

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeto e Controle de um Atuador Linear
Baseado em Par Antagônico de Nitinol

por

Octavio Marcantonio Bortoncello

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto e Controle de um Atuador Linear
Baseado em Par Antagônico de Nitinol

por

Octavio Marcantonio Bortoncello

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**
Orientador: Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Prof. Mario R. Sobczyk S.

Prof. Rafael A.C. Laranja

Porto Alegre, 27, Novembro de 2015.

Agradeço aos meus professores, colegas e técnicos da UFRGS por toda a aprendizagem que tive ao longo desse curso.

Sou muito grato pela orientação do Dr. Eduardo A. Perondi e pela sua paciência com minhas habilidades de redação.

Pelo Professor. Ignácio pela franca troca de ideias.

Pessoal do Lamecc, que me ajudou na construção e melhorias do protótipo.

Agradeço aos meus pais pelo exemplo de ética e por todas oportunidades que me proporcionaram.

Ao Professor Jun Fonseca, exemplo de engenheiro, professor e amigo.

Obrigado, UFRGS!

BORTONCELLO, O.M. **Projeto e Controle de um Atuador Linear Baseado em Par Antagônico de Nitinol**. 2015. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Atuadores lineares são utilizados em diversas áreas da engenharia. Soluções tradicionais como atuadores hidráulicos e motores elétricos, são extensivamente utilizados, entretanto a busca por alternativas mais leves e compactas requer estudo de novos princípios físicos de atuação. Nesse sentido, a capacidade de contração das ligas com memória de forma, apresenta-se promissora. O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um protótipo de atuador linear capaz de exercer trabalho em ambos sentidos, baseado nestes materiais em específico ligas de Nitinol. O trabalho inclui uma revisão do comportamento e métodos de projeto para ligas com memória de forma, construção de um protótipo, instrumentação e implantação de algoritmos de controle. Uma série de experimentos foi conduzida para verificar o comportamento do protótipo e validar o projeto e o controle. Os resultados mostraram valores dentro dos valores esperados a partir do desenvolvimento teórico. Como resultado, verificou-se que o protótipo e seu controlador demonstraram a viabilidade do uso prático do Nitinol como princípio de atuação.

PALAVRAS-CHAVE: (atuadores antagônicos, Nitinol, controle de atuadores lineares)

BORTONCELLO, O.M. **Design and Control of a Linear Actuator Based on a Antagonistic Nitinol Pair**. 2015. 27 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

Linear actuators are utilized in a broad range of engineering applications. Traditional solutions as hydraulic actuators and electric motors are extensively used, however the search for lighter and more compact alternatives requires the study of new physical principles for actuation. Shape Memory Alloy's capacity to contract is a promising motor principle. The objective of this paper is to develop a linear actuator prototype capable of performing work in both directions based on these materials, more specifically in Nitinol alloys. The paper includes: a revision of the behavior and design methodologies for Shape Memory Alloys actuators, prototype build, instrumenting and implementing control algorithms. A series of experiments was conducted to verify the behavior of the prototype and validate the design and controller. The results are within the values obtained with theoretical development. As a result the prototype and its controller demonstrated the practical viability of using Nitinol as an actuating principle.

KEYWORDS: Nitinol, antagonistic linear actuators, control of linear actuator.

Lista de Abreviaturas e Símbolos

SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
OWSM	<i>One Way Shape Memory</i> , Efeito Memória de Forma unidirecional.
TWSM	<i>Two Way Shape Memory</i> , Efeito Memória de Forma bidirecional.
BF	<i>Bias Force</i> .
MCU	Unidade micro controladora, <i>microcontroller unit</i> .
PTFE	Politetrafluoretileno (Teflon)
PI	Controle proporcional integral
Kp	Constante Proporcional do controlador PI
Ki	Constante Integral do controlador Pi
σ_{lim}	Tensão limite para atuação do fio, para utilização cíclica.
σ_{max}	Tensão máxima de atuação do fio.
σ_{reset}	Tensão para restabelecer deformação estado frio.
A_{st}	Área da seção transversal do fio.
d	Diâmetro do fio atuador.
L	Comprimento do fio atuador.
C	Curso de atuação do fio.
ϵ_f	Deformação do fio no estado frio.
ϵ_q	Deformação do fio no estado quente.
$\Delta\epsilon$	Desvio entre deformação de estado frio e estado quente.
E_{aus}	Módulo de Young para fase austenítica.
E_{mart}	Módulo de Young para fase martensítica em sua parcela plástica reversível.
F_{reset}	Força para restabelecer deformação no estado frio, <i>bias force</i> .
F_{liq}	Força líquida que fio é capaz de causar ao contrair.
W_{liq}	Trabalho líquido realizado pelo atuador.
I_{rec}	Corrente recomendada pelo fabricante para acionamento do fio.
P	Potência elétrica para acionar o fio nos parâmetros do fabricante.
R_{aus}	Resistividade do fio na fase austenítica
T	Tempo de contração do fio segundo parametros do fabricante.
η	Eficiência energética do fio.
\bar{m}	Média das medições.
m_n	Medição de número n.
n	Número de medições.
$S_{\bar{m}}$	Desvio padrão estimado.
$I_{\bar{m}}$	Incerteza da medição.
t	Distribuição de <i>Student</i> .
g	Número de graus de liberdade.
I_{pot}	Incerteza de medição do potenciômetro
I_{desl}	Incerteza no resultado do deslocamento.

ÍNDICE

	Pág.
1.INTRODUÇÃO.....	1
2.OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1 Ligas com Memória de Forma.....	1
3.2 Atuadores baseados em SMA.....	3
3.3 Controle de Atuadores baseados em SMA.....	4
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
4.1Equacionamento Básico para Materiais Com Memória de Forma.....	5
4.2 Seleção da Liga Sma.....	7
4.3 Protótipo	8
4.3.1 Sensoriamento, Controle e Atuação.....	9
4.3.2 Estrutura Mecânica.....	10
5. RESULTADOS.....	11
6. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
Apêndice A - Circuito de Aquecimento do Nitinol.....	16
Apêndice B – Resultado de Testes Complementar.....	16
Apêndice C - Discussão sobre Erros e Incertezas	17
Apêndice D – Bancada de Testes	18
Apêndice E - Imagens do Protótipo	19
Anexo.....	20

1. INTRODUÇÃO

Atuadores lineares são dispositivos capazes de fornecer potência mecânica por meio de movimentos lineares. São empregados em automóveis, aeronaves, indústria próteses entre outros. A vasta maioria dos atuadores comerciais são baseadas em conceitos já bem desenvolvidos e tecnicamente dominados, como hidráulica, pneumática e eletromagnetismo.

Entretanto, a necessidade por dispositivos cada vez menores e mais econômicos gerou uma busca por alternativas mais leves e compactas que as soluções oferecidas pelos métodos convencionais de atuação [Jani et. al, 2014]. No setor automotivo, por exemplo, a redução do consumo de combustível é um dos maiores desafios atuais, assim a diminuição da massa dos veículos é, portanto, fundamental pois possui impacto direto sobre o consumo. O emprego de *Shape Memory Alloys* (SMA), materiais que conseguem contrair ao serem aquecidos podendo exercer grandes forças, vem se mostrando promissor. No novo carro esportivo *Corvette*, através do uso de uma dessas ligas (Nitinol), em somente um dos mais de 200 atuadores com potencial de substituição presentes no veículo, houve uma economia de 500 g, prova do potencial dessa tecnologia [General Motors, 2013]. Todavia, não foram encontradas empresas nacionais que desenvolvessem a tecnologia. Ela poderia agregar um novo nicho na área de automação já bem estabelecida no Brasil e em especial no Rio Grande do Sul.

Neste trabalho foi elaborado um projeto e construção de atuador linear utilizando como princípio motor a contração de fios feitos de Nitinol, aquecidos através de efeito Joule. O atuador conta com sensor de posição e controle PI. Espera-se que este protótipo sirva como referência para futuras versões comerciais além de poder ser utilizado como plataforma para desenvolvimento de estratégias de controle avançadas para essa classe de atuadores.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a elaboração de um protótipo de atuador linear antagônico utilizando ligas com memória de forma e controle em malha fechada. A metodologia seguida foi:

- Estudo do comportamento de ligas com memória de forma.
- Dimensionamento de fios atuadores de SMA.
- Seleção de método de sensoriamento e controle eletrônicos.
- Projetar estrutura mecânica e mecanismos que compõem atuador.
- Construção e teste do protótipo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ligas com Memória de Forma

Os materiais com memória de forma, ou *Shape Memory Alloys*, doravante denominados SMA, segundo Kauffmann et alli, 1993, são ligas metálicas que apresentam a capacidade de, após sofrerem uma deformação, reverter a forma original ao serem aquecidas, efeito fruto da facilidade em transitar entre suas duas fases micro estruturais. Descobertas nos anos 70 nos, EUA, inicialmente compostas por Níquel e Titânio, foram genericamente denominadas de Nitinol - *Nickel Titanium Naval Ordinance Laboratory*, em homenagem ao laboratório onde ocorreram as pesquisas iniciais. Por se tratar de um material de comportamento atípico, uma introdução, com enfoque nos aspectos mais relevantes ao projeto de atuadores é importante.

Segundo Wayman e Dwerig, 1990, o efeito de memória de forma é consequência de uma transformação martensítica cristalograficamente reversível que ocorre no estado sólido. A martensita, fase de menor simetria, permite a acomodação de sua rede cristalina de diversas formas quando deformada, já, a austenita, devido à sua maior simetria, é restrita a uma única forma. Durante a transformação da fase martensítica para a austenítica, a diferença entre essas

restrições causa o realinhamento da microestrutura, dando origem ao fenômeno da memória de forma, ver anexo Figura 1. A curva deformação tensão da martensita, Figura 3.1a, não é como a de materiais elásticos convencionais. A baixas deformações, o comportamento é elástico até ocorrer uma acentuada redução do módulo de Young que marca o início das deformações plásticas reversíveis. Após um certo nível de deformação apresenta comportamento elástico convencional.

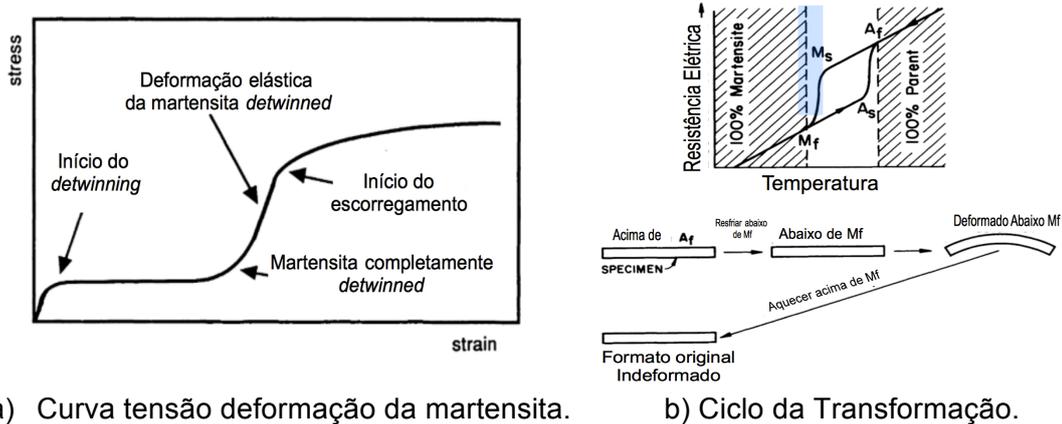


Figura 3.1. Comportamento SMA (Fonte: *Engineering aspects of Shape Memory Alloys*).

Ainda, segundo os mesmos autores, a capacidade limitada da martensita de sofrer deformações plásticas preservando os vínculos atômicos originais da matriz austenítica (ou acomodação por *detwinning*) faz com que deformações da ordem de 7% a 10% sejam reversíveis. Uma vez que o *detwinning* satura, as deformações subsequentes se tornam irreversíveis, fenômeno conhecido por *amnesia strain* [Proft e Dwerig, 1990]. Observado por diversos autores [Duerig et alii, 1990; Dynalloy, 2014], a fadiga dos SMA degrada significativamente a performance do material. O incremento de amnesia a cada ciclo, denominado de *walking*, é inevitável, no entanto, pode ser significativamente amenizado ao se limitar a deformação máxima a 4%.

Um fio de Nitinol em estado martensítico pode ser deformado plasticamente sob tração e, ao ser aquecido até transformar-se em austenita, retornar à forma original indeformada. Ele permanecerá dessa maneira mesmo quando, ao resfriar, tornar-se martensítico novamente, conforme ilustra a Figura 1.b. Este é o aspecto que caracteriza o que se chama de *One Way Shape Memory – OWSM*, ou efeito memória unidirecional, que reza que o material só possui memória da sua forma austenítica. Assim, para que o fenômeno de retorno ocorra, é necessário deformá-lo em seu estado martensítico através de uma força externa, conhecida na literatura como *bias force*, **BF** [Wayman e Duerig, 1990 ; Dynalloy, 2014].

É possível, através de processamento da liga e também do uso cíclico, que o material exiba *Two Way Shape Memory (TWSM)*, que é uma memória de forma bidirecional caracterizada pela capacidade de o material esfriado retornar a uma forma específica sem necessitar de uma força externa [Perkins e Hodgson, 1990]. Os autores ainda afirmam que o TWSM apresenta deformações menores do que as possíveis através de OWSM.

A transformação martensítica, segundo Wayman e Dwerig, 1990, é do tipo estado sólido atemporal, dependente somente da temperatura e não do tempo. Além disso, os autores informam que há um alto grau de histerese associado à transformação e coexistência de austenita e martensita em uma faixa de temperatura. O ciclo de transformação pode ser dividido em aquecimento e resfriamento, com curvas características de deformação *versus* temperatura distintas. Portanto, é geralmente descrito por meio de quatro temperaturas características: A_i (início da austenitização), A_f (*fim da austenitização*), M_i (*início da transformação martensítica*) e M_f (*fim da transformação martensítica*), como exibido na Figura

3.1b. A transformação da martensita para austenita, que ocorre ao se elevar a temperatura do material, inicia na temperatura A_i e progride até ultrapassar A_f . Após este ponto, o material só apresentará fase austenítica. A transformação martensítica, por sua vez, inicia quando o material, ao resfriar, alcança a temperatura M_i , menor que A_f , mas mais elevada que A_i , e termina ao chegar no ponto M_f , a temperatura mais baixa dentre as quatro, e abaixo da qual o material só possuirá estrutura martensítica. Segundo Duerig et alli, 1990, a velocidade de atuação do dispositivo é então limitada pela capacidade de aquecer e resfriar o elemento, e, no caso de aquecimento por efeito Joule, maneira predominante de ativar o elemento em atuadores, depende somente da intensidade corrente elétrica que é possível fornecer de maneira prática, e a taxa de resfriamento do fio quando desligado. A relação entre o progresso da transformação e a temperatura pode ser afetada pela tensão elétrica aplicada à liga durante o aquecimento e resfriamento.

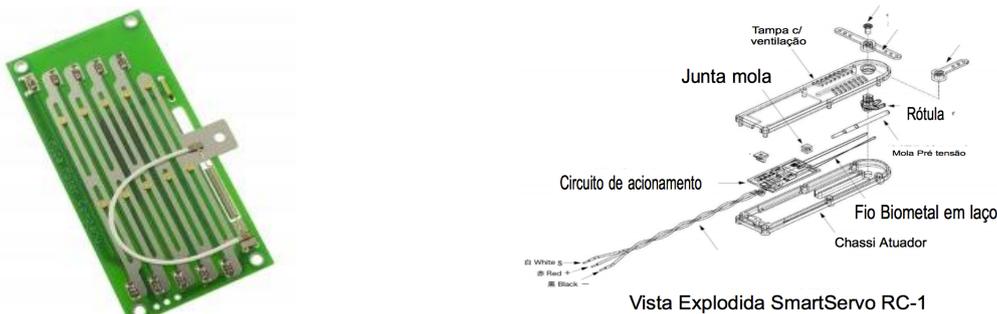
Wayman e Dwerig, 1990, observaram diferenças entre quase todas as macro propriedades da austenita e martensita, sendo o módulo de Young o que apresenta maior variação, sendo que, a austenita é aproximadamente três vezes mais rígida que a martensita em ligas comerciais. Como a tensão necessária para alongar a martensita é significativamente menor do que a gerada pela austenita ao retornar a forma original, é possível extrair trabalho líquido do ciclo. A resistividade elétrica também varia e pode ser usada para medir o progresso da transformação, possibilitando usar esse princípio em sensoriamento, como, por exemplo, o fazem Teh et alli 2008, e Ikuta, 1988, na implantação de controladores PID (controle Proporcional, Integral e Derivativo).

3.2 Atuadores baseados em SMA

Atuadores que utilizam SMA e são aquecidos por efeito Joule podem ser divididos em duas categorias, dependendo da natureza de sua *força de recuperação* (ou *BF - Bias Force*): atuadores de simples ação e atuadores de dupla ação (ou antagônicos). Atuadores de simples ação utilizam a contração do elemento SMA para o movimento em um sentido enquanto um dispositivo externo, geralmente uma mola ou uma massa, fornece a força responsável pelo movimento de retorno, recuperando o comprimento do elemento de SMA para que o mesmo seja capaz de contrair novamente. Como a *BF* deve ser menor que a força gerada pelo SMA, esse tipo de atuador apresenta a limitação de poder exercer trabalho apenas em um sentido. Existem diversos modelos comerciais de pequeno porte deste tipo de atuador. Dentre eles, o *MigaOne®*, da *MigaMotors*, Figura 2.a, que utiliza uma mola como elemento de fornecimento de *força de recuperação*, possui tamanho compacto e consegue exercer forças maiores que 80 vezes seu peso próprio peso [*MigaMotors*, 2014].

Atuadores antagônicos utilizam dois elementos de SMA justapostos de forma análoga à disposição de músculos como bíceps e tríceps. Essa configuração permite que um elemento tencione o outro e, ao mesmo tempo, exerça trabalho líquido em ambos sentidos. Outras vantagens desta configuração são a redução da histerese [Ikuta, 1998], o aumento da frequência máxima de atuação [Jani et al., 2014] e a possibilidade de controle da rigidez do atuador [Odhner et alli, 2010]. Em termos de pesquisa, essa configuração é muito utilizada em protótipos de próteses. No entanto, a única aplicação comercial encontrada foi o micro servo atuador *SmartServoRC-1¹* da empresa Toki.

¹ Site da Toki: <http://www.toki.co.jp/biometal/products/rc-1/RC-1.php>



a) Atuador linear de simples ação *MigaOne*® b) Atuador antagonístico *SmartServo* (Fonte: Toki)

Figura 2. Atuadores SMA comerciais.

Pesquisas recentes indicam que atuadores baseados em ligas com memória de forma se apresentam como alternativas para dispositivos convencionais, principalmente por oferecerem maiores capacidade de trabalho por volume e por massa – com relação à extensa gama de atuadores disponíveis comercialmente, ligas de Nitinol possuem uma das mais elevadas densidade de trabalho, na faixa de 10 J/cm^3 , o que é 25 vezes superior à densidade de trabalho usual de motores elétricos, sendo capaz de erguer 100 vezes o seu peso próprio. Baixa complexidade mecânica, custo reduzido e operação silenciosa apresentam-se também como vantagens do uso de SMA [Leary et al., 2014].

Entretanto, segundo [Leary et al., 2014], materiais SMA ainda apresentam diversas limitações, destacando-se dentre elas a baixa deformação útil, baixa frequência de atuação relativamente às principais tecnologias de atuadores (elétrica, hidráulica e pneumática), dificuldade de controle, baixa precisão e eficiência energética. Anadon, 2002, em estudo sobre atuadores de médio porte usando SMA, apresentou limitações práticas da utilização do Nitinol para aplicações com forças elevadas (320 N), como baixa eficiência, e conseqüentemente, necessidade de elevada potência para atuação. Teh e Featherstone, 2010, com seu protótipo de atuador antagonístico, demonstram que, apesar da eficiência citada pelo fornecedor do material (*Dynalloy*) ser de 8%, na prática a mesma aproximou-se de 1%. Segundo Duerig, et alli, 1990, esse resultado é esperado de todos atuadores baseados em Nitinol projetados para elevado número de ciclos, uma vez que a deformação é deliberadamente limitada, a custo de eficiência energética visando a evitar ocorrência de fadiga e degradação da performance do material, como citado anteriormente na Seção 3.1.

Assim, como vantagens dos SMA tem-se: alta densidade de potência; relação peso/potência; operação silenciosa; fácil operação liga-desliga e baixo custo. As principais desvantagens são: baixa eficiência energética (próxima de 1%); o controle de força e posição é complexo, sendo raramente encontrado em aplicações comerciais; a possibilidade de o desempenho degradar significativamente com uso; o fato de requerer controle de refrigeração para aumentar a frequência de atuação.

3.3 Controle de Atuadores baseados em SMA

Um dos maiores desafios da utilização de ligas como o Nitinol para atuação é o controle das mesmas devido ao alto grau de histerese e à alta sensibilidade a fatores externos, como perturbações térmicas e de carga. Como a maioria dos atuadores SMA é acionada por efeito Joule, será adotada também essa estratégia no presente trabalho e uma breve revisão de técnicas usualmente adotadas para estes sistemas será apresentada a seguir.

Para controlar os materiais com memória, uma das estratégias empregadas inicialmente baseava-se no acionamento liga-desliga de maneira sequencial de elementos em série para controle discreto de posição. Apesar de robusto, este método requer uma construção mecânica

relativamente complexa e possui resolução limitada. Uma estratégia muito estudada de controle, é por meio do uso de controlador PID (com ações proporcional + integral + derivativa) indireto da posição e rigidez através de realimentação da resistividade de cada elemento, que, como citado na Seção 3.1, varia com o progresso da transformação. Essa estratégia faz uso da característica de possibilidade de uso do próprio elemento SMA como sensor. Este método, entretanto, não é capaz de compensar possível alongamento permanente do fio em função uso cíclico [Wang et al, 2015]. Subsequentemente, foi empregado controle PID com realimentação de posição por sensores externos (LVDT e sensores laser), e com realimentação da resistividade para permitir altas taxas de aquecimento sem risco de superaquecimento, isso permitiu redução significativa do tempo de atuação [Teh, 2010].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Equacionamento Básico para Materiais Com Memória de Forma

Teoricamente materiais com memória de forma podem ser condicionados a assumir qualquer forma que o projetista desejar [Anadon, 2002]. Entretanto, ao revisar a literatura e pesquisar sobre os atuadores disponíveis no mercado, percebe-se a predominância de ofertas nas formas de fio, fita e de mola helicoidal. Estes formatos dominam a produção em massa e os tornam acessíveis, relativamente baratos, e com comportamento mais previsível a partir da análise de *datasheets*. Anadon, 2002, mostra que a forma de fio é mais eficiente sob o ponto de vista de trabalho útil, tendo sido este, portanto, o formato escolhido para utilização no protótipo. Além disso foi empregada no presente estudo a metodologia proposta por Waram, 1993 (utilizada com sucesso por Anadon, 2002). A partir da qual uma planilha eletrônica foi elaborada, usando o equacionamento proposto por Waram, 1993, para cálculo automático das características do atuador, resumo dos resultados obtidos estão disponíveis na Tabela 4.1.

O método assume que o fio apresenta somente OWSM; relação linear entre tensão e deformação na faixa de temperatura operacional (entre M_f e A_f); e força e curso são os parâmetros de projeto do atuador.

A seguir, são descritos os procedimentos adotados para o dimensionamento do atuador. A força limite do atuador e sua área de seção transversal podem ser relacionadas através da tensão normal:

$$\sigma_{lim} = \frac{F_{lim}}{A_{st}}, \quad (4.1)$$

assim, a força limite F_{lim} para um fio com uma dada seção transversal A_{st} é obtida selecionando a tensão normal limite, σ_{lim} , à qual o fio poderá ser submetido. A tensão normal limite é função do material e do número de ciclos ao qual o atuador será submetido. Assim quanto maior o número de ciclos esperado, menor a tensão limite. Fabricantes de SMA geralmente fornecem dados sobre relação tensão e vida útil. Já, a força máxima que o fio atuador pode exercer segue a mesma relação mas depende de σ_{max} (tensão máxima que o material pode suportar ao retornar), sem visar a mais de uma atuação. Como o atuador a ser projetado visa a ser acionado um número significativo de vezes, a tensão e força máxima serão desconsideradas para fins de projeto.

Como o fio possui seção transversal circular, pode-se substituir o termo A_{st} pela equação da área de um círculo em função do diâmetro, d , na Equação 4.1 e resolver para d :

$$d = \sqrt{\frac{4F_{lim}}{\pi\sigma_{lim}}}. \quad (4.2)$$

O comprimento necessário de fio é obtido pela relação:

$$L = \frac{C}{\Delta\varepsilon}, \quad (4.3)$$

onde,

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_f - \varepsilon_q, \quad (4.4)$$

L representa o comprimento do fio em seu estado indeformado, C é o curso esperado para movimento do atuador, $\Delta\varepsilon$ é desvio entre a deformação ε_q do estado “quente” (com temperatura acima de Af e inteiramente austenítico) e a deformação de estado “frio” ε_f (puramente martensítico, abaixo de Mf). O valor de ε_f é um valor de entrada que deve ser obtido por meio do fornecedor do material e corresponde à deformação recuperável que pode ser obtida visando a permitir o uso cíclico do material. Empregando a Lei de Hooke, encontra-se a deformação no estado quente ε_q :

$$\varepsilon_q = \frac{\sigma_{lim}}{E_{aus}}, \quad (4.5)$$

sendo, E_{aus} o módulo de Young da Austenita. Através da Lei de Hooke pode-se então obter a tensão para restabelecer a deformação necessária no fio no estado martensítico:

$$\sigma_{reset} = \varepsilon_f E_{mart}, \quad (4.6)$$

onde σ_{reset} é a tensão para restabelecer a deformação necessária para que o fio contraia ao aquecer e E_{mart} é o módulo de Young da fase martensítica em sua parcela plástica reversível. A força F_{reset} para restabelecer o fio (*bias force*) necessária é:

$$F_{reset} = \sigma_{reset} A_{st}. \quad (4.7)$$

A força líquida F_{liq} que o fio atuador será capaz de exercer ao retornar à forma original é:

$$F_{liq} = F_{lim} - F_{reset}. \quad (4.8)$$

Sendo, então, o trabalho líquido que o fio é capaz de realizar ao contrair W_{liq} é expresso por:

$$W_{liq} = F_{liq} C. \quad (4.9)$$

Como o atuador deve ser aquecido por efeito Joule para que contraia, é preciso determinar a potência elétrica necessária para que a temperatura Af seja atingida. Neste trabalho não foi analisado o comportamento termodinâmico do fio, sendo utilizado como parâmetro de entrada a corrente de ativação I_{rec} para temperatura padrão e convecção natural recomendada pelos fabricantes para cada diâmetro. Pela lei de Ohm:

$$P = I_{rec}^2 R \quad (4.10)$$

e

$$V = I_{rec} R, \quad (4.11)$$

na qual P é a potência necessária para atuação completa do fio. Sabe-se que a resistividade do Nitinol varia entre as fases. É usual, entretanto, utilizar-se o valor da resistência linear R ,

fornecida pelos fabricantes, a qual representa um valor médio [Dynalloy, 2014]. No projeto visa-se usualmente, a aplicar uma diferença de potencial nos extremos do fio, de forma a gerar a corrente recomendada. A eficiência do fio atuador é expressa por [Duerig et alli, 1990]:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{T} / P, \quad (4.12)$$

onde o termo η representa a relação entre a potência elétrica P que entra no fio e a potência mecânica que o mesmo exerce, obtida aqui por meio da divisão do trabalho líquido pelo tempo de contração T .

4.2 Seleção da liga SMA:

Entre as diversas ligas que possuem efeito memória: Cobre-Alumínio-Níquel, Níquel-Alumínio, Manganês-Cobre, as mais frequentemente encontradas no mercado são variações do tradicional Nitinol. Isto se deve à sua melhor ductilidade, maiores deformações recuperáveis, resistência a corrosão, biocompatibilidade e capacidade de aquecimento por efeito Joule [Pons, 2007]. Existem diversos fabricantes com formulações específicas e proprietárias, inclusive com nomes comerciais registrados. Essas ligas variam na proporção entre níquel e titânio e na maneira da qual são processadas para conferir seu formato final, podendo apresentar diferenças comportamentais significativas.

Dois fabricantes foram selecionados por três fatores: disponibilidade de compra em pequenas quantidades, extenso uso dos seus materiais em outras aplicações de atuadores e disponibilidade de *datasheets* com informações úteis. São eles a *Dynalloy Inc*, sediada nos Estados Unidos, e a nipônica *Toki*, com seus respectivos *Flexinol*® e *Biometal*®, ambos disponíveis em forma de fio ou mola helicoidal.

Tabela 4.1- Tabela comparativa entre *Flexinol*® e *Biometal*® (*Dynalloy, 2014*, e *Toki, 2010*).

Material	Unidade	Flexinol® HT	Biometal®
Diâmetro nominal	mm	0,15	0,15
Corrente recom. Contração @ 1s	mA	400	340
Potência ativação	W	9,24	7,05
Tensão limite para vida cíclica	MPa	138	80
Contração limite recom. p/ útil cíclica	%	4%	4%
Tensão para alongamento 4%	Mpa	69	0
Força máxima para utilização cíclica	N	2,439	1,414
Força líquida par antagonico	N	1,219	1,414
Trabalho líquido	J/m	0,049	0,057
Potência @ 1s atuação	W/m	0,049	0,057
Eficiência	%	0,05	0,081
Preço ² US\$/m até 99m	US\$/m	4,5	17,9
Relação Potência por Custo	W/US\$	0,011	0,003

O *Biometal*®, segundo a Toki, 2010, é um fio formulado especificamente para aplicações como atuador, estruturado anisotropicamente por um processo de fabricação proprietário a partir de uma liga de Ti-Ni. Em seu catálogo, a Toki afirma que, além de contrair quando aquecido (4% para uso cíclico), seu material alonga quando resfriado abaixo da

² Preços obtidos nas tabelas disponíveis nos sites dos fabricantes:
http://www.toki.co.jp/biometal/download/downloadfiles/BM_Price_list_1404HP.pdf
http://www.dynalloy.com/flexwire_70_90.php

temperatura de transformação, o que caracteriza uma espécie de efeito memória bidirecional, não necessitando, portanto, de uma força de retorno, diferentemente do *Flexinol*®, o que pode ser vantajoso.

Fabricado nos EUA, o *Flexinol*® tem como vantagem uma maior força máxima para um mesmo diâmetro quando comparado com o produto da Toki, como pode ser visto na Tabela 4.1. Entretanto, exige força de retorno externa para se alongar após resfriamento. No manual da Dynalloy é informado que, se nenhuma força for exercida enquanto o fio esfria, muito pouca deformação ou alongamento irá ocorrer no estado frio à temperatura ambiente, e, conseqüentemente, muito pouca contração irá ocorrer quando aquecido. Essa diferença é sutil mas importante, pois impossibilita uma comparação direta entre a força máxima dos dois materiais, no caso de se desejar maior capacidade de trabalho útil do atuador, sendo necessário, portanto, comparar a força líquida disponível em conjunto com a contração limite. A deformação máxima recomendável para uso cíclico é semelhante também na faixa de 3 a 4%. O *Flexinol* possui preço menor, fornecendo, portanto, uma relação trabalho por custo 360% superior à do material da Toki, apesar da menor capacidade de trabalho líquida do par antagônico.

Para decidir qual material empregar no protótipo foi considerado também um estudo comparativo entre amostras de diâmetro de 0,15 milímetros realizado por Daudpoto et alii, 2013. Esse estudo conclui que, para aplicações cíclicas, o comportamento do *Flexinol* é mais regular, apresentando menos degradação por fadiga que seu competidor. Optou-se, portanto, pelo uso do *Flexinol* HT de diâmetro 0,15 mm, por apresentar baixo tempo de resfriamento e, segundo seu manual, não sofrer risco de superaquecimento com a corrente recomendada, diferentemente do caso de uso de diâmetros maiores.

4.3 Protótipo

O atuador a ser projetado deve atender aos seguintes requisitos: executar movimento linear; realizar trabalho em ambos sentidos; possuir controle da posição; permitir fácil substituição dos fios atuadores; e ser portátil, com conceito que possa ser miniaturizado.

4.3.1 Sensoriamento, Controle e Atuação

Após ser definido o uso de *Flexinol 150HT*, com diâmetro de 0,15 mm, foi realizada a especificação do sistema da realimentação da posição e de controle, pois estes fatores determinam as demais características do sistema.

Foi escolhido o potenciômetro de membrana modelo *SoftPot*, com resistência variável de 1000 a 10 mil Ω e curso de 50 mm. Como pode ser visto na Figura 4.1a, o sensor é composto por uma camada inferior resistiva (resistor) e no seu topo há uma camada flexível condutiva (coletor), enquanto que um espaçador posicionado entre as camadas mantém o circuito aberto. Quando a força é aplicada à superfície superior, o coletor flete de forma que ocorra um contato entre as duas camadas, fechando o circuito. O ponto onde o contato acontece determina a resistência do potenciômetro. Como o comportamento do potenciômetro é linear, pode ser determinada a posição do ponto de contato pois esta é proporcional ao desbalanceamento da ponte formada pelo conjunto das resistências. A resolução deste tipo de sensor é teoricamente infinita, dependendo das características construtivas da ponteira utilizada, [SpectraSymbol, 2015]. Resumo dados técnicos do potenciômetro disponível na Tabela 1 no Anexo.

Este dispositivo oferece vantagens significativas sobre os potenciômetros tradicionais: não possui partes móveis além da ponteira; a espessura de aproximadamente 0,5 mm permite que seja incorporado em atuadores extremamente compactos; e consome menos energia mecânica que os potenciômetros convencionais, pois oferece menor resistência ao movimento.



Figura 4.1- Potenciômetro utilizado para obtenção da posição do atuador. (Spectra Symbol, “Membrane Potentiometer Datasheet”, 2015)

O controle do acionamento dos fios atuadores e leitura do potenciômetro é realizada por um micro controlador, MCU, Atmel Atmega328, composto por uma unidade microprocessadora de 8 bits operando a uma frequência de 16 MHz, um módulo interno 32k *bytes* de memória programável tipo *Flash* para armazenagem de instruções de programa (além de diversos outros subsistemas embarcados). O chip é incorporado a uma placa ArduinoUno R2. Arduino é o nome de um projeto *opensource* de desenvolvimento de hardware e software para plataformas micro controladas dedicadas à interação com o mundo físico. A placa contém todo hardware periférico necessário para utilização do micro controlador, incluindo uma porta USB para programação e comunicação serial com um PC durante uso. O desenvolvimento do software e a programação do MCU se dá através do Arduino IDE, software, que contém bibliotecas de funções padrões e permite utilização de outras desenvolvidas por terceiros, proporcionando maior facilidade e rapidez para programar [Bergmuller, 2015].

O Atmega328 possui um conversor analógico digital, *ADC*, com resolução de até 10 bits [Atmel,2014]. O ADC lê o valor analógico do sinal, compara com valores de referência internos de máximo e mínimo, e o converte a um valor inteiro de 0 a 1023. O resultado prático no caso do sensor SoftPot de 50mm é uma resolução de 0,048mm.

Para reduzir o risco de choque elétrico e permitir que o atuador possa ser futuramente testado com baterias, a tensão máxima de projeto foi limitada a 12 V, fornecida por uma fonte estabilizada de tensão fixa. Através da Equação 4.11 e da resistência linear do fio encontra-se um valor do comprimento máximo de 600 mm de cada fio atuador para alcançar a corrente elétrica recomendada de 400 mA, ao ser alimentado pela fonte de 12 V. O aquecimento do fio se dá por um circuito baseado em transistores de efeito de campo, Mosfet, controlados através de modulação de largura de pulso PWM, mais informações no Apêndice A.

Dois alternativas de controle foram consideradas: malha aberta e malha fechada com controlador proporcional integral, PI. O controle em malha aberta foi descartado após testes de repetibilidade indicarem que apresentaria resultados pouco satisfatórios e elevado tempo de atuação (ver Capítulo 5). O controle PI foi implementado diretamente no MPU, usando método de integração de Euler, sendo o passo de integração o intervalo de tempo medido entre cada execução do laço de controle. O controlador avalia se o desvio da referência é positivo ou negativo para determinar qual fio deve acionar. O fio antagonico é desligado para reduzir tempo de atuação. Um bloco de saturação limita o sinal de atuação um *duty cycle* de 87% para evitar que a rápida atuação de um fio possa sobre tencionar o antagonico durante resfriamento. Um sistema *anti-windup* “zera” o termo integral após um número pré-definido de execuções do laço. Valores de constantes K_i e K_p foram determinadas de maneira heurística.

Um pequeno programa foi elaborado em *Processing*, um software e linguagem de programação com foco em visualização gráfica, foi elaborado para comunicar com o MPU. Este responsável por armazenar os valores obtidos durante os ensaios com o atuador e exibi-los em tempo real, ver (Apêndice C).

4.3.2 Estrutura Mecânica

Mecanismos foram estudados a fim de colocar os 600mm de cada fio em um chassi compacto. A princípio, uma das possibilidades mais promissoras consistia no emprego de alavancas similares às usadas no protótipo de Kennedy, 2013. Elas permitem que diversos segmentos de fio paralelos atuem mecanicamente em série, equivalendo a um longo fio. Possui vantagem de não flexionar o fio, mantendo-o em estado de tração pura. Entretanto, foi descartada por conta do número de peças móveis necessárias e pela dificuldade para ancorar os fios nas alavancas. Polias fixas foram então escolhidas, valendo-se de um sistema que pode ser reproduzido em dimensões reduzidas e de baixo custo. Além disso deve apresentar facilidade de substituição dos fios. Segundo Peirs et alii, 1997, a configuração geométrica adotada apresenta eficiência muito similar à de polias com rolamentos.

O Flexinol 150 possui um raio mínimo de curvatura de 7,5 mm, assim, as polias foram construídas com raio de 9,5 mm. Feitas de Politetrafluoretileno (PTFE, Teflon), resistem ao aquecimento gerado pelo fio, possuem elevada constante dielétrica, sua baixa condutividade térmica evita interferência significativa no comportamento do fio, e o também baixo coeficiente de atrito permite o deslizamento do fio, o qual ocorre porque a polia é configurada de forma que a mesma não possa girar.

Como pode ser visto na Figura 4.2 o chassi consiste de dois mancais unidos por uma chapa na face inferior. Buchas de PTFE guiam o eixo do atuador, com ajuste deslizante (H7-g6) garantindo movimento com baixo atrito e pequenas folgas. Duas polias fixas são dispostas no eixo para transferir as forças do fio ao mesmo, uma para o fio A e outra para o fio B. Em ambos mancais há, em um dos lados, dois furos para a fixação do dispositivo de ancoragem das extremidades do fio atuador, enquanto que do outro lado do mesmo mancal existem duas polias fixas embutidas também de PTFE. Os mancais são montados de maneira espelhada, completando os traçados antagônicos dos fios atuadores. Um fio é responsável pelo avanço e outro pelo recuo do eixo. Quando o fio A, por exemplo, é aquecido através da passagem de corrente, ele contrai causando avanço do eixo e simultaneamente alongando o fio B, para que quando este, por sua vez, for aquecido seja capaz de contrair recuando o eixo, Figura 4.3.

Como afirma Kennedy, 2013, a camada de óxido de titânio que cobre o fio não possui constante dielétrica suficiente para evitar condução a baixas tensões elétricas. O chassi, portanto, seria inicialmente construído com *Medium-Density Fiberboard*, MDF, para evitar risco de curtos-circuitos, porém por disponibilidade e boa usinabilidade, optou-se pelo uso de alumínio e aplicação de uma película isolante em pontos onde contato com fio poderiam ocorrer.

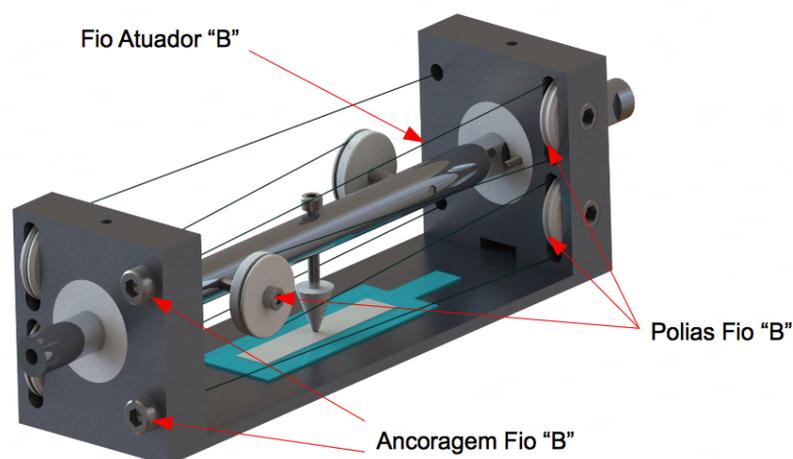


Fig.4.2- Modelo sólido “renderizado” do conceito final.

Os dispositivos de ancoragem dos fios originalmente eram constituídos por parafusos M5 com furos na direção axial de 2mm de diâmetro. O fio atuador passava pelo furo e era conectado ao cabo do circuito de potência ao ser prensado por um conjunto parafuso e porca M2, que travava o fio ao não passar através do furo no parafuso M5. A tensão inicial no fio poderia ser ajustada com posicionamento do M5. Esse conceito foi, no entanto, abandonado após testes iniciais apontarem que os fios alongavam espontaneamente ao esfriar (TWSM) e, conseqüentemente escapavam das polias (mais informação na Seção 5.1). O segundo sistema foi concebido substituindo o parafuso M5 por um corpo de rebite (atuando como eixo deslizante) e uma mola helicoidal, a fim de manter o fio sempre sobre uma tensão mínima.

Neste trabalho preliminar, não foram contemplados estudos visando a obter um produto comercial a partir do protótipo elaborado, portanto não houve preocupação em otimizar a estrutura. O objetivo era compreender o funcionamento do Nitinol para atuação. Porém alguns pontos nesse sentido podem ser destacados: o design permitiu inserir fios de 645 mm de comprimento em envelopes de 170mm por 50 mm por 5 mm (considerando a ancoragem). As polias geram uma relação mecânica de 2:1 entre os fios e o eixo do atuador, resultando em um curso esperado de 10,56 mm para o eixo considerando uma contração de máxima de 4% do fio (Equação 4.3). A força líquida do atuador é de 2,44 N, obtendo se então uma potência máxima de 0,03 W considerando tempo de contração de 1 s informado pela Dynalloy, 2014. Fotos do protótipo construído estão disponíveis no Apêndice E. A Figura 4.3 mostra as dimensões principais do dispositivo.

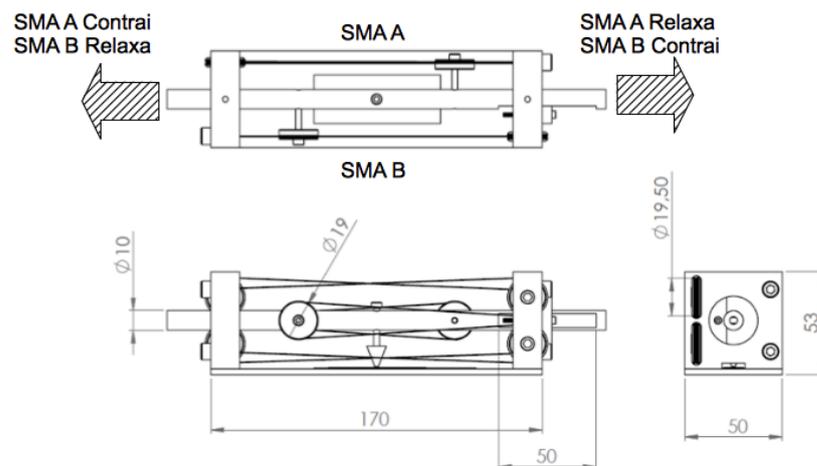


Figura 4.3- Projeto Final do Atuador.

5. Resultados

O curso máximo do atuador medido operando sem carga externa atingiu 10,60 +/- 0,042 mm, 100,4% do esperado, sendo que, o valor esperado está dentro da faixa de incerteza de medição (para informações sobre incertezas ver Apêndice C). O atuador foi submetido a um teste de baixo número de ciclos (21 ciclos) com 90% da carga máxima (2,189 N) no qual não demonstrou redução da amplitude de atuação, um teste com maior número de ciclos deve ser realizado para validar a carga máxima para operação com vida útil extensa. Conclui-se então que os resultados obtidos comprovam o método de projeto utilizado. Entretanto, é importante citar que, logo após os testes iniciais os fios apresentaram TWSM, alongando espontaneamente ao resfriar, isso pode ter o efeito benéfico de reduzir a força de retorno necessária aumentando a carga máxima do atuador. O sistema de ancoragem e tensionamento teve de ser modificado como descrito no Capítulo 4.. Teh, 2008, menciona o surgimento desse fenômeno em seu

atuador e o compensa através de controle ativo da tensão mínima dentro de seu controlador PID.

Para visualizar a relação tensão deslocamento durante a contração foi realizado aquecimento progressivo dos elementos e medição da posição através do potenciômetro, os incrementos de tensão foram os menores possíveis para obter boa resolução da curva (0,012 V, ver Apêndice A), sendo arbitrado um intervalo de 8 segundos entre cada passo para permitir estabilização da temperatura do fio. Deslocamentos foram normalizados usando o curso máximo obtido no teste. A acentuada variação da posição entre 4,5 e 5,5 V era esperada, uma vez que A_i e A_f (temperaturas que delimitam a austenitização) são próximas. A alta sensibilidade nesta região da transformação justifica a escolha por maior resolução no controle PWM (ver Apêndice A). Dados não foram tratados antes da plotagem (Figura 5.1a) afim de demonstrar o comportamento sistema de medição de posição, que funcionou como esperado, com a exceção de alguns pontos espúrios na leitura.

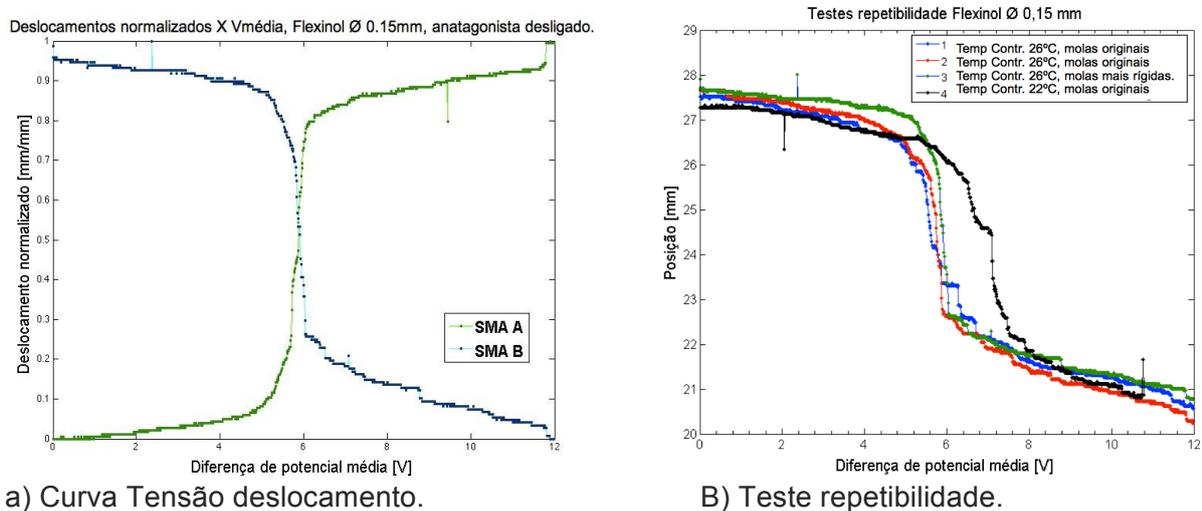
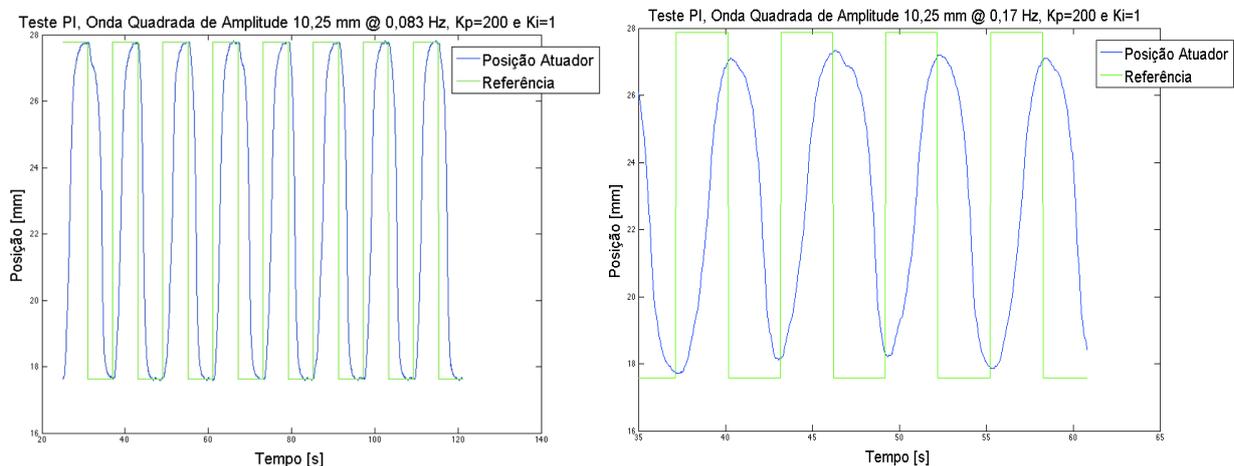


Figura-5.1 Testes em malha aberta.

O segundo teste foi elaborado para observar a repetibilidade do movimento do fio com a finalidade de avaliar potencial do controle de posição em malha aberta. O protocolo de rampa foi executado 4 vezes somente para o fio B afim de verificar a estabilidade da relação entre posição do atuador e tensão elétrica imposta no fio. As primeiras três passagens foram realizadas em ambiente de temperatura de 26°C no início do primeiro teste. Para a terceira foram utilizadas molas com uma espira a mais para reduzir folgas nos fios. A quarta execução foi realizada com temperatura ambiente controlada a 22°C e molas originais. Entre cada teste foi realizado um intervalo permitindo que o fio esfriasse, o reposicionamento do fio B era feito contraindo o fio A para reproduzir a condição de operação. Observa-se grande variabilidade no comportamento do fio mesmo entre os testes 1 e 2 que possuíam condições praticamente idênticas. O teste 4 demonstra como uma pequena redução na temperatura externa (no caso aproximadamente 4° C) ocasiona um aumento significativo na potência necessária para ativar o fio. Há, portanto, dependência na temperatura ambiente e tensão. Um complicador para controle em malha aberta. Além do já citado, como posições em malha aberta correspondem a valores de tensões preestabelecidos, fixa-se também uma taxa de aquecimento para cada ponto, fazendo com que a velocidade de atuação dependa da posição desejada. Estas características tornam o controle em malha aberta pouco interessante, sendo descartado sua implementação neste estudo. É importante destacar que os “degraus” vistos na curva de repetibilidade são provavelmente causados por variações no atrito devido a um segmento mal usinado do eixo ao passar através da bucha de PTFE.

Na figura 5.2 estão apresentados os resultados de testes realizados em malha fechada utilizando o controlador PI, com constantes K_p igual a 200 e K_i igual a 1. O controlador PI foi testado no seguimento de um sinal de referência que alterna entre duas posições a uma frequência de 0,083 Hz (Figura 5.1a) e 0,17 Hz (Figura 5.1b) com ciclo de trabalho máximo de 87%. Essas frequências foram selecionadas após testes em malha aberta indicarem que o tempo de resposta do atuador a 87% do ciclo de trabalho é aproximadamente de 2,92 s, o que implica em uma frequência de operação máxima 0,17Hz para o caso de deslocamento de extremo a extremo. Nessa frequência, com o controlador PI o atuador não conseguiu atuar rápido o suficiente para atingir os valores de referência. A 0,083 Hz, o controlador obteve resposta média de 3,79 s. Com o fio operando à sua potência máxima, o tempo de resposta médio foi reduzido para 2,79 segundos, havendo, porém, aumento do *overshoot* (Apêndice B Figura B.1). A demora do fio antagônico em resfriar (2,2 s segundo o *datasheet*) pode ser o motivo pelo qual a contração durante operação cíclica não estar ocorrendo em 1 s como afirma Dynalloy, 2014. Pode-se concluir que o controle PI apesar de necessitar melhorias, mostrou-se promissor, uma vez que há de ser considerado que os testes foram conduzidos no limite físico de velocidade de atuação do dispositivo.



a. Referência onda quadrada @ 0,083Hz

b. Referência onda quadrada @ 0,17Hz.

Figura 5.2 Testes do controlador PI.

6. CONCLUSÕES

O atuador comportou-se como esperado teoricamente, apresentando curso total, considerando os instrumentos de medição disponíveis, dentro do valor de obtido pelo método de cálculo empregado. Com a exceção do efeito memória bidirecional, TWSH, que se apresentou logo após os primeiros ciclos e com intensidade expressiva, de aproximadamente 2% do comprimento total do fio, e que deve ser considerado durante projeto. O método proposto por Waram, 1993, forneceu bons resultados, com características do protótipo muito próximas das previstas em teoria. Além disso, como o controle PI mostrou-se adequado para atuadores com Nitinol. É possível concluir que os objetivos propostos foram atingidos, e que projetistas poderão valer-se deste estudo como base para futuros atuadores. Entretanto, é necessário considerar as limitações em termos de velocidade de atuação impostas pelas taxas de aquecimento e resfriamento do material, cujo método utilizado não aborda.

Todavia, é importante mencionar que o protótipo requer ainda muitas melhorias para poder ser empregado comercialmente. O uso de polias, por exemplo, não aparentou deteriorar o comportamento do fio, uma vez que com se fosse o caso, o teste com carga a 90% da máxima provavelmente apresentaria curso instável pelo acréscimo de tensão gerado pela

flexão do fio na polia. Entretanto, o uso de polias requer estudo para avaliar seu real potencial de aplicação no caso de miniaturização. O chassi, por sua vez, requer extensa otimização para que o presente atuador possa vir a ser competitivo com relação às alternativas tradicionais. É importante mencionar que para realmente apresentar vantagem em termos de redução de peso e volume, o atuador a base de SMA deve ser incorporado a própria estrutura do dispositivo a ser atuado, abandonando o conceito de atuador modular padronizado usualmente empregado no caso de princípios de atuação mais convencionais. Além disso, estratégias de proteção contra sobre carga e sobre aquecimento são necessárias. Os pontos mencionados podem vir a ser tópicos para futuros estudos.

Pode-se ainda concluir que, atuadores baseados em SMA possuem sérias limitações, em especial à eficiência energética. Para sistemas de baixa potência e com grandes restrições de massa e volume, entretanto, o potencial de aplicabilidade mostra-se, a partir do estudo realizado, encorajador, podendo-se também afirmar que este estudo comprova que o Nitinol é de fato uma alternativa viável para atuação linear.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anadon, S., “**Large Force Shape Memory Alloy Linear Actuator**”, University of Florida, 2002
- Atmel, “**Atmel 8-bit Microcontroller with In-System Programmable Flash Datasheet**”, 2014
- Bergmuller, E.L. “**Desenvolvimento de uma Plataforma com Dois Graus de Liberdade para Compensação de Inclinações Através de um Sistema de Controle Inercial.**” 2015
- Daudpoto, J., Menon A.A. e Hussain, I., “**Actuation Characteristics of 0.15mm Diameter Flexinol and Biometal Wire Actuators for Robotic Applications**” Mehran University of Research Journal of Engineering and Tecnology, Volume 32, 2013
- Duerig, T.W., Stockel, D. e Keeley, A., “**Actuator and Work Production devices**”, Engineering Aspects Of Shape Memory Alloys, pp 181-194, 1990
- Dynalloy Inc, “**Technical Characteristics of Flexinol Actuator Wires**”, 2014
- Fairchild Semiconductor, “**RFP30N06LE, RF1S30N06LESM Data Sheet**” ,2004
- General Motors, “**Chevrolet debuts lightweight ‘Smart Material’ on Corvette**” GM Press, 2013
- Ikuta, K., Tsukamoto, M. e Hirose S., “**Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope.**” In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 1, pagina 427-430, 1988.
- Jani, J.M., Leary, M., Subic, A. e Gibson, M.A. “**A review of shape memory alloy research, applications and opportunities**”, Materials & Design, Volume 56, pp 1078-1113, 2014
- Kaufmann, G. e Mayo I. “**Memory Metal**”, Chem Matters, Out 1993 4-7
- Kennedy, S.P., “**Material Characterization of Nitinol Wires for the Design of Actuation Systems**”, California Polytechnic State University, 2013
- Kline, S. J., e F. A. McClintock “**Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments**”, Mech. Eng., p. 3, Janeiro 1953

Miga Motor Company, “**MigaOne DataSheet**”, 2014

Wayman, C.M. e Duerig, T.W, “**An Introduction to Martensite and Shape Memory**”, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, pp 3-20, 1990

Pons, J.L., “**Emerging Actuator Technologies: A Micromechatronic Approach**”, John Wiley & Sons Inc. pp. 163-168, [ISBN: 978-0-470-09197-5], UK, 2005

Proft, J.L. e Duerig, T.W., “**The Mechanical Aspects of Constrained Recovery**” Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, pp 115-129, 1990

Peirs, J., Reynaerts D. e Van Brussel, H. “**Shape memory alloy micro-actuators for medical applications**” Proceedings of the 4th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 1997

Perkins, J. e Hodgson, D., “**The Two-Way Shape Memory Effect**”, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, pp 195-206, 1990

Toki Corporation, “**Artificial metal based muscle, BioMetal Fiber**”, 2010

The, Y.H. e Featherstone, R., “**An Architecture for Fast and Accurate Control of Shape Memory Alloy Actuators**” International Journal of Robotics Research, vol 27, no. 5, 2008

Wang, Tian-Miao et al. “**An Accurately Controlled Antagonistic Shape Memory Alloy Actuator with Self-Sensing.**” *Sensors (Basel, Switzerland)* 12.6 (2012): 7682–7700. PMC. Web. 2 Nov. 2015

Waram, T. C., “**Actuator Design Using Shape Memory Alloys**”, Ontario, 1993

SpectraSymbol, “**Membrane Potentiometer DataSheet**”, 2015

Sugiyama, Y. e Hirai, S., “**Crawling and jumping by a deformable robot**” International Journal of Robotics Research, 25(5-6):603–620, 2006.

Apêndice A- Circuito de Aquecimento do Nitinol

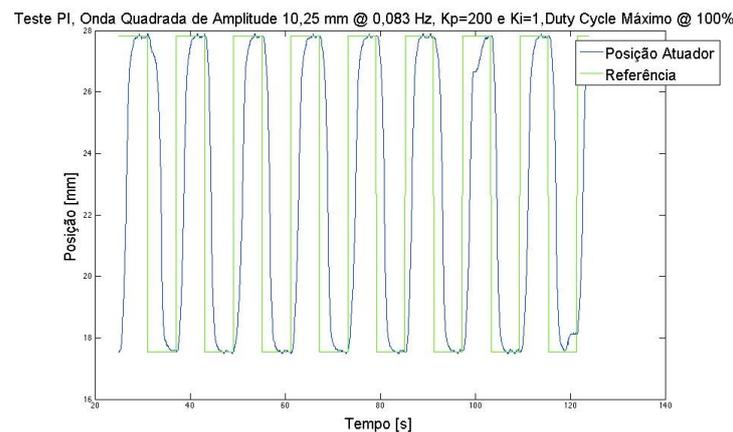
O ArduinoUno R2 é limitado a uma tensão de 5 V e a uma corrente máxima de 20 mA em suas portas de saída. Entretanto, correntes e tensões mais elevadas são necessárias para o aquecimento dos fios atuadores. Afim de contornar essa limitação um circuito foi elaborado a partir de Mosfets para fornecer a potência demandada, mas ainda permitindo a MPU controlar a intensidade da mesma.

Segundo o fabricante *Fairchild, 2004*, o Mosfet modelo RFP30N06LE suporta operação³ contínua de até 30 A a 60 V. A vantagem do uso de Mosfet em relação a transistores bipolares é poder acioná-lo diretamente pela tensão disponível nas portas de saída do Arduino, sem necessitar de qualquer outro elemento. Foi verificado através da curva de saturação disponível no *datasheet*, que o Mosfet estará operando dentro da zona de saturação, o que garante a mínima resistência (0,047 Ω) para passagem de corrente possível nesse modelo e baixa dissipação de energia.

O controle do nível de tensão é realizado por *pulse width modulation (PWM)*, (modulação de largura de pulso), que consiste em um sinal de onda quadrada de amplitude fixa e largura de pulso variável, simulando um sinal analógico através de um sistema digital. Essencialmente, o Mosfet será “ligado” e “desligado” a uma alta frequência, sendo a proporção entre o tempo ligado e desligado, chamada de *duty cycle*, a qual determina a diferença de potencial média entre os terminais do fio atuador.

As bibliotecas padrões do Arduino possuem funções de PWM com resolução de 8 bits, o que permite incrementos de 0,047 V. Entretanto, como demonstra Kennedy a curva tensão deformação do Nitinol possui uma região de alta sensibilidade, onde pequenas variações de tensões geram contrações relativamente grandes. Com base nisto, foi utilizada a biblioteca *TimerOne.h* que implementa PWM na resolução de 10 bits (máxima disponível no AtMega328), o que implica em incrementos de 0,012 V, permitindo maior controle sobre a atuação do fio. É importante frisar que esse é um valor médio, da diferença de potencial.

Apêndice B - Resultado de Teste Complementar



b) Teste PI com potência máxima

Figura B.1- Teste complementares do atuador e controlador

³ Entretanto esse componente está integrado a um circuito impresso com trilhos limitados a 3,5 Ampere, [Sparkfun, 2014].

Apêndice C - Discussão sobre Erros e Incertezas

Segundo o BIMP, 2014, incertezas e erros dependem do conhecimento do comportamento do mensurando, padrão e influencias externas. Um estudo detalhado das incertezas e erros nos sistemas de medições e controle do presente trabalho deveria considerar a influência dos componentes eletrônicos, mecânicos e dos *softwares*, entretanto tal análise foge do escopo atual.

É possível elencar as prováveis fontes de erros no sistema atual:

- Atrito entre eixo e buchas, fios e polias e ponteira do sensor e sensor.
- Flexão do parafuso no qual ponteira está afixada.
- Folgas.
- Truncamento de valores na MPU.
- Ruído eletromagnético.

C.i - Classificação de Erros

Erros segundo, BIMP, são classificados como:

- Tipo A: são incertezas aleatórias, cujo o sinal e módulo variam de forma randômica. Entretanto é possível obter valores limites e médios por análise estatística.
- Tipo B: erros sistemáticos, de natureza desconhecida, mas com comportamento repetitivo, apresentando valores de desvio praticamente constantes.

C.ii - Incerteza do deslocamento

Sendo realizada aqui uma análise simplificada da incerteza dos deslocamentos medidos pelo potenciômetro. Para estimar a incertezas da posição do atuador, uma série de medições, com n medições de um mesmo valor X pode ser realizada. Extrai-se então a média dos valores medidos:

$$\bar{m} = \frac{\sum m_n}{n}, \quad (\text{C.1})$$

onde \bar{m} é a média das medições. O desvio padrão da amostra, $S_{\bar{m}}$, pode ser calculado através da seguinte equação:

$$S_{\bar{m}} = \sqrt{\frac{\sum(m_n - \bar{m})^2}{n-1}}. \quad (\text{C.2})$$

A incerteza pode ser computada por:

$$I_{\bar{m}} = \pm t(c, g) S_{\bar{m}}, \quad (\text{C.3})$$

onde, $I_{\bar{m}}$ é a incerteza da medição e $t(c, g)$ o valor da distribuição de t de *Student*, para o intervalo de confiança c , e para g graus de liberdade, $g = n-1$.

As incertezas de posição foram estimadas realizando 10 medições do ponto de fim de curso do atuador (o eixo foi manualmente levado ao batente). Com os valores das medições foi obtido o valor da incerteza tipo "A" do potenciômetro, I_{pot} , igual a $\pm 0,03mm$, com intervalo de confiança de 99%. Aqui é importante observar que $\pm 0,03mm$ forma um espaço de 0,06 mm de incerteza maior que a resolução teórica (0,048 mm) do sistema de aquisição de dados

(ao considerar resolução “infinita” do potenciômetro). É possível especular que a parcela mecânica do sistema, em especial destaque a ponteira, limita a resolução real que pode ser atingida com esse sensor.

Para considerar o efeito total da incerteza do potenciômetro no cálculo do deslocamento do atuador foi utilizada a equação proposta por Klein e McClintock, 1953, que se reduz , para o caso da distância entre dois pontos medidos pelo potenciômetro:

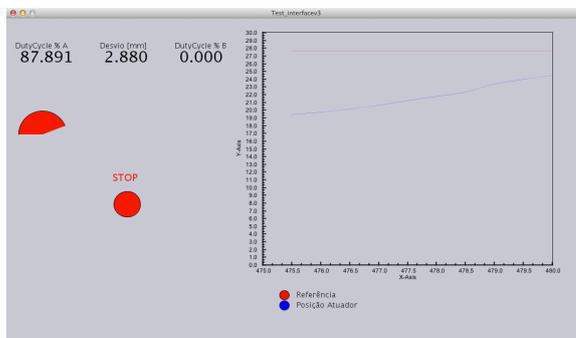
$$I_{desl} = \sqrt{I_{pot}^2 + I_{pot}^2} \quad (C.4)$$

onde, I_{desl} é a incerteza em relação ao deslocamento, ou curso, realizado pelo atuador. Portanto o valor obtido de 10,60 mm é mais apropriadamente descrito como 10,60 +- 0,042 mm. Um paquímetro (com incerteza de 0,03 mm segundo datasheet) foi utilizado para comparar a medição obtendo um resultado de 10,64 mm +- 0,042 mm, em concordância com o valor obtido através do potenciômetro.

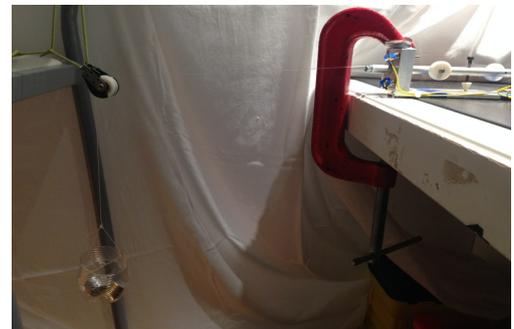
É importante ressaltar que essa análise só considera a incerteza aleatória da medição, e como o deslocamento é a diferença entre duas medições o erro sistemático é anulado.

Apêndice D – Bancada de Testes

Para facilitar o ajuste de constantes do controlador PI, e acompanhar o andamento dos testes foi desenvolvida uma interface feita no software livre *Processing*. A tela de operação pode ser vista na Figura D.1a. Os testes com carga foram realizados na bancada retratada na Figura D.1b, na qual é possível ver o sistema onde uma polia guia um fio de Nylon que suspende massas exercendo tração no eixo do atuador constante ao longo do curso.



a) Interface de testes



b) Sistema de tração do eixo.

Figura D.1 Detalhes dos equipamentos usados durante testes.

Apêndice E - Imagens do Protótipo

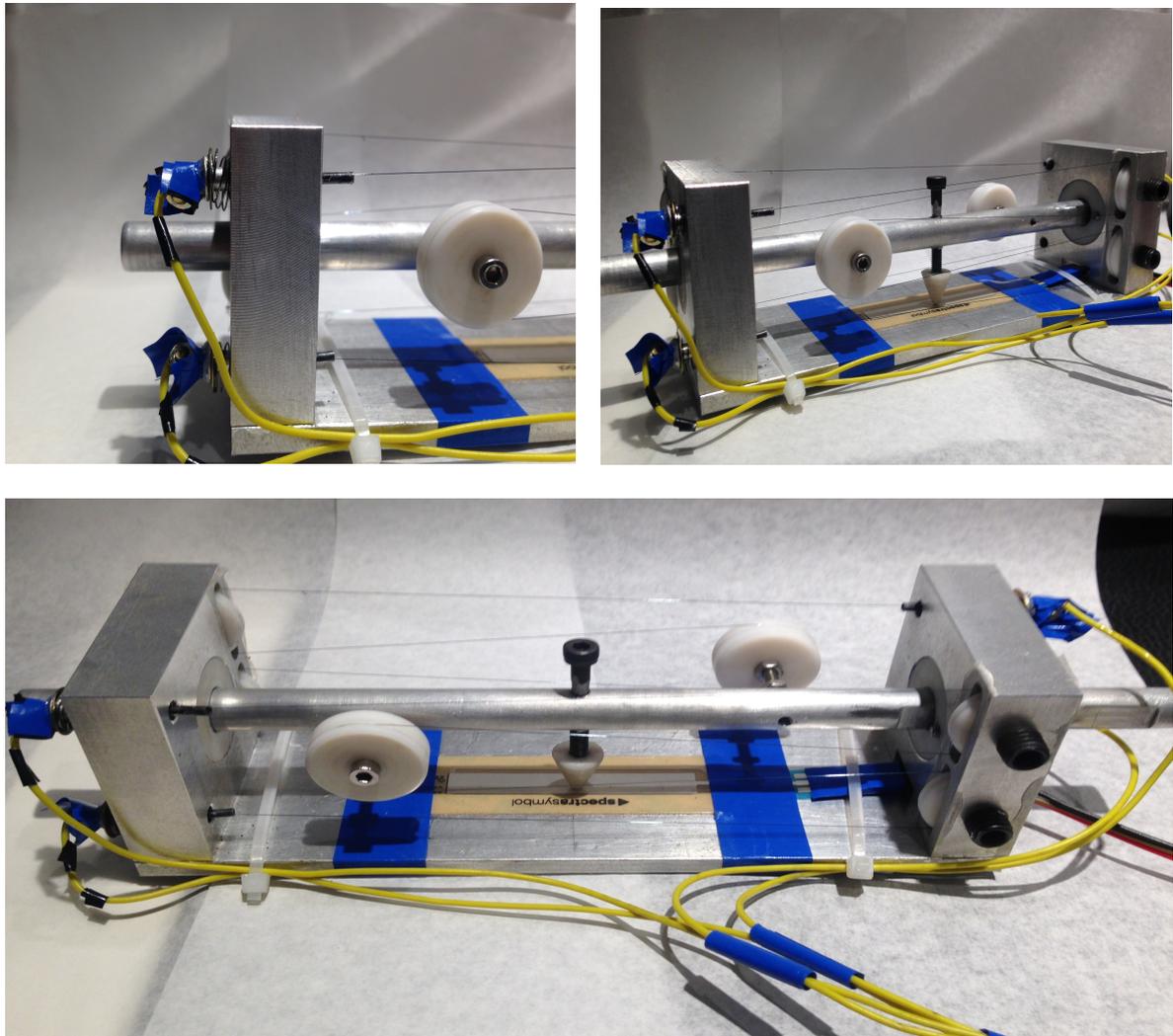


Figura E.1 – Fotos do protótipo com novo sistema de ancoragem (em detalhe na foto superior esquerda).

Anexo

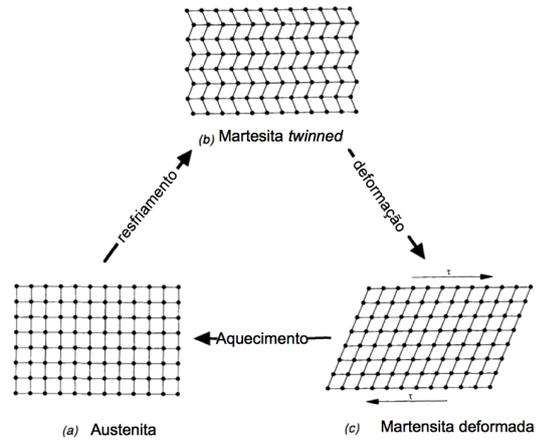


Figura 1 - Ciclo de transformação SMA, perspectiva microestrutural. (Fonte: "Engineering Aspects Of Shape Memory Alloys").

Tabela 1- Dados Técnicos do sensor SoftPot 50mm (Spectra Symbol, "Membrane Potentiometer DataSheet", 2015).

Resistência	10k Ohm +- 20%
Linearidade	+3%
Resolução	Teoricamente Infinita
Força vertical para atuação	0,6 a 1,6N @ 23°C
Vida Útil	> 1 milhão de ciclos
Comprimento Área Ativa	50 mm
Diâmetro ponteira recomendado	2,7 mm