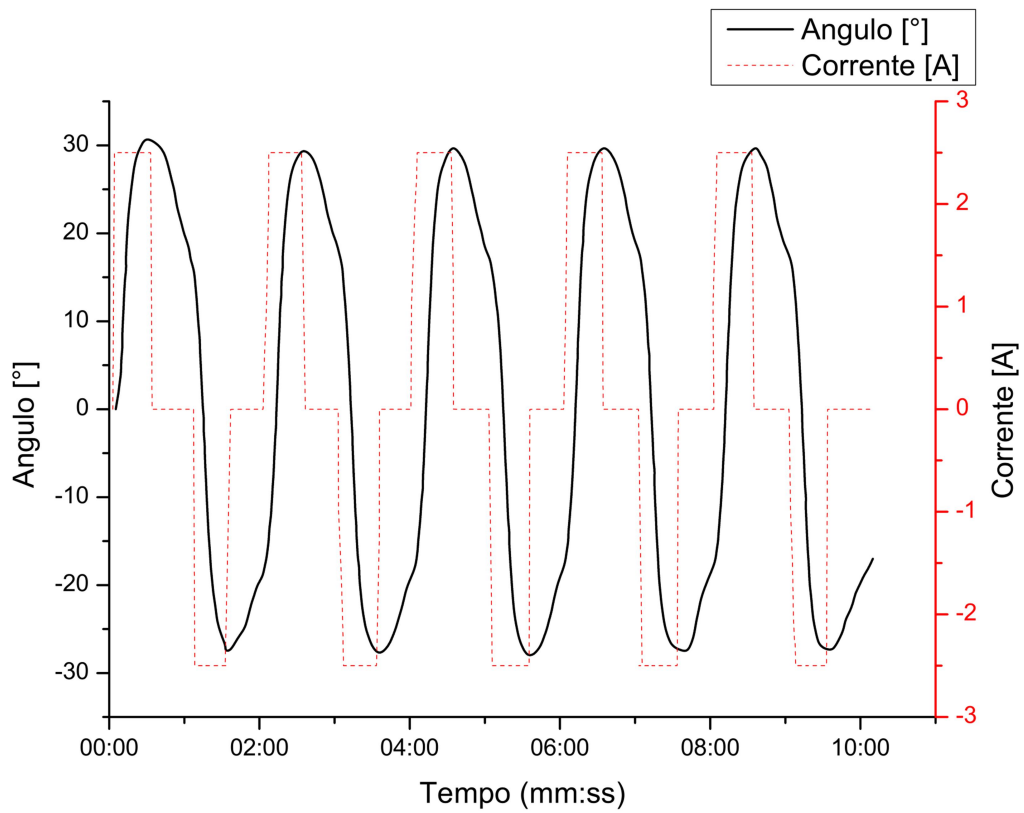


Figura 7-7: Ciclos de dois minutos e máxima corrente de 2,5A.

A figura 7-8 mostra o gráfico resultante do teste de ciclo de cinco minutos e corrente máxima de 2,5A.

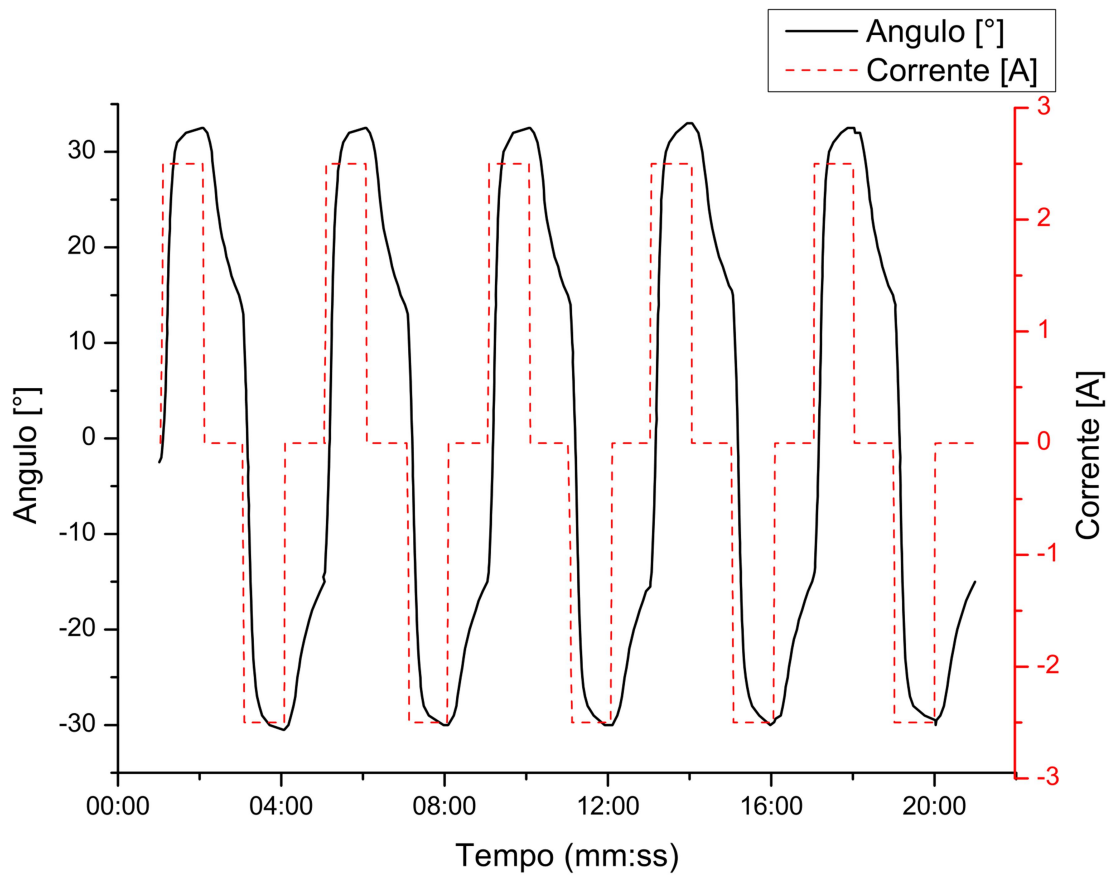


Figura 7-8: Ciclos de quatro minutos e máxima corrente de 2,5A.

Ao analisar os resultados, observa-se que quanto maior o valor da corrente que trespasa a mola SMA, maior é sua contração, e portanto maior o ângulo de movimentação realizado pelo leme. Observa-se também um salto no ângulo alcançado a partir de 2A. A figura 7-9 apresentada a seguir mostra como o ângulo máximo médio variou com relação à corrente, nos testes com ciclo de dois minutos, e nos testes com ciclo de quatro minutos.

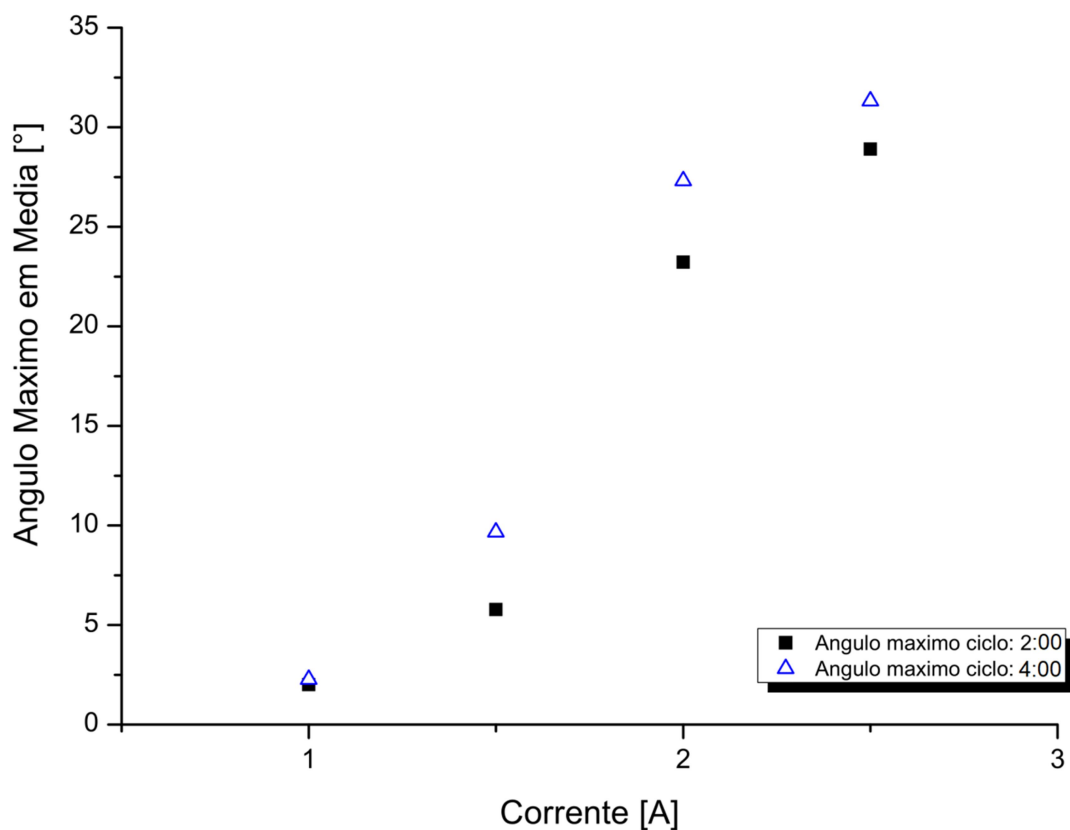


Figura 7-9: Variação do máximo ângulo alcançado com relação à corrente.

É possível também observar que a velocidade com que o leme muda sua posição também varia de acordo com a corrente, chegando ao valor máximo de 3,33°/s no teste com ciclos de 4 minutos e 2,5A.

Estes resultados evidenciam ainda mais a influência da corrente, e por consequência da temperatura na efetividade da ativação de ligas com memória de forma. Recomenda-se portanto que a corrente utilizada na ativação do leme inteligente proposto sempre alcance o máximo suportado pela liga utilizada, respeitando-se as margens de segurança.

Outra análise relevante se faz acerca das durações propostas dos ciclos. Percebe-se que no caso dos ciclos de quatro minutos, a mola previamente ativada passa mais tempo trocando calor com o ambiente do que no caso dos ciclos de dois minutos. Isso faz com que no ciclo mais longo, a mola posteriormente ativada enfrente um menor esforço contrário, e por conseguinte

atinge maior velocidade angular, pois a outra mola SMA resfriou-se a um nível onde há, na sua microestrutura, provavelmente menos austenita do que no caso dos testes de ciclo curto. Porém em situações reais de uso, o movimento do leme será controlado de acordo com as necessidades da embarcação, que pode ser de navegação, atracamento, manobra, etc. Nessas situações, é possível que seja necessária uma mudança brusca da posição do leme, que precisaria variar entre 30 e -30 graus em poucos segundos. Portanto um número maior de testes com ciclos curtos devem ser realizados, e um critério para o tempo de mudança angular em situações reais deve ser estabelecido.

## Capítulo 8

### 8.1 Trabalhos futuros

Este trabalho se propôs fundamentalmente a desenvolver um tipo original de atuador, até mesmo fora do Brasil. Por conta desse ineditismo, pode-se considerar que seu desenvolvimento é ainda muito prematuro e há muito espaço para o aperfeiçoamento da ideia original.

Dentre as diversas possibilidades de melhoria, é importante ressaltar que uma nova versão do leme deve ser desenvolvida. Dessa vez levando-se em conta um modelo prévio de embarcação, de modo que já se tenha estabelecido na fase do projeto quais esforços serão necessários para que as molas SMAs não só movimentem o leme, mas também toda a embarcação, considerando portanto sua massa, e a pressão gerada na face do leme pelo fluxo de água deslocado. Partindo-se disso e das fórmulas aqui apresentadas seria possível então o dimensionamento correto das peças que compuserem esta nova versão do protótipo.

Recomenda-se também o aperfeiçoamento do sistema sensorial utilizado no leme. Principalmente no que tange a medição de sua movimentação angular. Um monitoramento em tempo real é essencial para que o leme cumpra sua função.

A partir do momento em que ambas as sugestões acima propostas sejam executadas, seria de extrema relevância a implantação de um sistema robusto de controle. Que levasse em conta a relação entre a variação das correntes em ambas as molas, e a movimentação concreta do leme. Este sistema poderia, a partir de um conjunto hardware/software especialmente projetado para esta função, tornar o atuador extremamente relevante não só na composição de lemes, mas em qualquer sistema que requira movimentação precisa no sentido horário e anti-horário, como em braços mecânicos ou válvulas de controle. O controle independente da intensidade da corrente em cada mola faria com que qualquer ângulo pudesse ser alcançado, contanto que o mesmo estivesse dentro da faixa possível. Esse controle dispensaria até mesmo a necessidade das molas de aço, tornando-o mais leve e compacto.

## Capítulo 9

### 9.1 Conclusão

O processo de desenvolvimento do modelo experimental do leme proposto revela que ainda há bastante espaço para adaptações e melhorias ainda na fase do projeto, porém alguns pontos deste processo se tornam claros indicadores conclusivos. O primeiro deles se dá na vantagem do uso de molas SMA em detrimento dos fios SMA. O fio SMA pode deformar-se até um limite de 8%, desconsiderando a fadiga, de seu comprimento original, enquanto a mola SMA pode alcançar até 400% de seu comprimento original. Ao comparar as duas opções, observa-se que, por conta das características acima citadas, as molas SMA tem uma maior distância de ativação e ocupa muito menos espaço, fazendo com que o seu uso neste estudo seja recomendado.

Conclui-se também que é essencial um dimensionamento refinado, que se proponha a formular as relações geométricas entre as molas de modo a saber qual o comprimento ótimo de cada elemento. Recomenda-se também que ainda na fase de dimensionamento se defina de maneira criteriosa a relação entre as molas de Aço e SMA para que a possibilidade de uma maior restituição de posição seja desenvolvida, sem perdas efetivas de ativação.

Com relação ao sistema de verificação da posição do leme, verifica-se que apesar do mesmo não ter sido utilizado efetivamente no decorrer do projeto, seu uso é de grande importância não só para a obtenção de dados, mas também para o desenvolvimento futuro de um mecanismo de controle, que possibilite uma interação intuitiva entre usuário e máquina. Portanto avalia-se que o projeto apresenta viabilidade técnica, mas carece de estudos aprofundados com relação ao seu dimensionamento, e ao seu sistema de controle.



## Capítulo 10

### 10.1 Referências Bibliográficas

- BEAUCHAMPS C.H., NADOLINK R.H., DICKINSON S.C., DEAN L.M. “Proceedings I European Conference on Smart Structures And Materials”. SPIE, v.1777 p. 189, 1992
- CINGOLANI E., VAN HUMBEECK J. and AHLERS, M. “Stabilization and Two-Way Shape Memory Effect in Cu-Al-Ni Single Crystals”. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 30(3), pp. 493-499, 1999.
- 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.
- CZECHOWICZ A. and LANGBEIN S. “Shape memory alloy valves: Basics, potentials, design”. *Springer*, 2015.
- 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.
- HUMBEECK J. “Non-medical applications of shape memory alloys”. *Materials Science and Engineering A*, v. 273-275 pp. 134-148, 1999.
- IKUTA K. “Micro/miniature shape memory alloy actuator”. *Robotics and Automation*, 1990. Proceedings., 1990 IEEE international conference, p. 2156-2161, 1990
- JANI J.M., LEARY M., SUBIC A. and GIBSON M.A. “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities”. *Material & Design*, v. 56, pp. 1078-1113, 2014.
- LAGOUDAS, D.C. *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*. Nova Iorque: Springer Science, 2008.
- LESTER B.T., BAXEVANIS T., CHEMISKY Y., LAGOUDAS D.T. “Review and Perspectives: Shape Memory Alloy Composite Systems”. *Acta Mechanica*, v. 226(12), pp. 3907-3960, 2015.
- MATSUNAGA T., MAKISHI W., TOTSU K., ESASHI M., HAGA Y. “2-D and 3-D tactile pin

- display using SMA micro-coil actuator and magnetic latch”. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS'05. The 13th International Conference, v. 1, pp. 325-328, 2005
- 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, T. Análise numérica de diferentes configurações de atuadores com memória de forma, Dissertação de M.Sc., DIPPG CEFET-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017
- RODRIGUE H., WANG W., BHANDARI B., HAN M.W., AHN S.H. “SMA-based smart soft composite structure capable of multiple modes of actuation”. *Composites Part B: Engineering*, v.82 p. 152-158, 2015
- ROMANO, R.; TANNURI, E. A. “Modelagem e validação experimental de um atuador baseado em liga de memória de forma”. *Revista Controle & Automação*, v.19 no.1, pp. 30-42, 2008.
- SATO A., CHISHIMA E., SOMA K. and MORI T. “Shape memory effect in  $\gamma \rightleftharpoons \epsilon$  transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals”. *Acta Metallurgica*,), pp. 1177-1183, 1982.
- 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.
- WILLIAMS E.A., SHAW G. and ELAHINIA M., “Control of an automotive shape memory alloy mirror actuator”. *Mechatronics*, v. 25(5), pp. 527-534, 2010.