

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA**

**CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Desenvolvimento de um Atuador Inteligente de  
Movimento Acionado por Memória de  
Forma em um Protótipo de um Braço Mecânico.**

Julio Muñoz M. Lopes

Lucas Bastos de Assis

Prof. Orientador: Sergio A. Oliveira

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA**

**CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Desenvolvimento de um Atuador Inteligente de  
Movimento Acionado por Memória de  
Forma em um Protótipo de um Braço Mecânico.**

Julio Muñoz M. Lopes

Lucas Bastos de Assis

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior  
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Sergio A. Oliveira

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2018**

# FICHA CATALOGRÁFICA

## DEDICATÓRIA

Dedicamos esse trabalho a nossas famílias e amigos, que sempre nos incentivaram a continuar e nunca desistir, sempre prontos para nos ajudar diante de quaisquer dificuldades. Dedicamos também aos bons professores que estiveram presentes em nossa caminhada durante a graduação, sempre dispostos a nos atender e ajudar.

Julio Muñoz M. Lopes

Lucas Bastos de Assis

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a deus por nos proporcionar saúde e sabedoria para seguir o caminho durante a graduação.

Agradecemos as nossas famílias, pois sem seu apoio não teria sido possível chegar até aqui. Aos nossos pais, mães, avós, avôs, irmãos e a todos, que a sua própria maneira, contribuíram e ajudaram para que chegássemos até aqui.

Agradecemos aos amigos pelo apoio dado em momentos de dificuldade e pelos momentos de diversão entre os momentos de dedicação ao projeto e a graduação.

Agradecemos ao nosso orientador, professor Sergio Oliveira, pela infinita paciência e boa vontade, sempre disposto a nos atender e ajudar.

Por fim um agradecimento pessoal, de Julio Muñoz, a um grande amigo canino, companheiro de estudos durante as madrugadas. Luck, obrigado por existir e ser fantástico do jeito que é.

Julio Muñoz M. Lopes

Lucas Bastos de Assis

## RESUMO

Atualmente os materiais com memória de forma (*shape memory alloy* ou SMA) vêm atraindo grande atenção devido a suas propriedades termomecânicas únicas. Essas características geram grande interesse de pesquisadores e desenvolvedores de novas tecnologias. As SMA estão cada vez mais presentes no desenvolvimento de pesquisas nas áreas: médica, aeroespacial, automotiva, entre outras. Este projeto tem por objetivo desenvolver um braço mecânico capaz de realizar movimento por meio do comportamento termomecânico de atuadores de SMA.

Palavras-chave: material com memória de forma, braço mecânico, movimento.

## **ABSTRACT**

Nowadays, shape memory alloys (SMA) have attracted great attention because of their unique thermomechanical properties. This feature generates great interest to researchers and developers of new Technologies. SMA is increasingly present in the development of research in the areas of medicine, aerospace, automotive, among others. This project aims to develop a mechanical arm capable of performing motion through the thermomechanical behavior of SMA actuators.

**Key-words:** Shape Memory Alloy, mechanical arm, Movement.

# Sumário

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Motivações .....	1
1.2 - Objetivo .....	2
1.3 - Organização do Trabalho .....	2
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>3</b>
2.1 - Surgimento das ligas com memória de forma .....	3
2.2 - Atuadores de ligas com memória de forma .....	5
2.3 – Estudo de braços e próteses .....	10
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Fundamentação Teórica.....</b>	<b>16</b>
3.1 - Introdução ao efeito de memória de forma .....	16
3.2 - Efeito de memória de forma One-Way .....	19
3.3 - Efeito de memória de forma Extrinsic Two-Way .....	20
3.4 - Efeito de memória de forma Intrinsic Two-Way .....	21
3.5 - O efeito da pseudoelasticidade .....	22
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>24</b>
<b>4. O Projeto do Braço Mecânico de materiais de memória de forma .....</b>	<b>24</b>
4.1 - O projeto do braço Mecânico .....	24
4.2 - Montagem do Braço Mecânico .....	26
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>28</b>
<b>5. O Desenvolvimento do Protótipo de Testes do Braço Mecânico .....</b>	<b>28</b>
5.1 - O Desenvolvimento da Mesa de testes .....	28
5.2 - Instrumentação do Protótipo de Testes .....	29

5.2.1 - Célula de Carga .....	30
5.3.2 - Amplificador de sinal da célula de carga .....	32
5.3.3 – Sensor de Distância Ultrassônico .....	33
5.3.4 – Arduino UNO .....	37
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>39</b>
<b>6. Caracterização das Molas utilizadas.....</b>	<b>39</b>
6.1 - Caracterização da mola de aço .....	39
6.2 - Caracterização da mola de liga de memória de forma .....	40
6.2.2 - Teste de tração da mola de liga de memória de forma.....	41
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>42</b>
<b>7. Metodologia dos Testes do Protótipo de testes.....</b>	<b>42</b>
7-1 Roteiro dos testes.....	43
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>45</b>
<b>8. Análise dos Resultados obtidos.....</b>	<b>45</b>
8.1 – Teste de 1 minuto e 1A .....	48
8.2 – Teste de 2 minutos e 1A .....	51
8.3 – Teste de 3 minutos e 1A .....	53
8.4 - Teste de 1 minuto e 1,5A.....	56
8.5 - Teste de 2 minutos e 1,5A .....	59
8-6 - Teste de 3 minutos e 1,5A.....	62
8.7 - Teste de 1 minuto e 2A.....	65
8.8 - Teste de 2 minutos e 2A .....	68
8.9 - Teste de 3 minutos e 2A .....	70
8.10 - Teste de 1 minuto e 2,5A.....	73
8.11 - Teste de 2 minutos e 2,5A .....	75
8.12 - Teste de 3 minutos e 2,5A .....	78
8.13 – Estudo comparativo entre os resultados .....	81
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>84</b>

<b>9. Conclusão.....</b>	<b>84</b>
9.1 – Fatores fundamentais .....	84
9.2 - Funcionamento esperado para o braço mecânico.....	85
 <b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>86</b>
<b>10. Trabalhos futuros .....</b>	<b>86</b>
 <b>CAPÍTULO 11 .....</b>	<b>87</b>
<b>11. Referências bibliográficas.....</b>	<b>87</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 2-1:</b> Diagrama de densidade de energia de atuação (LAGOUDAS, 2008) .....	4
<b>Figura 2-2:</b> Diagrama da frequência de Atuação (LAGOUDAS, 2008) .....	4
<b>Figura 2-3:</b> Conceito de MLW (V. BRAILOVSKI, 2010) .....	6
<b>Figura 2-4:</b> Esquema de funcionamento do atuador (S.N. KEERTHI SAGAR, 2013) .....	7
<b>Figura 2-5:</b> Atuador de junta com 2 graus de liberdade (SHI ZHENYUN, 2013).....	7
<b>Figura 2-6:</b> Estrutura dos atuadores tipo A (a) e B (b); Foto dos atuadores tipo A (a) e B (b) e atuador tipo B em ação (e) (TANIGUCHI, 2013).....	8
<b>Figura 2-7:</b> Elemento de expansão de uma válvula termostática de aquecimento (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015) .....	9
<b>Figura 2-8:</b> Válvula termostática de mistura (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015).....	10
<b>Figura 2-9:</b> Junta de ombro (PFEIFFER, C e MAVROIDIS, C, 1999) .....	11
<b>Figura 2-10:</b> protótipo de dedo (PFEIFFER, C e MAVROIDIS, C, 1999).....	11
<b>Figura 2-11:</b> Protótipo de polias de desvio (LANGE, G e LACHMANN, A, 2015)..	12
<b>Figura 2-12:</b> Atuador de SMA (LANGE, G e LACHMANN, A, 2015).....	13
<b>Figura 2-13:</b> O mini atuador (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015).....	13
<b>Figura 2-14:</b> Fio do mini atuador (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015) .....	14
<b>Figura 2-15:</b> componentes do mini atuador (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015).....	14
<b>Figura 2-16:</b> Prótese desenvolvida (ZUNIGA1, J.; KATSAVELIS, D, 2015) .....	15
<b>Figura 4-1:</b> Braço Mecânico (fonte própria) .....	24
<b>Figura 4-2:</b> Destaque da mola de torção do braço mecânico (fonte própria) .....	25
<b>Figura 4-3:</b> Segundo protótipo montado (fonte própria) .....	26
<b>Figura 4-4:</b> Segundo protótipo carregado (fonte própria) .....	27
<b>Figura 5-1:</b> Mesa de testes (fonte própria) .....	29

<b>Figura 5-2:</b> esboço do esquema de montagem da mesa de teste .....	30
<b>Figura 5-3:</b> Modelo de célula de carga utilizado nos testes.....	31
<b>Figura 5-4:</b> pesos padrões utilizados (fonte própria).....	31
<b>Figura 5-5:</b> amplificador de sinal hx711 .....	32
<b>Figura 5-6:</b> Esquema da montagem individual da ponte entre célula de carga e Arduino utilizando o amplificador .....	33
<b>Figura 5-7:</b> Sensor de distância ultrassônico .....	34
<b>Figura 5-8:</b> Esquema da montagem individual do sensor de distância ultrassônico e o Arduino.....	34
<b>Figura 5-9:</b> Esboço do esquema de cálculo da distância de movimentação da haste móvel.....	35
<b>Figura 5-10:</b> Esboço esquema de cálculo da variação angular do movimento da haste .....	36
<b>Figura 5-11:</b> Arduino UNO .....	37
<b>Figura 5-12:</b> Esquema de montagem do sensor de distância ultrassônico em conjunto com a célula de carga e seu amplificador .....	38
<b>Figura 6-1:</b> máquina de teste durante o teste de compressão da mola de aço (fonte própria) .....	39
<b>Figura 6-2:</b> Gráfico da tensão-deformação mola de aço (fonte própria) .....	40
<b>Figura 6-3:</b> teste de tração da mola de SMA (fonte própria).....	41
<b>Figura 7-1:</b> fonte HY3003E-3 (fonte própria) .....	42
<b>Figura 8-1:</b> Estado inicial do protótipo de testes (fonte própria) .....	45
<b>Figura 8-2:</b> Carregamento aplicada a mola de SMA (fonte própria).....	46
<b>Figura 8-3:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 1A (fonte própria).....	48
<b>Figura 8-4:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minutos e 1A (fonte própria).....	49

<b>Figura 8-5:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 1A (fonte própria) .....	51
<b>Figura 8-6:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 1A (fonte própria).....	52
<b>Figura 8-7:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 1A (fonte própria) .....	53
<b>Figura 8-8:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 1A (fonte própria).....	54
<b>Figura 8-9:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 1,5A (fonte própria) .....	56
<b>Figura 8-10:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 1,5A (fonte própria) .	57
<b>Figura 8-11:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 1,5A (fonte própria) .....	59
<b>Figura 8-12:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 1,5A (fonte própria)	60
<b>Figura 8-13:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 1,5A (fonte própria) .....	62
<b>Figura 8-14:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 1,5A (fonte própria)	63
<b>Figura 8-15:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 2A (fonte própria).....	65
<b>Figura 8-16:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 2A (fonte própria) ....	66
<b>Figura 8-17:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 2A (fonte própria) .....	68
<b>Figura 8-18:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 2A (fonte própria)...	69

<b>Figura 8-19:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 2A (fonte própria) .....	70
<b>Figura 8-20:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 2A (fonte própria)...	71
<b>Figura 8-21:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 2,5A (fonte própria).....	73
<b>Figura 8-22:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 2,5A (fonte própria) .	74
<b>Figura 8-23:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minuto e 2,5A (fonte própria).....	75
<b>Figura 8-24:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minuto e 2,5A (fonte própria) .	76
<b>Figura 8-25:</b> Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minuto e 2,5A (fonte própria).....	78
<b>Figura 8-26:</b> Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minuto e 2,5A (fonte própria) .	79
<b>Figura 8-27:</b> relação entre corrente elétrica e variação do angulo da haste em relação ao tempo (fonte própria).....	81
<b>Figura 8-28:</b> relação entre tempo e variação do angulo da haste em relação a corrente elétrica aplicada (fonte própria).....	82

## Lista de Símbolos e Abreviações

- SMA - Liga com memória de forma (*shape memory alloy*)
- $A_S$  - Temperatura associada ao início da transformação de fase austenítica (K)
- $A_F$  - Temperatura associada ao término da transformação de fase austenítica (K)
- $M_S$  - Temperatura associada ao início da transformação de fase martensítica (K)
- $M_F$  - Temperatura associada ao término da transformação de fase martensítica (K)
- MDF - Placa de fibra de média densidade (*Medium-Density Fiberboard*)
- ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene*
- FFT - *fast fourier transform*

# Capítulo 1

## 1. Introdução

### 1.1 - Motivações

Materiais inteligentes representam um grande avanço no desenvolvimento tecnológico alcançado pela humanidade. Hoje eles estão presentes em diversas áreas da vida humana. Desde uma prótese medicinal até um simples acendedor de fogão. E cada vez se tornam mais necessários e cômodos com os avanços tecnológicos e as necessidades dos seres humanos.

Dentre essas matérias podemos citar as ligas com memória de forma, em inglês *shape memory alloy* (SMA), que são conhecidas desde 1930. Entretanto só a partir de 1960, surge o interesse de estudar essas matérias por parte de pesquisadores americanos, inicialmente. O efeito de memória de forma em ligas de Ni-Ti, que começou a ser conhecida como nitinol, gerou grande repercussão no meio científico e desde então elas vêm sendo estudadas e cada vez mais, novas aplicações e melhorias são descobertas.

A razão de tamanho interesse de pesquisadores é a singular capacidade de transformação de fase por diferentes comportamentos termomecânicos que os SMAs apresentam.

Possuindo uma grande versatilidade os SMAs hoje estão presentes em diversas áreas de estudo. Como: aeronáutica, aeroespacial, biomedicina e computação.

Se baseando no uso de SMA este projeto busca desenvolver atuadores que propiciem o funcionamento de um braço mecânico a partir de estímulos térmicos sobre uma mola de SMA e uma mola de aço para retorno.

## **1.2 - Objetivo**

Este estudo busca o desenvolvimento de atuadores capazes de gerar movimento em um braço mecânico a partir de estímulos termomecânicos em materiais com memória de forma.

## **1.3 - Organização do Trabalho**

O capítulo 1 fornece uma introdução e o objetivo para esse trabalho. No capítulo 2 são feitas análises e argumentações sobre atuadores de SMA em diversas áreas de desenvolvimento tecnológico. O capítulo 3 fornece o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do projeto do braço mecânico. No capítulo 4 são feitas a pesquisa e o desenvolvimento do braço mecânico. O capítulo 5 discorre sobre o desenvolvimento do protótipo para a realização dos testes laboratoriais e a instrumentação utilizada. No capítulo 6 é apresentada as características das molas de aço e de SMA usadas no projeto. O capítulo 7 demonstra a metodologia dos testes feitos com o protótipo de testes. O capítulo 8 demonstra o resultado obtido nos testes experimentais e uma discussão sobre aquilo que foi encontrado e o que era esperado com base na teoria. É também apresentada uma discussão comparativa dos resultados. No capítulo 9 é apresentada uma conclusão em cima dos resultados encontrados e do objetivo inicial do projeto. No capítulo 10 são discutidas melhorias para possíveis futuros trabalhos, que possam apresentar semelhanças com o aqui feito. Por fim, no capítulo 11 são expostas as referências bibliográficas do projeto.

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

#### 2.1 - Surgimento das ligas com memória de forma

Com os avanços tecnológicos e científicos, uma melhor compreensão dos efeitos da microestrutura dos materiais e o desenvolvimento de técnicas para um melhor processamento desses materiais, nas últimas décadas, houve uma ampla melhora nas pesquisas direcionadas a área de ciência dos materiais. Cada vez se torna maior a capacidade de trabalhar e fabricar materiais com propriedades diferentes e mais complexas. A demanda por matérias mais fortes, leves e versáteis gerou o surgimento de novos materiais com características únicas como os piezelétricos, eletrostrictivos, magnetostrictivos e ligas com memória de forma. (LAGOUDAS, 2008)

Esses materiais apresentam a capacidade de converter um estímulo mecânico em um não mecânico, como por exemplo os materiais piezelétricos que geram uma diferença de potencial elétrico quando pressionados. Geralmente eles também respondem quando submetidos a um estímulo não mecânico, gerando retorno mecânica. O retorno mecânico desses materiais é geralmente maior que o de matérias convencionais, como por exemplo a dilatação térmica. (LAGOUDAS, 2008)

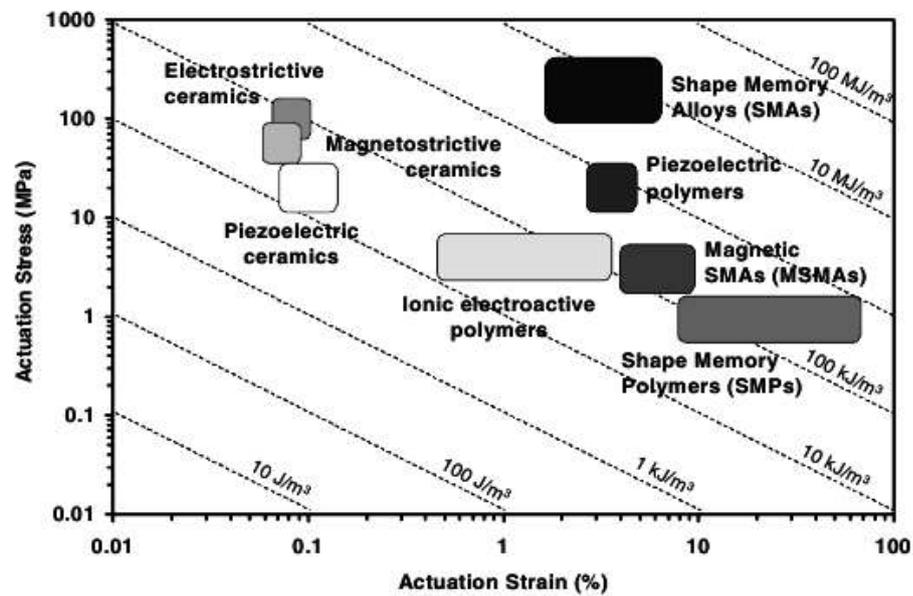


Figura 2-1: Diagrama de densidade de energia de atuação (LAGOUDAS, 2008)

O gráfico 2-2 compara as densidades de energia de atuação e as frequências de atuação, respectivamente, de alguns materiais.

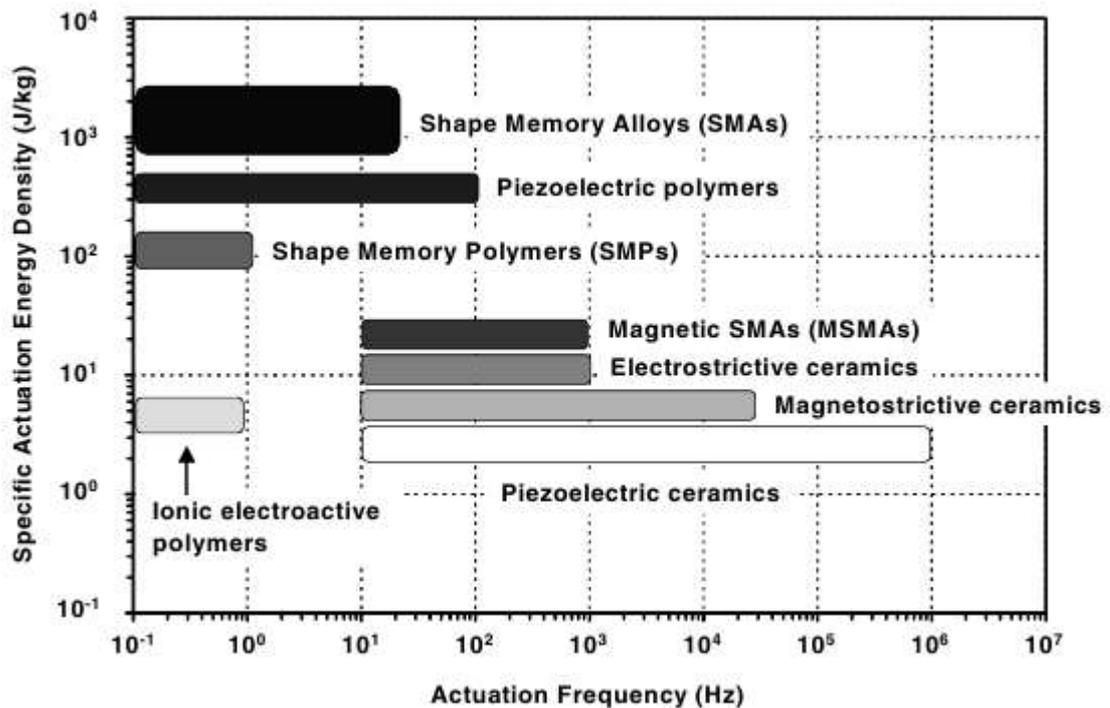


Figura 2-2: Diagrama da frequência de Atuação (LAGOUDAS, 2008)

Um dos tipos de matérias vistos acima são as ligas com memória de forma (*shape memory alloys* - SMA). Os SMAs são um tipo de material que tem a habilidade única de recuperar sua forma original quando levados a altas temperaturas. Um aumento da temperatura resulta na recuperação da deformação até mesmo com altas tensões aplicadas.

A primeira descoberta sobre SMA foi registrada em 1932. Arne Ölander descobriu o comportamento pseudoelástico das ligas de Au-Cd. Em 1938 Grening e Mooradian descobriram que ocorria a formação e o desaparecimento da fase martensítica através da diminuição e do aumento da temperatura das ligas de Cu-Zn. (LAGOUDAS, 2008)

A liga de níquel titânio (Ni-Ti), a mais conhecida dos SMA, só seria desenvolvida no início dos anos de 1960 e posteriormente comercializada com o nome de Nitinol. (LAGOUDAS, 2008).

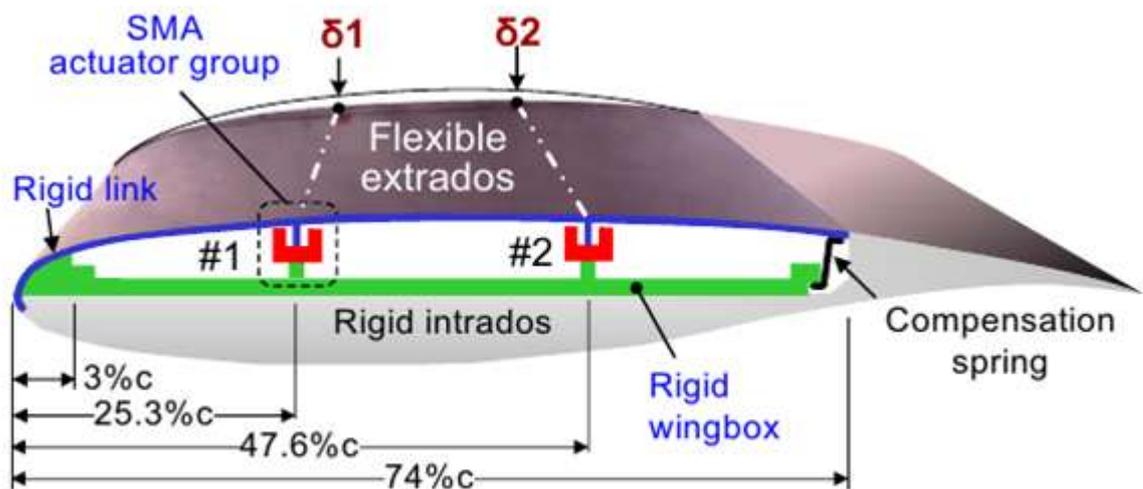
Graças a sua característica única os SMAs motivam pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos diversos. Atualmente eles vêm sendo muito visados para aplicabilidade como atuadores em variadas áreas de estudos científicos.

## **2.2 - Atuadores de ligas com memória de forma**

A seguir serão analisados alguns tipos de atuadores de SMA e suas aplicabilidades.

Os SMAs são fortemente presentes na indústria aeroespacial e uma possível aplicação de atuadores é na asa da aeronave. O estudo feito por V. Brailovski, 2010, desenvolve a estrutura de asas aeronaves capazes de mudar de fase (*Morphing Laminar Wing* - MLW). O objetivo do estudo é obter uma redução do consumo de combustível através do aprimoramento do escoamento em regime laminar através da parte superior das asas de aeronaves (extradorso). As asas foram elaboradas para voar em condições subsônicas e apresentando de forma combinada: extradorso flexível, intradorso rígido e um grupo de atuadores localizados dentro da estrutura da asa.

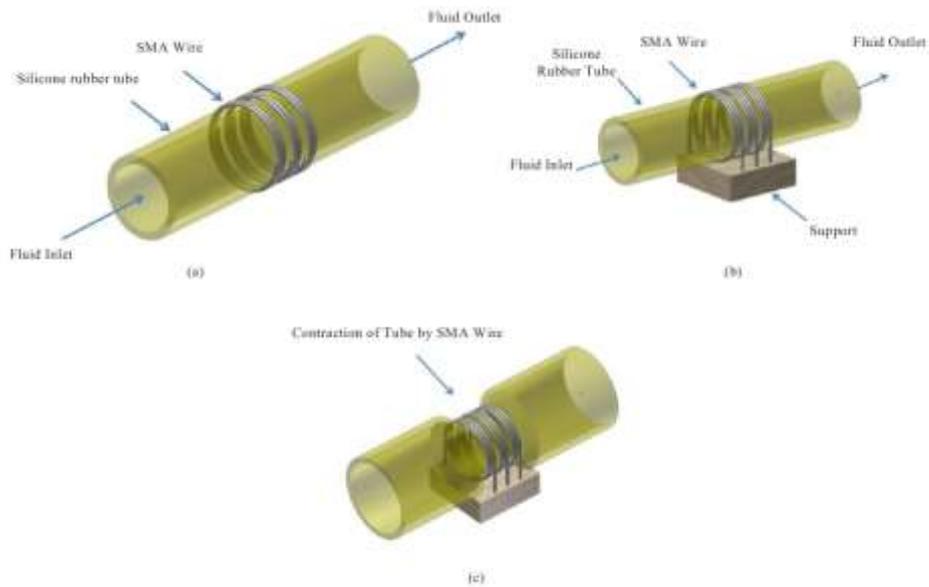
A estrutura ativa da MLW consiste de um extradorso flexível e atuadores conectados juntos por um sistema de transmissão, sujeito a variação das condições de escoamento aerodinâmicos. A modificação do perfil aerodinâmico ocorre quando os dois atuadores de SMA localizados dentro da caixa da asa aplicam deslocamentos independentemente controlados no extradorso flexível e pode ser vista na figura 2-3. A rigidez e integridade da asa é fornecido pelo intradorso rígido. (BRAILOVSKI, 2010)



**Figura 2-3:** Conceito de MLW (V. BRAILOVSKI, 2010)

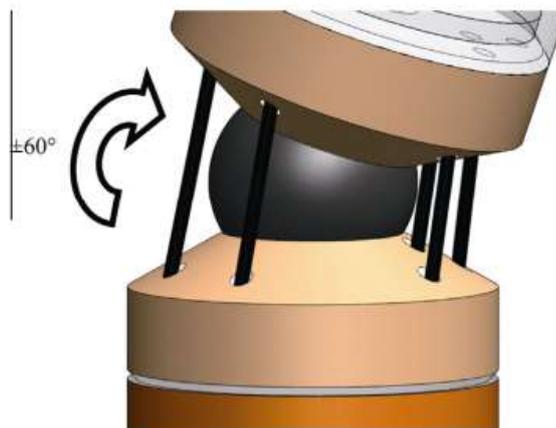
Um tipo de atuador mais simples foi desenvolvido por S.N. Keerthi Sagar, 2013, propõe o uso de atuadores de SMA para controlar a vazão de fluidos em pequenos tubos, na área médica. O estudo abre caminho para futuras análises em outras áreas com problemas similares em maiores escalas. O SMA neste estudo é usado como uma microbomba capaz de modificar a vazão do escoamento através de sua variação de deformação.

O fio de SMA envolta do tubo de silicone atua contraindo o tubo gerando uma redução da seção transversal do tubo que conseqüentemente gera um efeito de variação de pressão. (S.N. KEERTHI SAGAR, 2013)



**Figura 2-4:** Esquema de funcionamento do atuador (S.N. KEERTHI SAGAR, 2013)

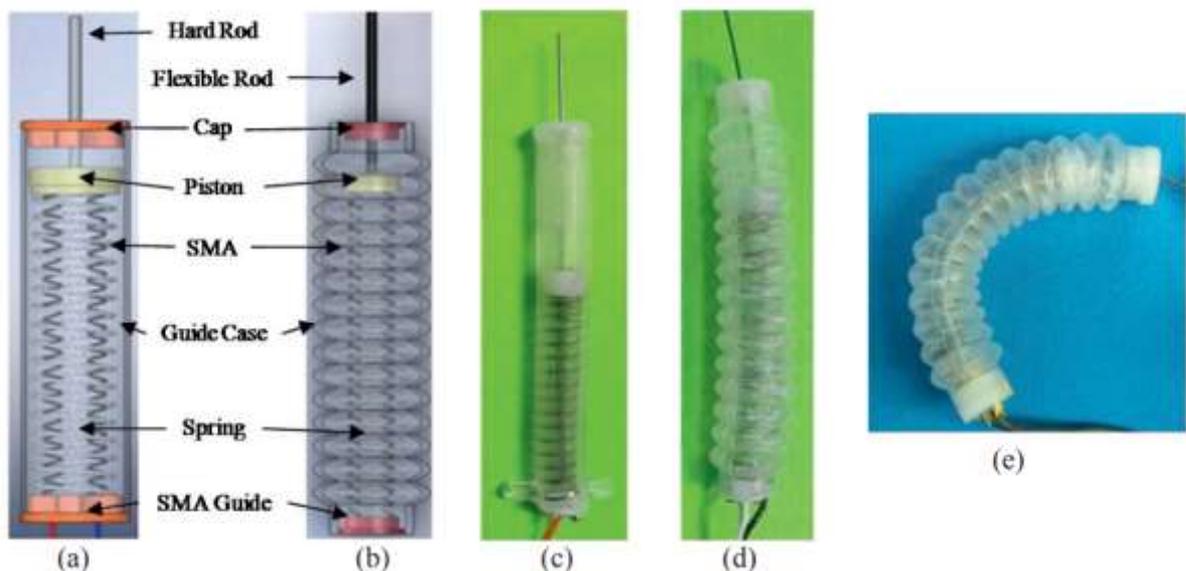
A próxima aplicação para atuadores de SMA é concepção de uma junta com dois graus de liberdade. Na figura 2-5 podemos observar como este modelo de atuador funciona, a junta utiliza de 3 fios de SMA para alcançar os 2 graus de liberdade e um alcance de mobilidade de  $60^\circ$ . (SHI ZHENYUN, 2013)



**Figura 2-5:** Atuador de junta com 2 graus de liberdade (SHI ZHENYUN, 2013)

A junta tipo esférica se mostrou uma solução interessante, capaz de aliar alta mobilidade do sistema com um volume compacto. Os fios de SMA funcionam de forma antagonista, três de cada lado da junta, possibilitando assim o movimento do sistema através do tensionamento de cada fio individualmente. Experimentos mostraram que, com o aumento na frequência de resposta, o excesso de tensão tornou-se difícil de ser evitado na posição sob maior força de fricção. Uma lógica difusa de controle foi considerada como uma solução, e as curvas dos fios foram então modeladas pelo ajuste de curvas polinomiais para que a resistência medida fosse usada diretamente para determinar o sinal de controle. (SHI ZHENYUN, 2013)

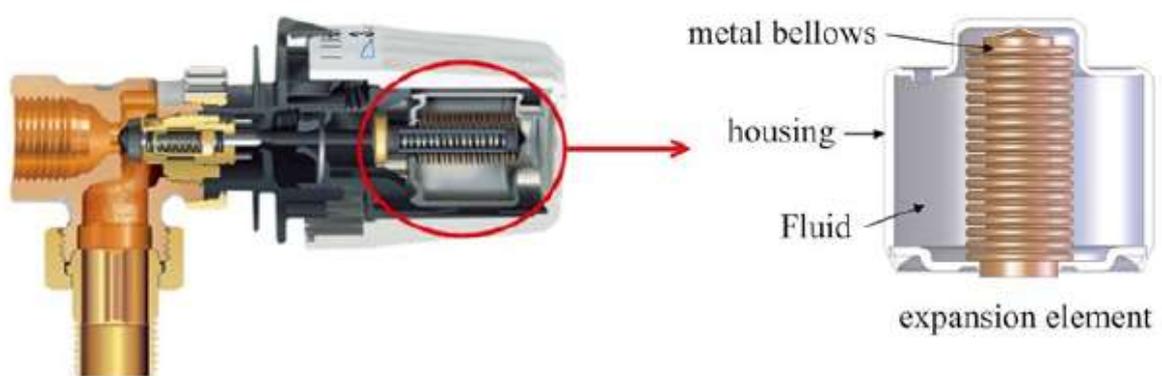
No exemplo a seguir é proposto a construção de um músculo artificial flexível atuado por fios de SMA em formato de bobina. O atuador consiste principalmente de um material flexível e fios de SMA. A fabricação foi baseada em moldagem de borracha de silicone. O atuador é caracterizado por simular o movimento de um músculo em flexão. Várias características foram medidas para investigar uma relação entre o ângulo de flexão do corpo e a atuação, como resultado, foi confirmado a possibilidade de atuar com o corpo em flexão. (TANIGUCHI, 2013)



**Figura 2-6:** Estrutura dos atuadores tipo A (a) e B (b); Foto dos atuadores tipo A (a) e B (b) e atuador tipo B em ação (e) (TANIGUCHI, 2013)

Foram projetados dois atuadores diferentes, o tipo A e o tipo B. A diferença entre os dois atuadores está no formato do invólucro de silicone, que podem ser visualizados na figura 2-6 (a) e (b). Os fios de SMA são produzidos para memorizar o formato de uma mola. O fio de SMA é alocado dentro do invólucro de silicone (c) e (d), e ao ser aquecido por uma corrente elétrica, ele é comprimido ao seu formato original, resultando no movimento do atuador (e). Ao ser desligada a corrente o fio se expande ao ser naturalmente resfriado. (TANIGUCHI, 2013)

Também podem ser comentados os como entre os diferentes atuadores as válvulas térmicas. Atualmente se vem sendo estudado o uso de SMAs em válvulas termostáticas de aquecimento, o maior empecilho encontrado está relacionado ao custo dos SMA. Por isso os SMA costumam ser encontrados em produtos de nicho apenas. A válvula termostática de aquecimento possui um sensor de temperatura, ou no caso um atuador térmico, em forma de um elemento expansivo dentro de si. O elemento expansivo expande de acordo com a temperatura do ar ambiente. Essa mudança de tamanho é transmitida a um pistão e através disso a uma válvula, que com isso altera o fluxo da seção transversal do curso de aquecimento para a frente e a taxa de escoamento. Uma mola de retorno é usada para abrir a válvula durante o resfriamento do elemento de expansão. O controle contínuo do fluido de aquecimento gera uma temperatura ambiente constante. sem o elemento de expansão térmica montado, a válvula de aquecimento fica totalmente aberta. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)



**Figura 2-7:** Elemento de expansão de uma válvula termostática de aquecimento (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)

Seguindo essa mesma aplicação temos as válvulas termostáticas de mistura. Essas válvulas são usadas normalmente em chuveiros que permitem uma temperatura de saída constante da água misturada, não importando a temperatura e a pressão da água fornecida. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)



**Figura 2-8:** Válvula termostática de mistura (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)

### 2.3 – Estudo de braços e próteses

Um estudo realizado por Charles Pfeiffer mostra como é possível construir próteses atuadas por SMA. Sua pesquisa desenvolveu três protótipos que simulam estruturas ósseas humanas e que são movimentadas por músculos artificiais construídos por SMA. As próteses construídas foram leves, alta capacidade de carga, características de reflexo e altos graus de liberdade, proporcionando uma alternativa atraente para pessoas com necessidades especiais. Os protótipos também se mostraram úteis na fabricação de robôs. (PFEIFFER, C e MAVROIDIS, C, 1999)

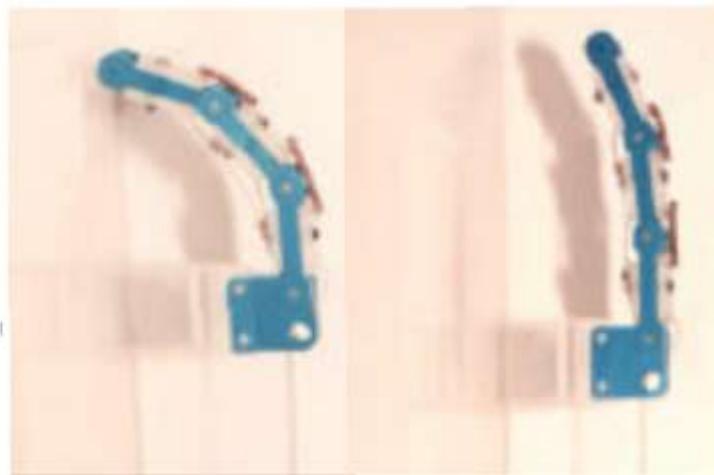
Para o protótipo de junta do ombro, o alcance de movimento da junta foi de 40 graus em todas as direções. Sua extremidade foi capaz de traçar um círculo de aproximadamente 25 cm. Apesar de somente ter sido implementado somente um sistema de “open loop control” (este sistema de controle se caracteriza por não utilizar informações sobre o estado atual do

processo), o movimento se mostrou surpreendentemente suave. (PFEIFFER, C e MAVROIDIS, C, 1999)



**Figura 2-9:** Junta de ombro (PFEIFFER, C e MAVROIDIS, C, 1999)

Nos testes preliminares de acionamento do protótipo do dedo foram alcançadas deflexões de setenta graus para as pontas dos dedos. Esse alcance de movimento foi alcançado através da ativação de somente as duas últimas juntas do mecanismo. Os pesquisadores acreditam que o sistema será capaz de alcançar deflexões maiores através da ativação de todas as três juntas. (PFEIFFER, C e MAVROIDIS, C, 1999)



**Figura 2-10:** protótipo de dedo (PFEIFFER, C e MAVROIDIS, C, 1999)

Por último foi construído um conjunto de fios que simulavam um músculo. Este protótipo, pesando menos de meia grama, foi capaz de realizar forças muito acima de 100 vezes o seu peso. Testes de força iniciais mostraram que o aparato foi capaz de levantar um sobrepeso de 29 kg. Para um conjunto de fios de doze polegadas o deslocamento total durante o acionamento foi de aproximadamente 1,5". (PFEIFFER, C e MAVROIDIS, C, 1999)

Gerrit Lange fez um estudo sobre a utilização de fios de SMA como atuadores lineares em mãos robóticas. Sua pesquisa mostrou que um fio de SMA com seção transversal de  $1 \text{ mm}^2$  foi capaz de levantar um peso de 20kg. Porém o fio sofreu uma contração de apenas 4%, que para sua aplicação era insuficiente. Duas soluções foram levantadas: usar um fio mais curto com um maior diâmetro e compensar a pequena contração com uma alavanca; ou utilizar um fio maior que resultaria em uma contração absoluta maior. Porém é preciso encontrar um ajuste fino entre comprimento e espessura do fio, já que estes influenciam no tempo de aquecimento e resfriamento do sistema. Um bom sistema de atuador precisa de um período curto de aquecimento e resfriamento. (LANGE, G e LACHMANN, A, 2015)

O primeiro protótipo foi construído utilizando polias de desvio. O tamanho das polias foi projetado de forma a ter pelo menos 50 vezes o diâmetro dos fios, para não reduzir a vida útil do material. O conceito consiste de 10 polias de desvio de alumínio, montadas com isolamento elétrico entre elas. Um elástico é utilizado como mecanismo de retorno. O mecanismo pode ser visto na figura 2-11. O protótipo não teve os resultados devido aos altos níveis de fricção. (LANGE, G e LACHMANN, A, 2015)



**Figura 2-11:** Protótipo de polias de desvio (LANGE, G e LACHMANN, A, 2015)

O segundo protótipo foi construído com os fios de SMA em um arranjo paralelo. A força de transmissão é carregada usando elementos de conexão também arranjados paralelamente. Esses elementos podem ser movidos de forma independente e são isolados eletricamente. A figura 2-12 mostra o protótipo montado. Testes mostraram que o modelo só foi capaz de atingir uma contração de 2%. (LANGE, G e LACHMANN, A, 2015)

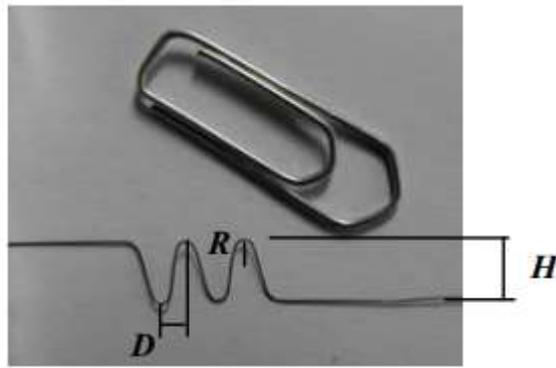


**Figura 2-12:** Atuador de SMA (LANGE, G e LACHMANN, A, 2015)

A. Nespoli desenvolveu um mini atuador rotacional movido por 2 elementos antagonísticos de SMA. O atuador possui um volume de 1 cm<sup>3</sup> e pesando apenas 1,13g. O conjunto possui dois fios moldados em um formato de serpente com quatro curvaturas conforme pode ser visto na figura 2-13 e 2-14. (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015)



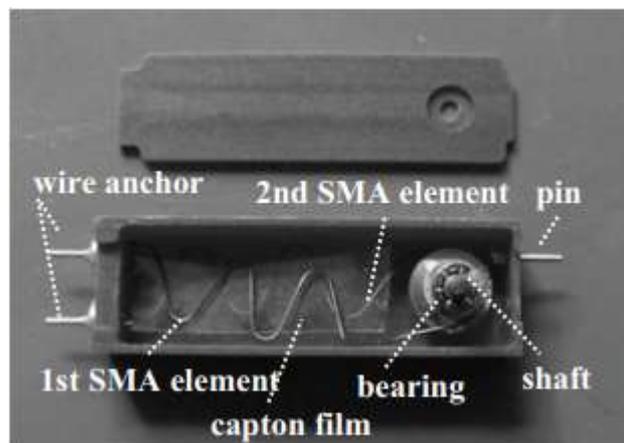
**Figura 2-13:** O mini atuador (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015)



**Figura 2-14:** Fio do mini atuador (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015)

Principais parâmetros utilizados nas curvaturas do fio de SMA:  $D=16\text{mm}$ ,  $H=4\text{mm}$ ,  $R=0.5\text{mm}$ . (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015)

O dispositivo consiste de uma caixa de PVC, dois rolamentos inox e um eixo, um ponto elétrico. (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015)



**Figura 2-15:** componentes do mini atuador (NESPOLI, A e BASSANI, E, 2015)

Na Creighton University em Omaha nos Estados Unidos, foi feita uma pesquisa que buscava desenvolver próteses de mãos mais acessíveis para crianças com má-formação da mão ou que não possuíam mãos. (ZUNIGA1, J.; KATSAVELIS, D, 2015)

De acordo com os pesquisadores a grande dificuldade do estudo foi fazer umas próteses compatível com o pequeno tamanho das crianças, o crescimento constante das crianças e as limitações financeiras das famílias. (ZUNIGA1, J.; KATSAVELIS, D, 2015)

O modelo feito foi desenvolvido usando CAD e fabricado por impressoras 3D usando polylactide e ABS (acrylonitrile butadiene styrene). Os outros componentes da prótese eram cordas elásticas, cordas não-elásticas, parafusos Chicago de vários tamanhos, velcro, espuma acolchoada firme de classe medica, meia para proteger a pele, e um tensionador de fios. todo o material usado na construção da prótese teve um custo de 50 dólares e o peso da prótese era de 184 gramas. Enquanto próteses similares custam 4000 dólares e pesam 400 gramas. (ZUNIGA1, J.; KATSAVELIS, D, 2015)



**Figura 2-16:** Prótese desenvolvida (ZUNIGA1, J.; KATSAVELIS, D, 2015)

O movimento dos dedos da prótese ocorre por meio da deflexão de 20 a 30 graus do pulso do usuário (ZUNIGA1, J.; KATSAVELIS, D, 2015)

De acordo com a pesquisa foi relatado pela maioria dos pais das crianças, uma melhora na qualidade de vidas das crianças quando começaram a utilizar a prótese. (ZUNIGA1, J.; KATSAVELIS, D, 2015)

## Capítulo 3

### 3. Fundamentação Teórica

#### 3.1 - Introdução ao efeito de memória de forma

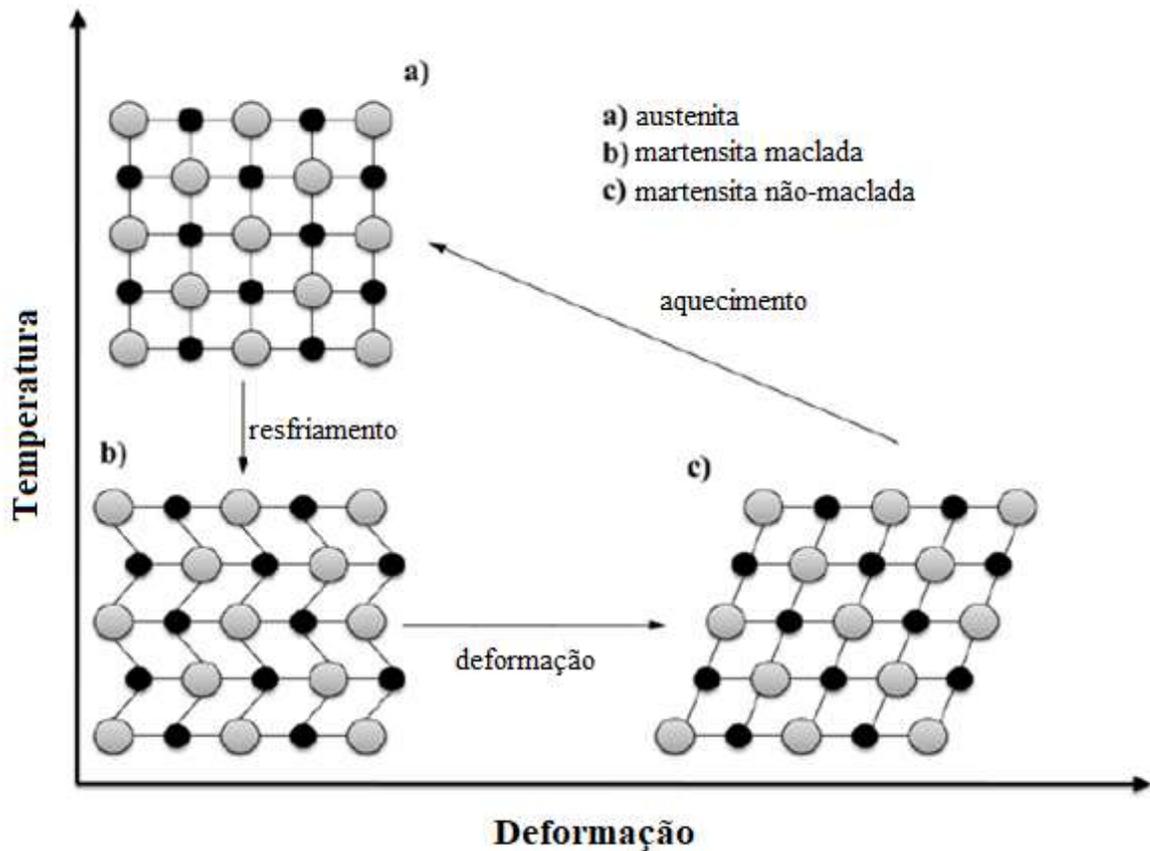
A crescente necessidade de estruturas com tamanho reduzido e melhores propriedades mecânicas tem atraído cada vez mais atenção para as ligas com memória de forma (SMA).

Sua capacidade única, de deformação e recuperação, sujeita a um gradiente térmico gera grande interesse de pesquisadores.

Toda a análise feita em torno do SMA, em especial o Nitinol, é feita através do comportamento da microestrutura do SMA sujeita a um gradiente de temperatura.

Os SMAs possuem duas fases de estado sólido, a martensítica e austenítica. As transformações ocorrem por meio de gradientes de tensão-temperatura. Essa mudança de fase causa uma recuperação da deformação e mudanças macroscópicas no formato do material. A transformação de fase a baixa temperatura (fase martensítica) para a fase com elevada temperatura (fase austenítica) ocorre de forma adifusional, ou seja, sem migração de átomos, portanto sem mudança da composição química da liga. Além disso foi observado que as transformações apresentam ciclos de histerese não lineares com um forte acoplamento termomecânico. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)

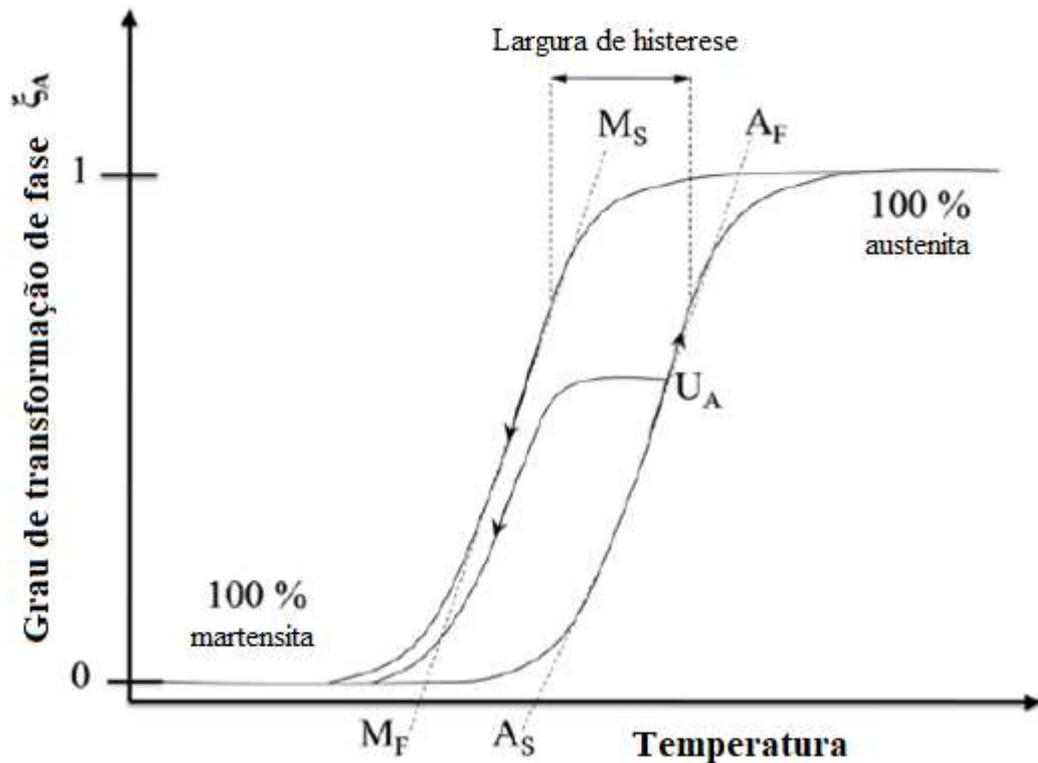
O efeito da transformação de fase se inicia com inserção de energia térmica no sistema, sendo reversível e não dependente de tempo. A única mudança atômica ocorre por meio da distorção da rede atômica sem causar a migração de átomos. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)



**Figura 3-1:** Ciclo de transformação martensítica em SMA (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015, Modificado)

A Figura 3.1 demonstra como ocorre a transformação de fase. Inicialmente resfriando a austenita (a) até se tornar martensita (b), forma-se a martensita maclada, e com o deslocamento das interfaces procede a deformação formando-se a martensita não-maclada(c).

A martensita maclada se forma, pois, a estrutura cristalina da fase martensítica apresenta diversos tipos de estrutura, sendo pouco simétrica, algumas variantes geométricas podem surgir. A estrutura maclada surge como uma acomodação natural das variantes martensíticas presentes na rede cristalina. A deformação impõe o alinhamento em uma direção preferencial, gerando a martensita não-maclada. Ao ser aquecida o material se transforma em austenita. Essa transformação de fase ocorre em um intervalo de temperaturas. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)

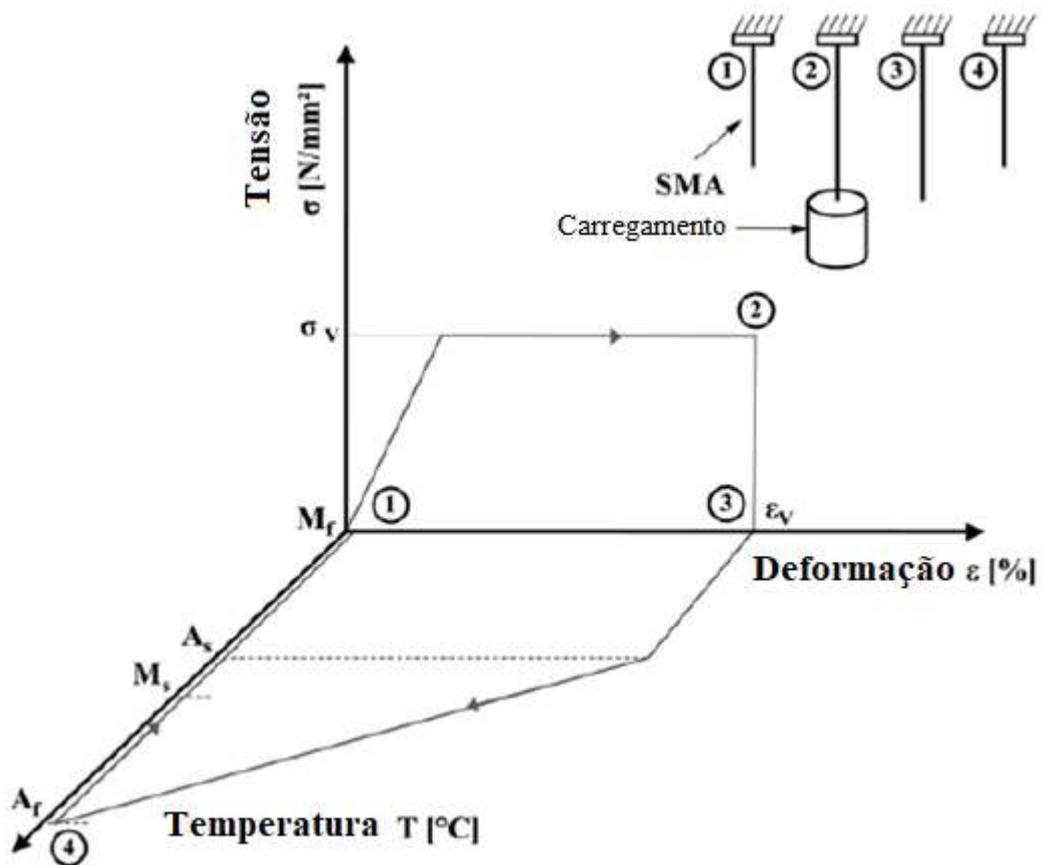


**Figura 3-2:** Ciclo de transformação de SMA em função da temperatura (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015, modificado)

De acordo com a figura 3.2 a transformação de fase pode ser descrita em função de quatro temperaturas fundamentais para o processo (também conhecidas como temperaturas de transição de fase). Com um carregamento mecânico constante, a transformação martensítica começa na temperatura associada ao início do processo de transformação de fase austenítica ( $A_S$ ). A martensita é transformada em austenita com estrutura cubica de corpo centrado. A transformação de fase é completada quando se alcança a temperatura associada ao fim do processo de transformação de fase austenítica ( $A_F$ ). Nesse ponto o material tem estrutura totalmente austenítica. A transformação reversa se inicia quando o material atinge a temperatura associada ao início do processo de transformação de fase martensítica ( $M_S$ ) e termina na temperatura associada ao fim do processo de transformação de fase martensítica ( $M_F$ ), que é abaixo da temperatura de  $A_S$ . Como pode ser visto na figura existe histerese térmica, resultado de perdas internas durante o processo de transformação de fase. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)

### 3.2 - Efeito de memória de forma One-Way

Como pode ser observado na figura 3.3, e exemplificado por meio de um fio de SMA, esse comportamento é caracterizado pelo material após ser deformado (2) recuperar seu estado original depois de ter o carregamento mecânico, anteriormente aplicado, retirado (3) e ser aquecido (4)



**Figura 3-3:** Características do efeito de memória de forma One-way (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015, modificado)

A deformação do material é chamada de pseudoplástica porque mesmo após o carregamento ser retirado o material não recupera a forma original. A forma original só é alcançada após o material ser submetido a um aquecimento. Quando o material é submetido ao aumento de temperatura, ocorre início do processo de transformação de fase austenítica ( $A_s$ ). após o contínuo aquecimento o material atinge a temperatura associada ao fim do processo de transformação de fase austenítica ( $A_f$ ) nesse ponto o material já é totalmente austenítico.



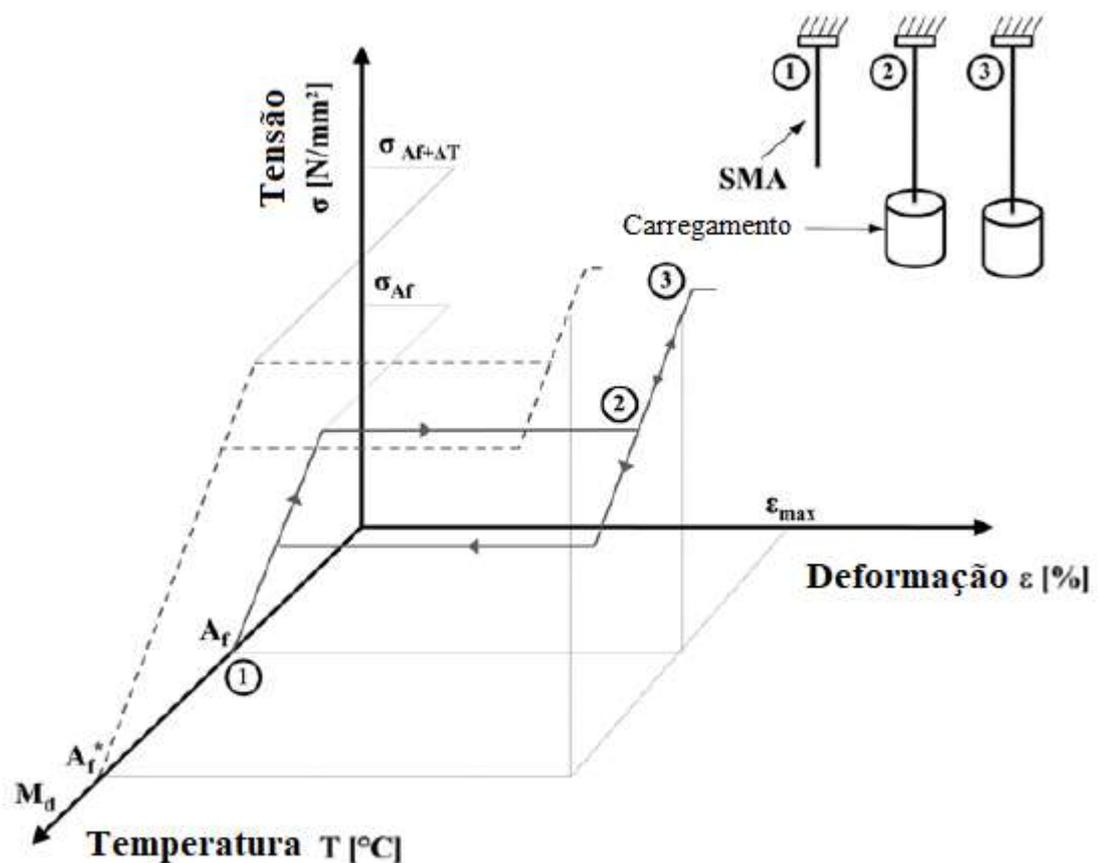
Inicialmente a martensita maclada (1) é deformada pela tensão exercida pelo peso anexada ao fio, até atingir um limite de elasticidade aparente (2). Nesse ponto a martensita é não-maclada. Essa deformação pseudoplástica permanece intacta mesmo com a retirada do carregamento mecânico. Esse comportamento é conhecido com alongamento pseudoplástico. Quando a SMA é aquecida ocorre o início de transformação de fase na temperatura de  $A_S$ , a partir disso a martensita é transformada em austenita (3). A característica dessa transformação pode ser atribuída a reorganização da estrutura cristalina através da mudança entre martensita e austenita. Devido ao contínuo carregamento mecânico, como visto na figura 3.4, o material é transformado diretamente em martensita não-maclada (2) quando resfriado. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)

### **3.4 - Efeito de memória de forma Intrinsic Two-Way**

O efeito de memória de forma Intrinsic Two-Way descreve um material capaz de realizar transformação de fase tanto durante o aquecimento como durante o resfriamento. Esse comportamento é obtido por meio de tratamento termomecânico (treinamento). Esse efeito é estabilizado durante os ciclos de treinamento na orientação preferencial da martensita. Esse treinamento termomecânico gera uma tensão residual no SMA, que aplica a tensão mínima para recuperar o material por conta própria. Durante o treinamento o material é deformado até sua tensão máxima de escoamento em ambas as fases, tanto martensítica como austenítica. Devido a deformação plástica do material, são gerados e estabilizados as discontinuidades e os defeitos na estrutura cristalina do material. Isso garante a retenção de tensão residual, que não se degradam mesmo após as transformações de fase futuras. Após aproximadamente vinte e cinco ciclos, um comportamento de efeito de memória de forma bidirecional intrínseco pode ser observado. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)

### 3.5 - O efeito da pseudoelasticidade

Ao contrário dos comportamentos anteriores, a pseudoelasticidade pode ser obtida mecanicamente a temperatura constante. O efeito de pseudoelasticidade ocorre quando o material é processado a temperaturas acima da temperatura de início de formação da martensita ( $M_s$ ). SMAs com comportamento pseudoelástico, normalmente, são completamente austeníticos a temperatura ambiente. Devido ao carregamento mecânico aplicado, a austenita se transforma diretamente em martensita não-maclada. Como a martensita não-maclada não é termicamente estável, o material retorna a fase austenítica com o alívio de tensão.



**Figura 3-5:** Características do efeito de pseudoelasticidade (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015, modificado)

A Figura 3.5 demonstra o comportamento pseudoelástico de um fio de SMA. Quando o carregamento é aplicado ao material, o fio alonga. Quando o carregamento é retirado o fio pseudoelástico recupera o tamanho original. A figura também demonstra que o comportamento

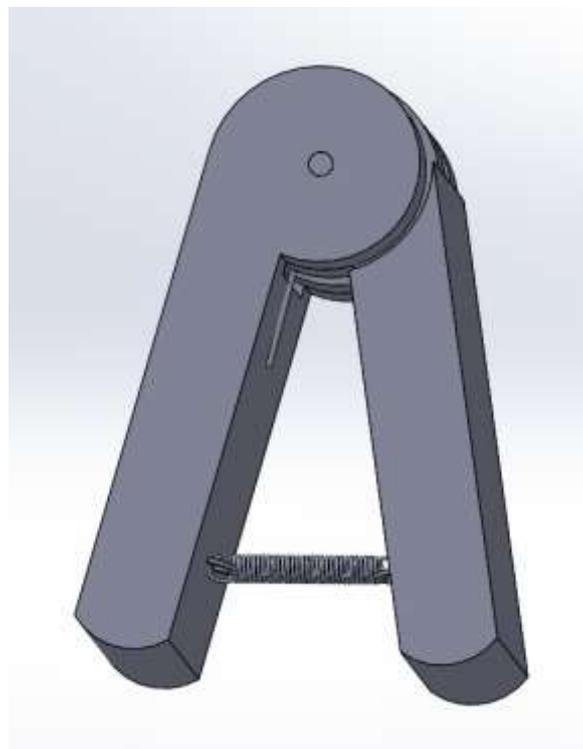
de pseudoelasticidade pode ocorrer em um intervalo de carregamento termomecânico. Temperaturas mais elevadas exigem carregamentos mecânicos maiores para ocorrer o início da transformação de fase. (CZECHOWICZ e LANGBEIN, 2015)

## Capítulo 4

### 4. O Projeto do Braço Mecânico de materiais de memória de forma

#### 4.1 - O projeto do braço Mecânico

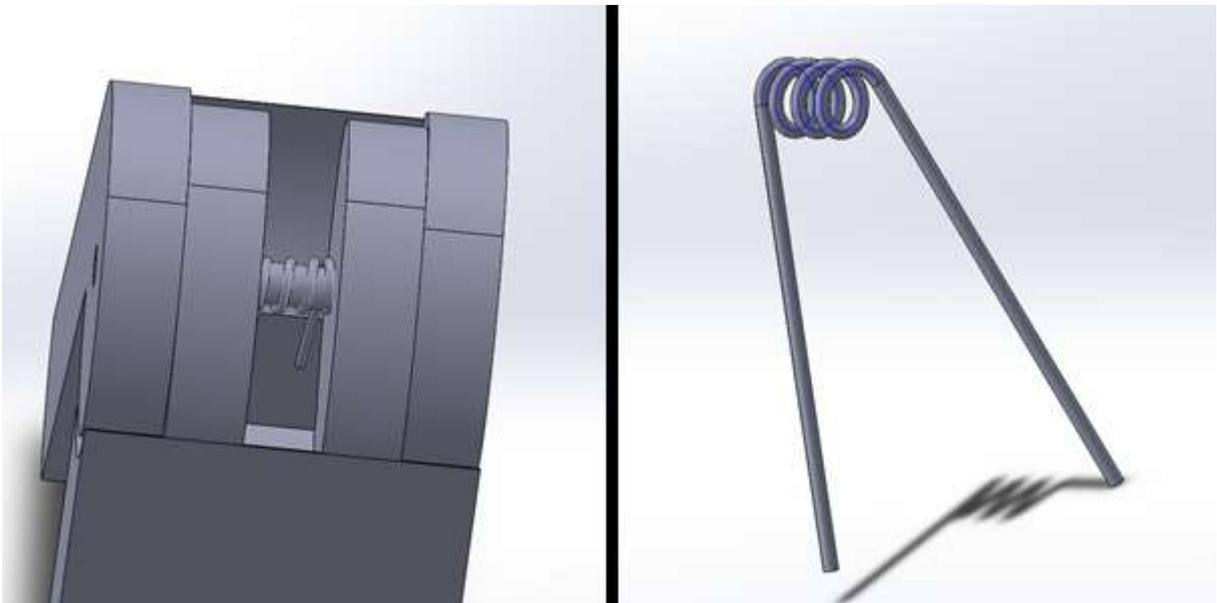
O projeto inicial do braço mecânico será desenvolvido usando dois pés para dar apoio e movimentar o atuador como um todo, duas molas sendo uma de SMA que através da transformação de fase irá gerar a contração do braço e, por fim, uma mola de aço que será responsável por retornar o braço ao estado original após ter sofrido contração devido ao esforço produzido pela mola de SMA quando esta muda para a fase austenítica.



**Figura 4-1:** Braço Mecânico (fonte própria)

O comportamento do braço irá ser semelhante ao visto no diagrama da figura 3-4. Inicialmente a mola de SMA encontra-se no estado martensítico.

Após um carregamento térmico ser introduzido na mola de SMA, através de uma corrente elétrica, ocorre a transformação de fase e a mola de SMA se torna austenítica, isso gera uma redução de seu tamanho devido a mudança da estrutura cristalina sofrida pelo material, essa transformação causa uma contração na mola de aço deixando-a tensionada e gera uma aproximação das pernas do braço mecânico.



**Figura 4-2:** Destaque da mola de torção do braço mecânico (fonte própria)

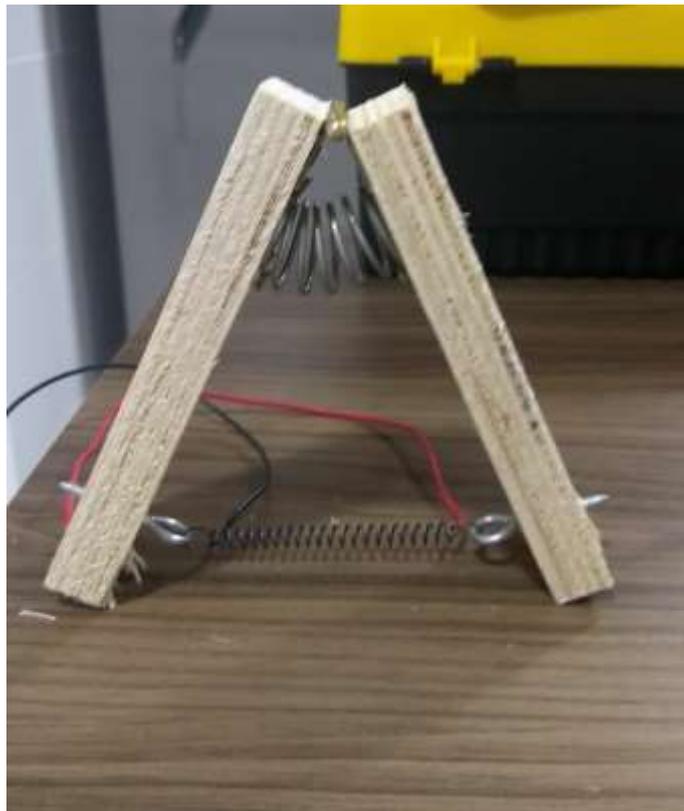
Posteriormente a carga térmica é retirada, ou seja, a corrente elétrica é suspensa e a mola de SMA resfria e volta ao estado martensítico novamente. No entanto esse retorno a fase inicial do ciclo, assim como visto no capítulo 3 no efeito de memória de forma One-Way, não faz a mola recuperar as dimensões tidas anteriormente na fase martensítica, isto é, sua forma macroscópica continua a mesma. Nesse momento que a mola de torção de aço atua no braço, ela por estar previamente tensionada, força a mola de SMA a se expandir e recuperar a dimensão que tinha no início do ciclo na fase martensítica.

Por meio de diversas ativações da mola de SMA ocorrerá o ciclo termomecânico do atuador e com isso o braço irá se movimentar.

## 4.2 - Montagem do Braço Mecânico

A construção do protótipo de acordo com o projeto se mostrou de maior complexidade do que o esperado. A fabricação do braço por impressão 3D e da mola de torção tiveram preço e acesso proibitivos.

Dessa forma foi construído um protótipo utilizando-se de materiais de menor custo e mais fácil acesso.



**Figura 4-3:** Segundo protótipo montado (fonte própria)

O protótipo foi construído com duas barras de madeira MDF unidas por uma dobradiça metálica. A mola de aço de torção foi substituída por uma mola de aço de compressão. A montagem das molas segue a mesma lógica do projeto original, a mola de SMA se posiciona na extremidade das hastes, de forma que sua ativação provoca um movimento de contração de todo o sistema. A mola de aço fica localizada entre as hastes, de forma a resistir a movimentação da mola de SMA. O conjunto montado pode ser visualizado, em sua posição de repouso, na imagem 4-4.

O protótipo tem as seguintes dimensões: cada braço possui 14 cm de comprimento, 4 cm de largura e 1,5 cm de espessura. A mola de aço possuía 4 cm de comprimento, diâmetro de 2 cm e 7 espiras. A mola de SMA possui 2 cm de comprimento quando não apresenta deformações, 0,5 cm de diâmetro e 21 espiras.

Ao aplicar o carregamento da corrente elétrica na mola de SMA ela se contrai, movimentando as hastes e comprimindo a mola de aço. Essa é a posição ativa do sistema, com a mola de SMA em seu estado austenítico, como pode ser observado na figura 4-5.



**Figura 4-4:** Segundo protótipo carregado (fonte própria)

## Capítulo 5

### 5. O Desenvolvimento do Protótipo de Testes do Braço Mecânico

Apesar de funcional, utilizar o modelo construído implicaria em várias dificuldades para realizar os testes e experimentos necessários para avaliar o desempenho e o comportamento do protótipo. Um exemplo dessa complicação seria a dificuldade de utilizar uma célula de carga para avaliar os esforços durante os ciclos da mola de SMA.

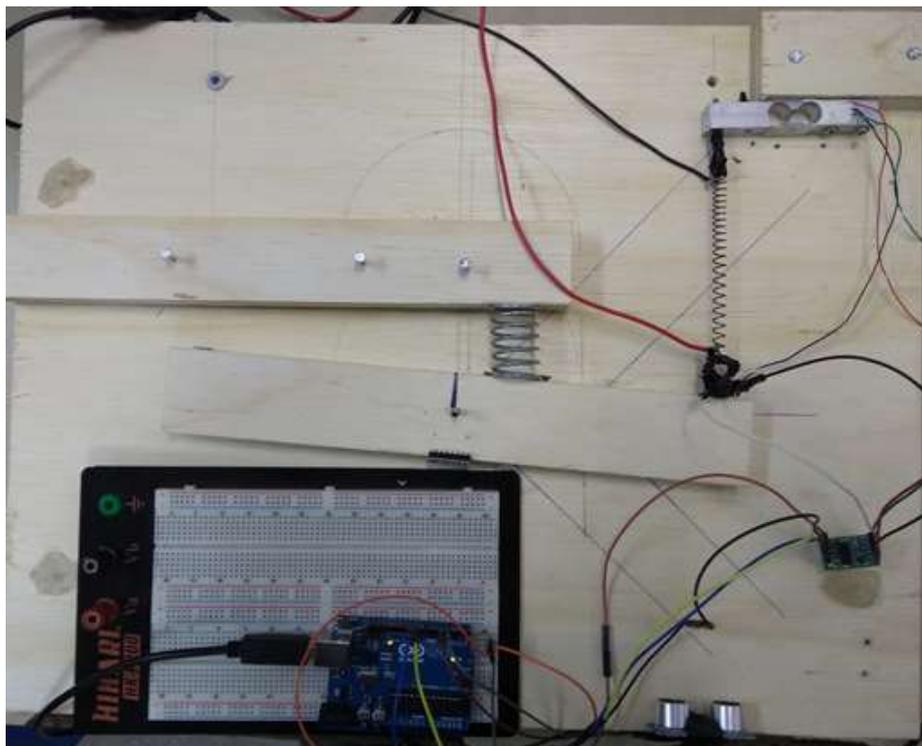
Após essa primeira reflexão, novamente foram feitos estudos para desenvolver-se um novo protótipo de teste, desta vez buscando uma forma de facilitar a realização dos testes envolvendo a mola, e ao mesmo tempo almejando uma semelhança com o que se desejava como protótipo final do braço.

#### 5.1 - O Desenvolvimento da Mesa de testes

O novo modelo desenvolvido foi feito usando o material MDF e foi feito com uma mesa e duas hastes de MDF. O MDF foi utilizado em função de seu baixo custo e sua extrema leveza permitindo que a livre movimentação da mola e uma quase ausência de atrito, o mesmo foi desconsiderado nestas análises devido a sua irrelevância neste protótipo.

A primeira haste foi fixada num ponto de forma a permitir sua rotação em torno do próprio eixo. A segunda haste foi fixada paralela a primeira. Após essa montagem foi instalado na mesa a célula de carga, a mola de aço foi fixada entre a haste móvel e uma haste fixa e por fim foi colocada a mola de SMA entre a ponta da haste móvel e a célula de carga. A mesa montada pode ser vista na imagem 5-1.

As dimensões da mesa de teste são dadas por 45 cm de comprimento, 35 cm de altura e as duas hastes possuíam 28 cm de comprimento, 4 de largura e tanto a mesa como as hastes possuíam 1,5 cm de espessura. As molas usadas são as mesmas mostrada

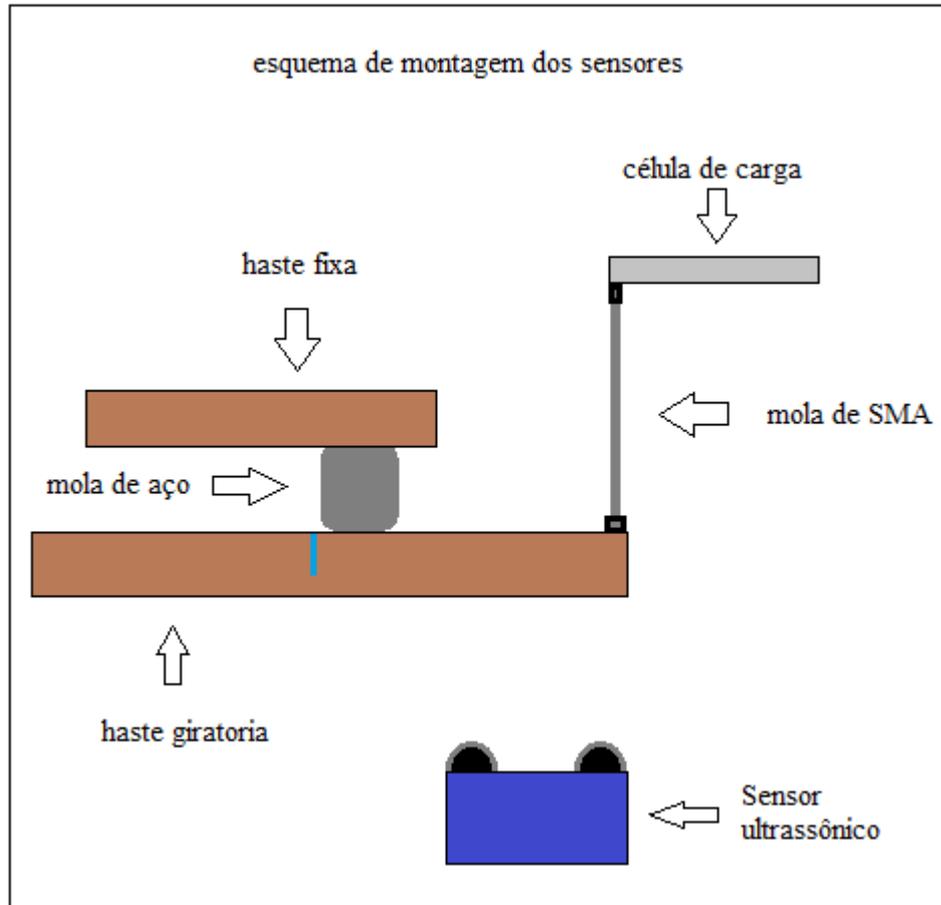


**Figura 5-1:** Mesa de testes (fonte própria)

A mesa de teste possibilita então a obtenção de informações importantes durante o funcionamento do sistema como força exercida pela mola de SMA, variação linear do comprimento da mola e variação angular da haste.

## 5.2 - Instrumentação do Protótipo de Testes

Para obter-se os dados relacionados ao comportamento da mola de SMA durante os testes, foram empregados sensores. Um sensor para detecção de movimento, uma célula de carga para detecção de esforços e um Arduino que é hardware capaz de integrar e permitir que esses monitoramentos ocorressem de forma simultânea e controlada em função do tempo.

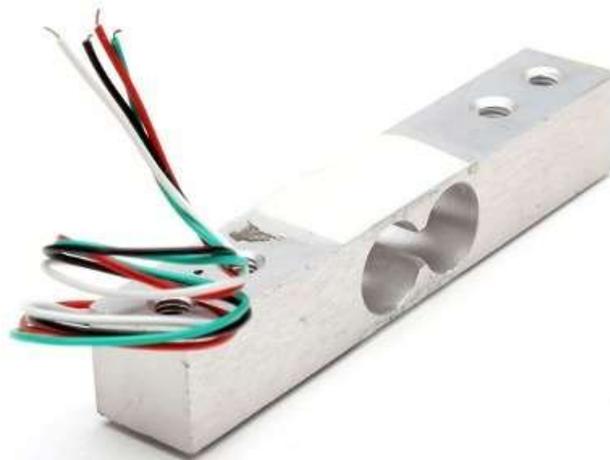


**Figura 5-2:** esboço do esquema de montagem da mesa de teste

### 5.2.1 - Célula de Carga

O sensor utilizado para monitorar os esforços feitos pela mola de SMA foi uma célula de carga, instalada junto com um amplificador de sinais.

A célula de carga é um transdutor de força, ou seja, ela converte as leituras de cargas aplicadas sobre ela em uma saída elétrica mensurável. A célula de carga é feita de alumínio, podendo ser levemente deformada elasticamente quando submetida a esforços. Essas micro deformações são medidas e posteriormente interpretadas pelo sensor eletrônico, o amplificador de sinal.



**Figura 5-3:** Modelo de célula de carga utilizado nos testes

Nas análises feitas a célula de carga empregada, foi usada para monitorar os esforços feitos pela mola de SMA durante suas transformações de fase enquanto era submetida aos ciclos de carregamento de corrente elétrica.

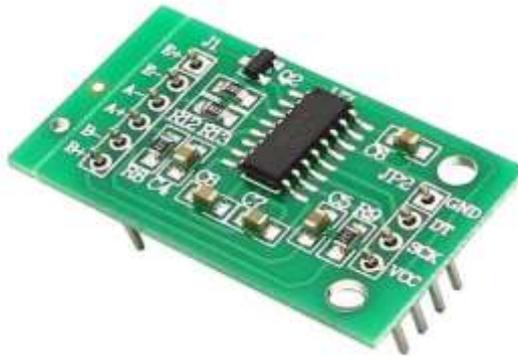
Para que o software faça a leitura correta da célula de carga é necessário entrar com um fator de correção no código de programação. Este fator é encontrado utilizando-se de pesos padrões e tentativa e erro até que os resultados vistos no programa sejam iguais aos pesos padrões.



**Figura 5-4:** pesos padrões utilizados (fonte própria)

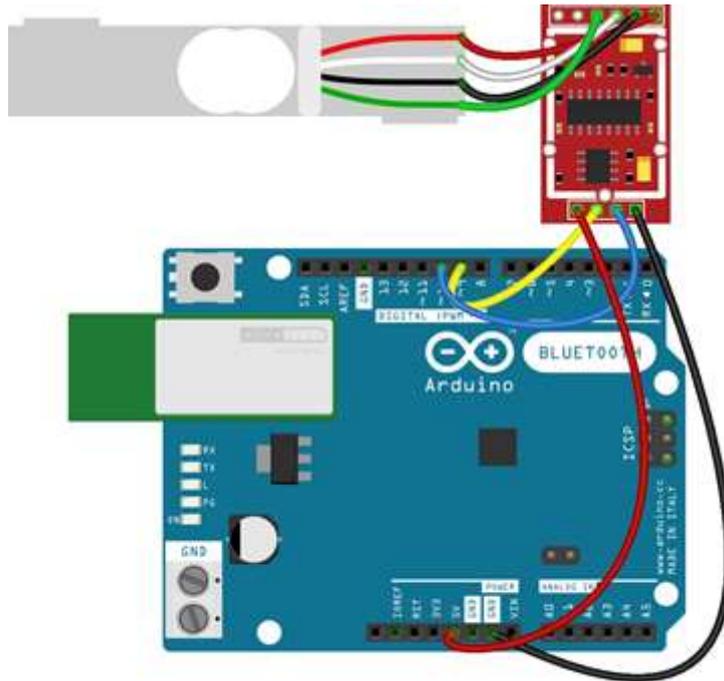
### 5.3.2 - Amplificador de sinal da célula de carga

O amplificador de sinal se faz necessário devido a saída de sinais da célula de carga ter um nível relativamente baixo. Esse baixo nível de sinais torna difícil o monitoramento e aumenta a presença de ruídos no sinal obtido. O amplificador de sinal eleva o nível do sinal, aumentando a resolução da medição e melhorando a relação sinal e ruído. Além disso, o sistema usado para integrar os sensores, o Arduino, não possui a capacidade de ler os sinais enviados pela célula de carga diretamente, se fazendo necessário o emprego do amplificador de sinal.



**Figura 5-5:** amplificador de sinal hx711

O amplificador de sinal utilizado, modelo hx711, para fazer a ponte de transmissão de sinal entre a célula de carga e o Arduino.



**Figura 5-6:** Esquema da montagem individual da ponte entre célula de carga e Arduino utilizando o amplificador

### 5.3.3 – Sensor de Distância Ultrassônico

O sensor de distância ultrassônico foi empregado para monitorar o movimento da haste de madeira em função da mudança de fase da mola SMA durante os ciclos de carregamento de corrente elétrica.

O sensor ultrassônico funciona a partir da emissão de ondas sonoras utilizadas para medir a distância entre a haste e o sensor.

O sensor possui um emissor e receptor de ultrassom. O emissor emite uma onda na frequência do ultrassom, parte dessa onda é refletida em um objeto que esteja na frente do sensor e retorna para o receptor. Com isso o sensor determina o tempo que a onda levou para ir e voltar até ele. Com esse dado o próprio sensor determina a distância por meio da divisão do tempo pela velocidade do som e por dois devido ao tempo percorrido na ida e na volta.

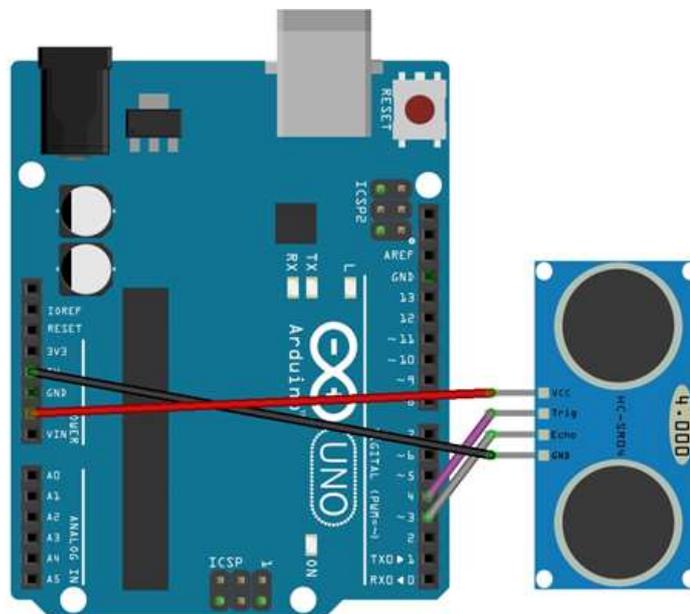
O sensor ultrassônico usado nos testes foi o modelo HC-SR04.



**Figura 5-7:** Sensor de distância ultrassônico

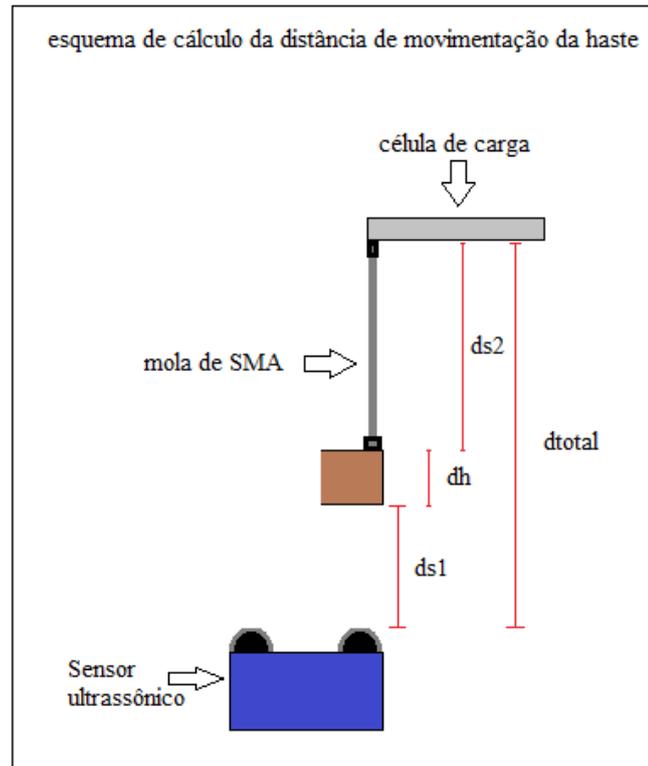
O sensor foi instalado alguns centímetros abaixo da ponta da haste móvel, de forma que fique ortogonal a ponta da haste.

O sensor de distância ultrassônico foi ligado diretamente ao Arduino, pois não necessita de um amplificador de sinal.



**Figura 5-8:** Esquema da montagem individual do sensor de distância ultrassônico e o Arduino

O sensor de distância ultrassônico mede diretamente a distância entre ele e a haste ( $ds1$ ) a distância chave a ser analisada é a distância entre a haste móvel e a célula de carga ( $ds2$ ). Essa medida representa a variação de tamanho observada na mola de SMA durante os testes.



**Figura 5-9:** Esboço do esquema de cálculo da distância de movimentação da haste móvel

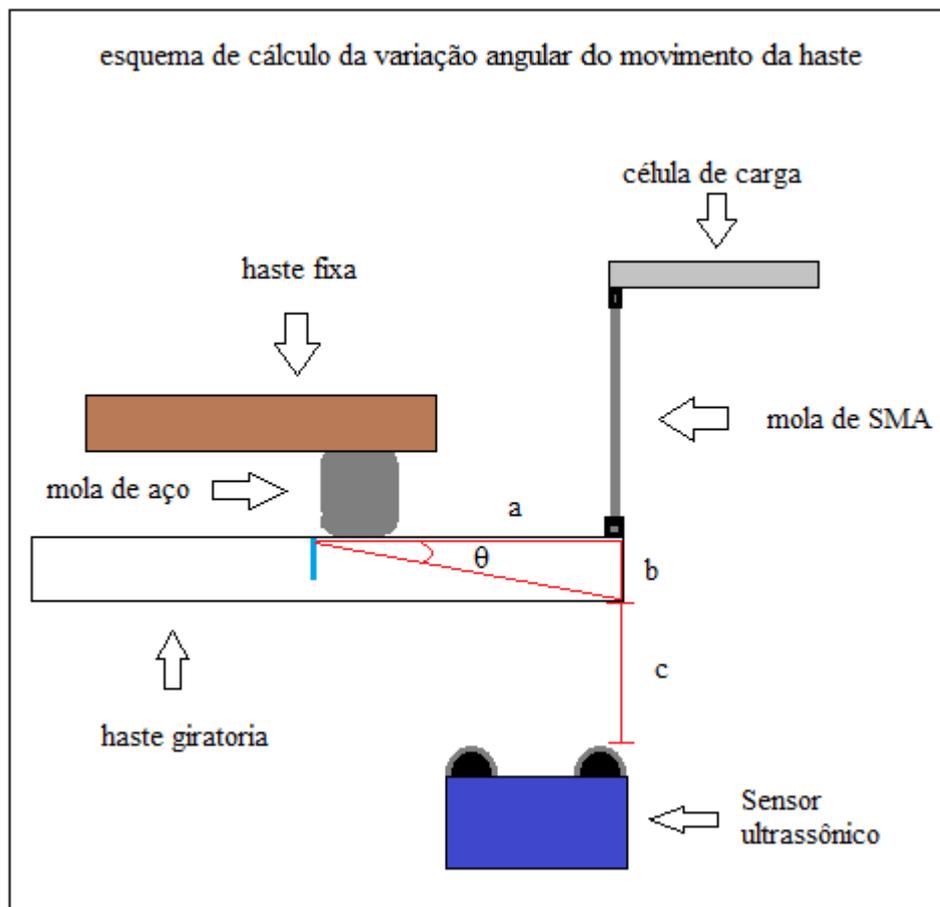
Por meio do esquema a seguir fica claro que para se obter a variação do comprimento da mola de SMA basta seguir a equação abaixo.

$$dtotal - (ds1 + dh) = ds2 \quad (5.1)$$

Por meio dessa equação se obtém a variação do tamanho da mola de SMA durante os ciclos ( $ds2$ ).

É possível, também, se obter a variação angular do movimento da haste. Como pode ser visto na figura a seguir, sendo (a) o comprimento ativo da haste, aquele que equivale a um lado do braço mecânico, e (c) a distância medida pelo sensor naquele instante, (b) pode ser definida como a diferença entre a distância medida com a haste na posição inicial e a posição medida no instante  $t$  do tempo. Dessa forma é possível utilizar a relação trigonométrica e definir a posição angular naquele momento através da equação a seguir.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (5.2)$$



**Figura 5-10:** Esboço esquema de cálculo da variação angular do movimento da haste

### 5.3.4 – Arduino UNO

O equipamento que permitiu o funcionamento dos sensores e a obtenção dos dados em conjunto durante os testes foi o Arduino.

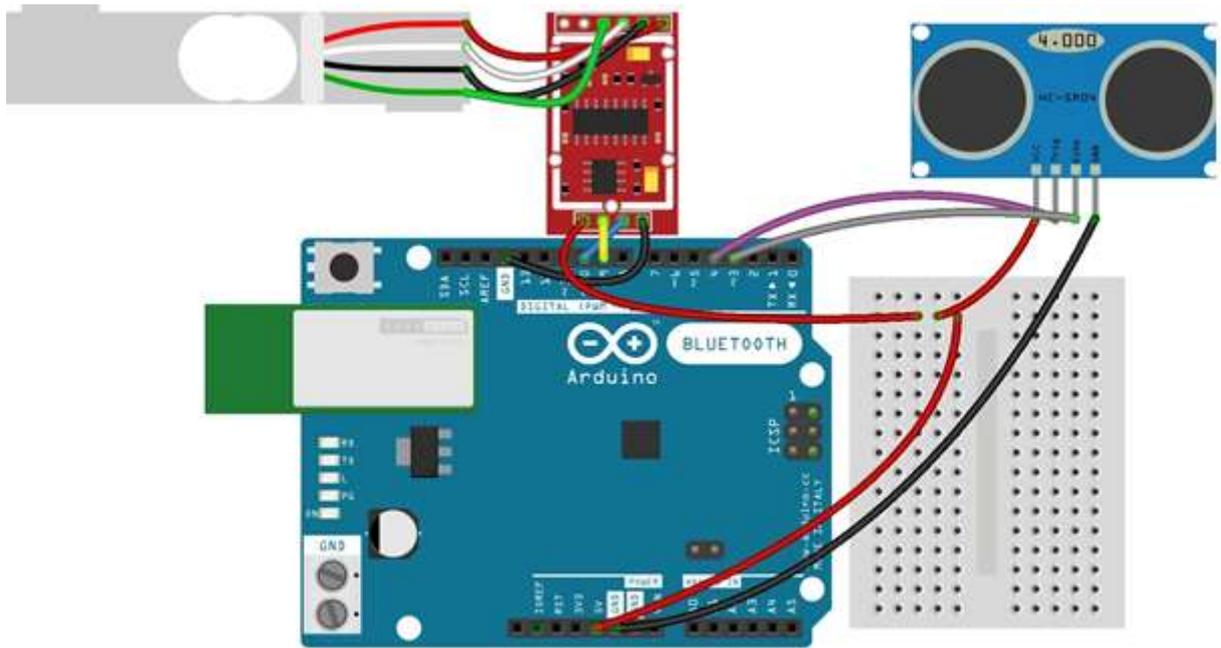
O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica, com suporte de entrada e saída, com um microcontrolador e com linguagem de programação padrão, c ou c++. O Arduino é uma ferramenta de extrema simplicidade e objetiva a criação de controladores de fácil prototipagem, baixo custo e fácil acessibilidade. ele pode ser usado em projetos independentes ou pode ser conectado a um computador.

A principal função do Arduino é facilitar a prototipagem, implementação ou emulação do controle de sistemas interativos da mesma forma que o controle lógico programável (CLP) controla sistemas industriais.

Existem uma enorme variedade de modelos de Arduino, focados em variados tipos de necessidade. neste protótipo foi usado o modelo UNO e nele foram ligados o amplificador de sinal da célula de carga e o sensor ultrassônico.



**Figura 5-11:** Arduino UNO



**Figura 5-12:** Esquema de montagem do sensor de distância ultrassônico em conjunto com a célula de carga e seu amplificador

## Capítulo 6

### 6. Caracterização das Molas utilizadas

#### 6.1 - Caracterização da mola de aço

Durante o preparo do protótipo de teste, foram obtidas algumas molas de compressão para serem feitas as avaliações de adequação ao projeto, ou seja, verificar se a mola de aço possui um módulo elástico que se comporte de forma a permitir a mudança de comprimento da mola de SMA, em função da mudança de fase, e ao mesmo tempo fosse capaz de gerar um esforço suficiente para fazer a haste movida pela mudança de fase da mola de SMA, retornar à posição original.

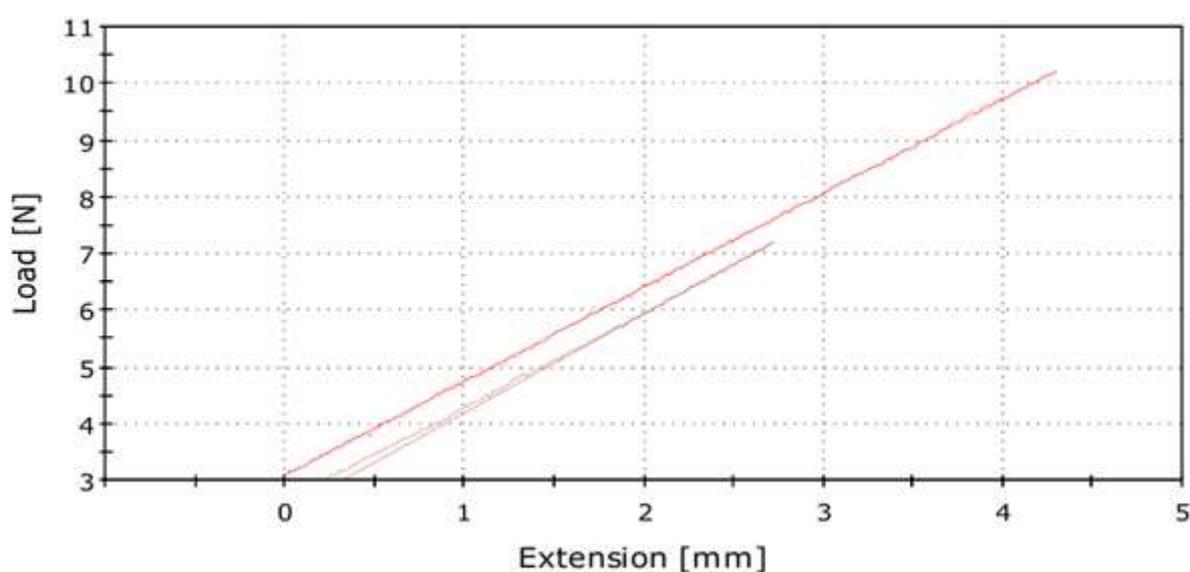
A mola de aço usada no projeto passou por um ensaio de compressão, na máquina *Instron*, para se averiguar se ela seria adequada ao protótipo de teste e ao protótipo final.



**Figura 6-1:** máquina de teste durante o teste de compressão da mola de aço (fonte própria)

O ensaio de compressão é feito quando se busca determinar o comportamento e as propriedades de um material em determinadas situações. O teste avalia o como o material se comporta quando pressionado por uma carga axial compressiva enquanto constrói um gráfico de tensão-deformação. No caso do teste sendo feito numa mola o gráfico de tensão-deformação produzido irá revelar um coeficiente angular, conhecido também como a constante da mola ou o módulo elástico da mola.

O ensaio feito na mola de compressão preparou o gráfico de tensão-deformação mostrado na figura 6-2.



**Figura 6-2:** Gráfico da tensão-deformação mola de aço (fonte própria)

O gráfico mostra o comportamento da mola de compressão durante um teste com velocidade de 10 mm/min e com carregamento máximo de 11 N

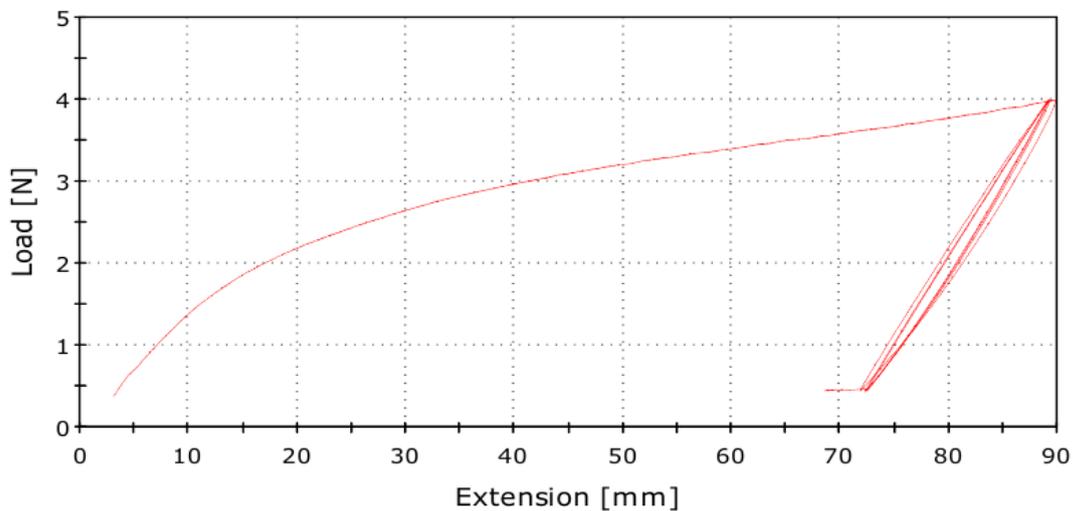
## 6.2 - Caracterização da mola de liga de memória de forma

A liga de memória de forma usada neste projeto, como dita em capítulos anteriores, foi o NiTi. Detentor de ótimas propriedades mecânicas. Para ela foi feito um ensaio de tração.

### 6.2.2 - Teste de tração da mola de liga de memória de forma

Assim como no ensaio de compressão da mola de aço o ensaio de tração da mola de SMA foi feito buscando determinar o comportamento e as propriedades do material em determinadas situações. O teste avalia como o material se comporta quando tracionada por uma carga axial trativa com aumento constante enquanto constrói um gráfico de tensão-deformação.

Do mesmo modo que no caso da mola de aço, o teste irá construir um gráfico de tensão-deformação e irá expor o modulo elástico da mola de SMA.



**Figura 6-3:** teste de tração da mola de SMA (fonte própria)

O teste foi feito utilizando uma velocidade de carregamento de 2 mm/min e um carregamento de até 4 N.

## Capítulo 7

### 7. Metodologia dos Testes do Protótipo de testes

Os testes feitos com o protótipo experimental objetivavam avaliar o comportamento do braço mecânico através dos variados ciclos de carregamento térmico na mola de SMA. Para auxiliar no fornecimento e controle da corrente elétrica aplicada na mola de SMA foi utilizada uma fonte, modelo HY3003E-3, que permitiu alto grau de precisão nos testes e controle das correntes elétricas utilizadas.



**Figura 7-1:** fonte HY3003E-3 (fonte própria)

Foram feitos diversos ciclos de teste, divididos em 4 grupos, com corrente elétrica aplicada constante durante intervalos de tempo pré-definidos. As correntes elétricas aplicadas foram de 1A, 1,5A, 2A, 2,5A. Necessário frisar que, em cada um dos intervalos de tempo, foram testadas individualmente e controladamente cada uma das correntes elétricas, anteriormente, citadas.

## 7-1 Roteiro dos testes

### TESTE 1 (intervalos de 1 minuto)

1. Carregamento da corrente elétrica máxima na mola de SMA em aproximadamente 5 segundos;
2. Permanência da corrente elétrica durante intervalo de 1 minuto;
3. descarregamento da corrente elétrica máxima aplicada na mola de SMA em aproximadamente 5 segundos;
4. repouso para resfriamento da mola de SMA durante 1 minuto;
5. repetir os passos de 1 a 4 até totalizar 6 ciclos completos;
- Tempo total de realização do teste é de 12 minutos;

### TESTE 2 (intervalos de 2 minutos)

1. Carregamento da corrente elétrica máxima na mola de SMA em aproximadamente 5 segundos;
2. Permanência da corrente elétrica durante intervalo de 2 minutos;
3. descarregamento da corrente elétrica máxima aplicada na mola de SMA em aproximadamente 5 segundos;
4. repouso para resfriamento da mola de SMA durante 2 minutos;
5. repetir os passos de 1 a 4 até totalizar 6 ciclos completos;
- Tempo total de realização do teste é de 24 minutos;

### TESTE 3 (intervalos de 3 minutos)

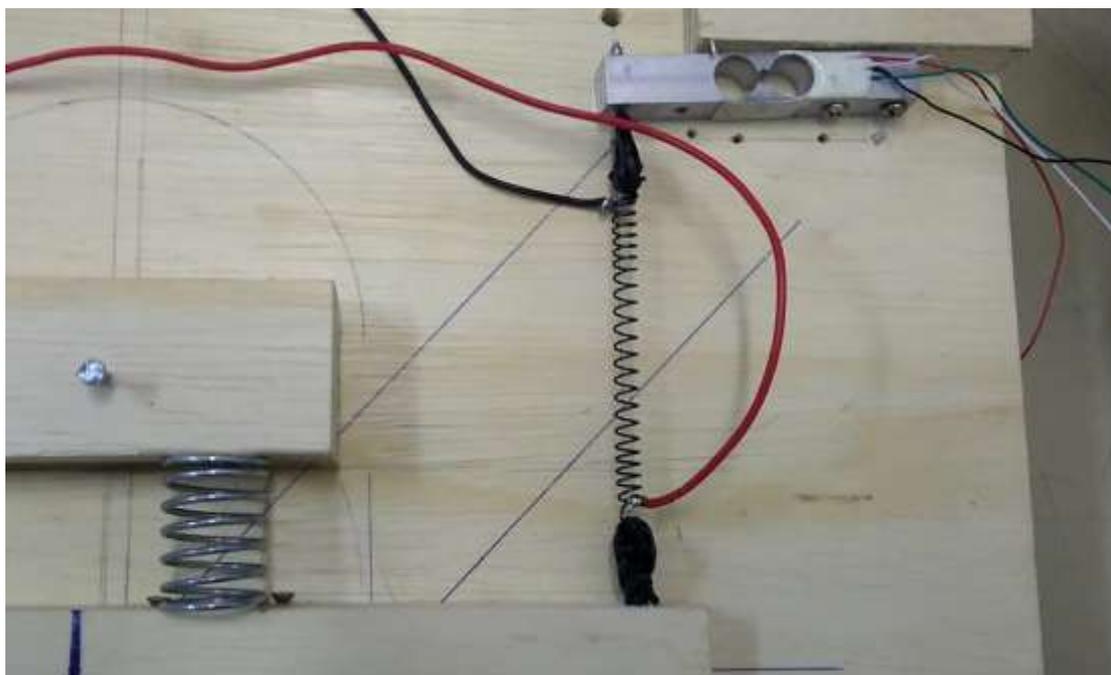
1. Carregamento da corrente elétrica máxima na mola de SMA em aproximadamente 5 segundos;
2. Permanência da corrente elétrica durante intervalo de 3 minutos;
3. descarregamento da corrente elétrica máxima aplicada na mola de SMA em aproximadamente 5 segundos;
4. repouso para resfriamento da mola de SMA durante 3 minutos;
5. repetir os passos de 1 a 4 até totalizar 6 ciclos completos;
- Tempo total de realização do teste é de 36 minutos;

Em cada um dos intervalos de tempo foram feitos testes com cada uma das correntes elétricas previamente definidas.

## Capítulo 8

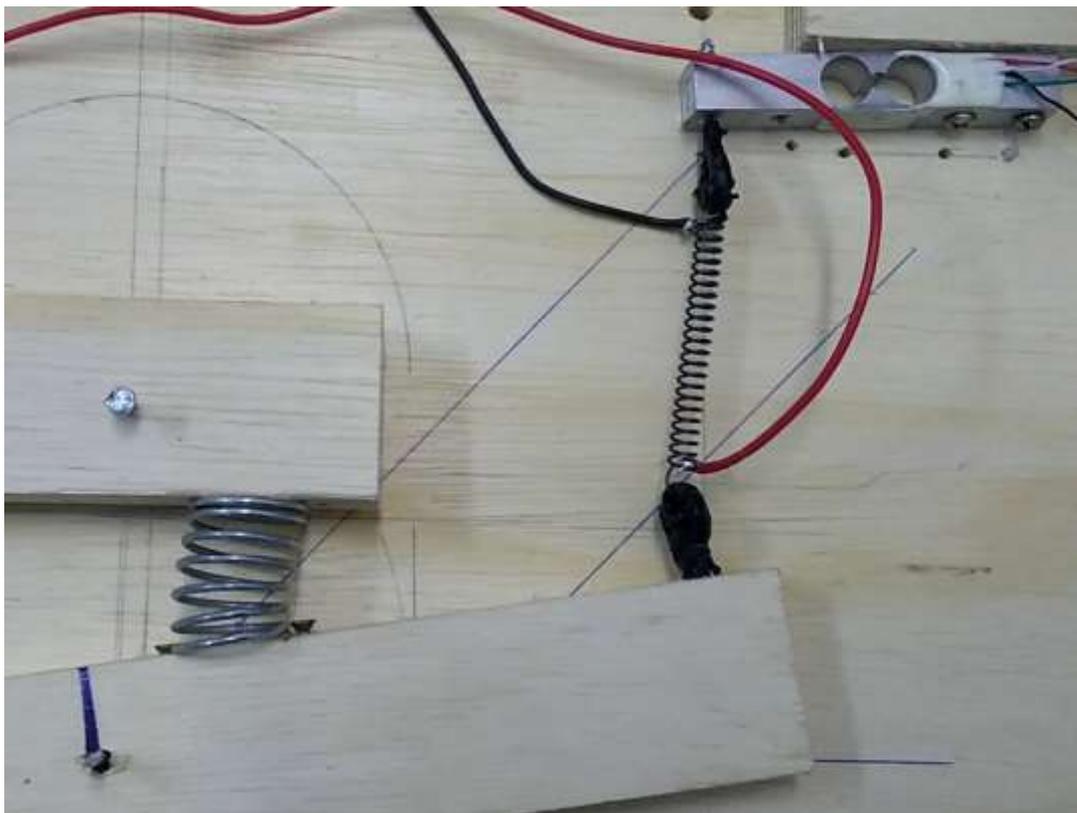
### 8. Análise dos Resultados obtidos

Antes de dar início a análise dos resultados dos testes feitos com o protótipo de teste, é relevante descrever o comportamento esperado pelo protótipo durante os testes.



**Figura 8-1:** Estado inicial do protótipo de testes (fonte própria)

o protótipo inicialmente com a haste em posição inicial e com a mola de aço previamente tensionada, tem o carregamento de corrente elétrica aplicado a mola de SMA. Após alguns segundos se inicia o processo de transformação de fase, com o início da transformação a mola de SMA tende a reduzir seu comprimento, fazendo a haste se mover no sentido anti-horário. A partir desse movimento ocorre a compressão da mola de aço. Ao fim da transformação de fase, a mola de SMA estabilizou seu comprimento, a haste está em repouso após ter se movido alguns graus em torno do próprio eixo e a mola de aço encontra-se comprimida.



**Figura 8-2:** Carregamento aplicada a mola de SMA (fonte própria)

Após o tempo estipulado de carregamento ser encerrado, o carregamento de corrente elétrica é retirado. A partir disso dá-se início ao período de resfriamento da mola de SMA. nesse intervalo de tempo a mola de SMA irá dar início, novamente, a transformação de fase migrando para a fase martensítica e a mola de aço, em função da compressão sofrida, irá submeter a mola de SMA a um esforço capaz de fazer ela retornar ao estado inicial e, conseqüentemente, a haste retornar ao estado inicial.

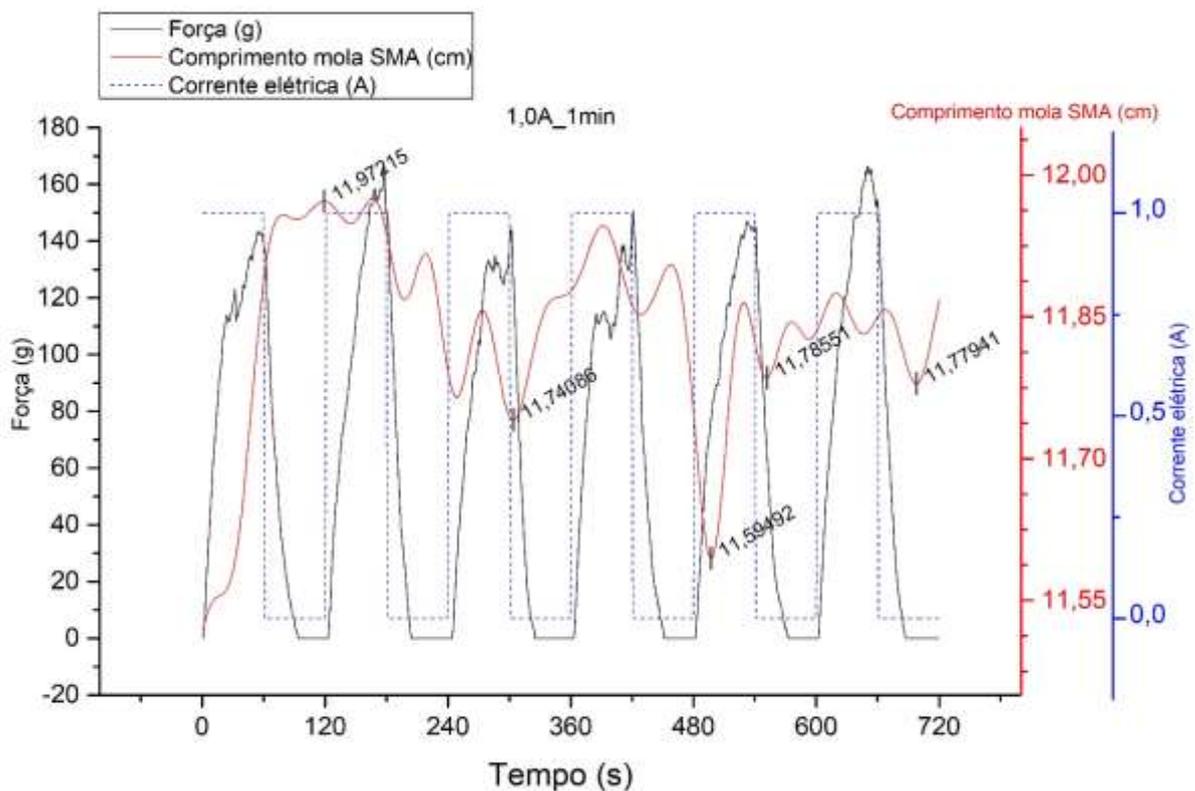
Devido à natureza dos sensores, os resultados encontrados apresentaram grandes flutuações provenientes de ruídos do sistema. Para amenizar esse transtorno, e facilitar a visualização dos gráficos aqui expostos, foi utilizada a ferramenta presente no aplicativo empregado para gerar os gráficos. O aplicativo utilizado foi o *origin*, e a função *smooth* foi utilizada para aplicar um filtro, do tipo FFT (*fast fourier transform*), nas leituras feitas pelo sensor de ultrassom afim de suavizar as linhas do gráfico de comprimento da mola de SMA. Caso contrário, não havendo a aplicação do filtro, a avaliação dos gráficos e de suas leituras seria algo complicado de visualizar. A aplicação do filtro não compromete os resultados obtidos pelos testes pois ela suaviza apenas os pontos que sofreram com ruídos durante a obtenção dos dados, tais pontos não representam medidas reais obtidas durante os testes.

Ao observar os gráficos a seguir deve-se esperar encontrar um aumento da força da mola de SMA quando o carregamento da corrente elétrica se encontra ativo junto com uma redução do tamanho da mola de SMA e, por fim, uma elevação na variação do ângulo da haste. Durante os períodos em que a mola de SMA permanece sem o carregamento espera-se observar o aumento do comprimento da mola de SMA, junto com a redução do esforço feito pela mesma e uma redução na variação do ângulo da haste.

## 8.1 – Teste de 1 minuto e 1A

Os gráficos das figuras 8-3 e 8-4 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 1 minuto e 1A.

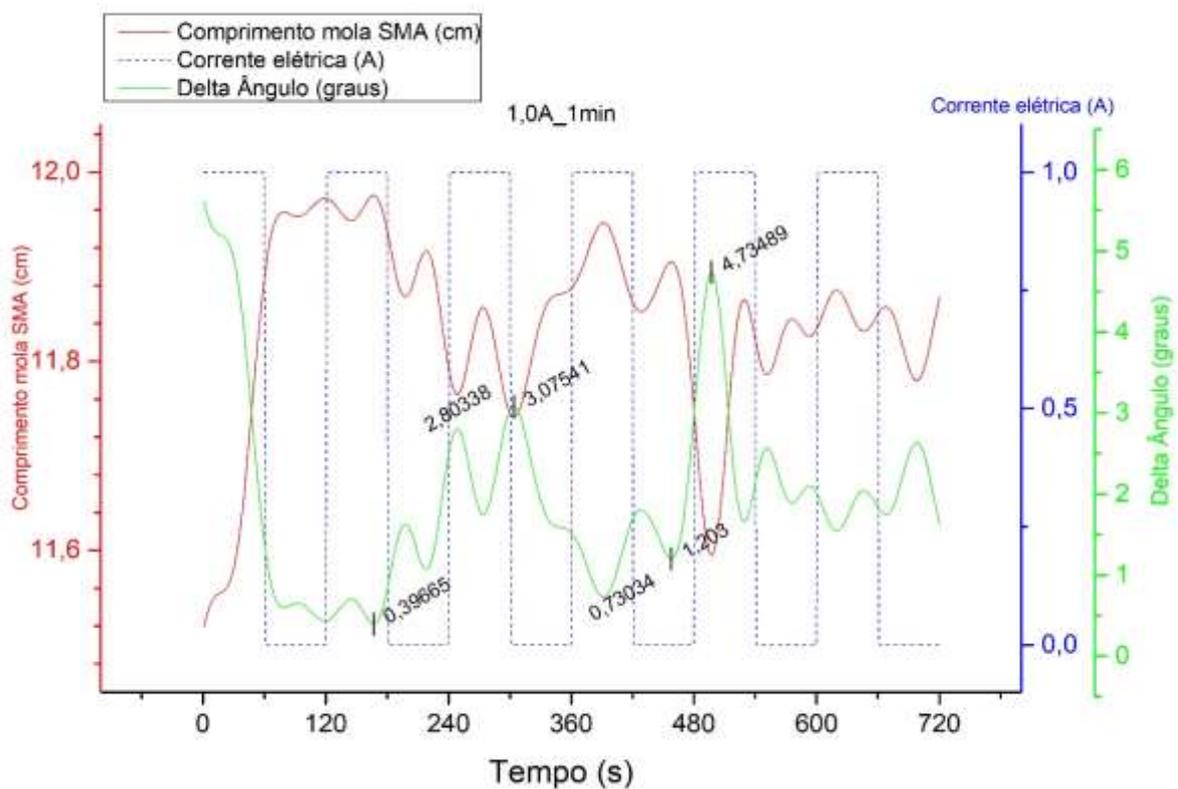
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 170g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 0,378 cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 4,735 graus.



**Figura 8-3:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 1A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-4:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minutos e 1A (fonte própria)

E possível observar que, durante os testes a mola de SMA não conseguiu realizar totalmente as transformações de fase. Tanto enquanto se transformava de martensita para austenita, durante os carregamentos de corrente elétrica, como quando fazia o retorno, durante os períodos sem carregamento. Portanto acredita-se que durante a maior parte do teste houve presença das duas fases do material simultaneamente, sendo em alguns momentos maioria

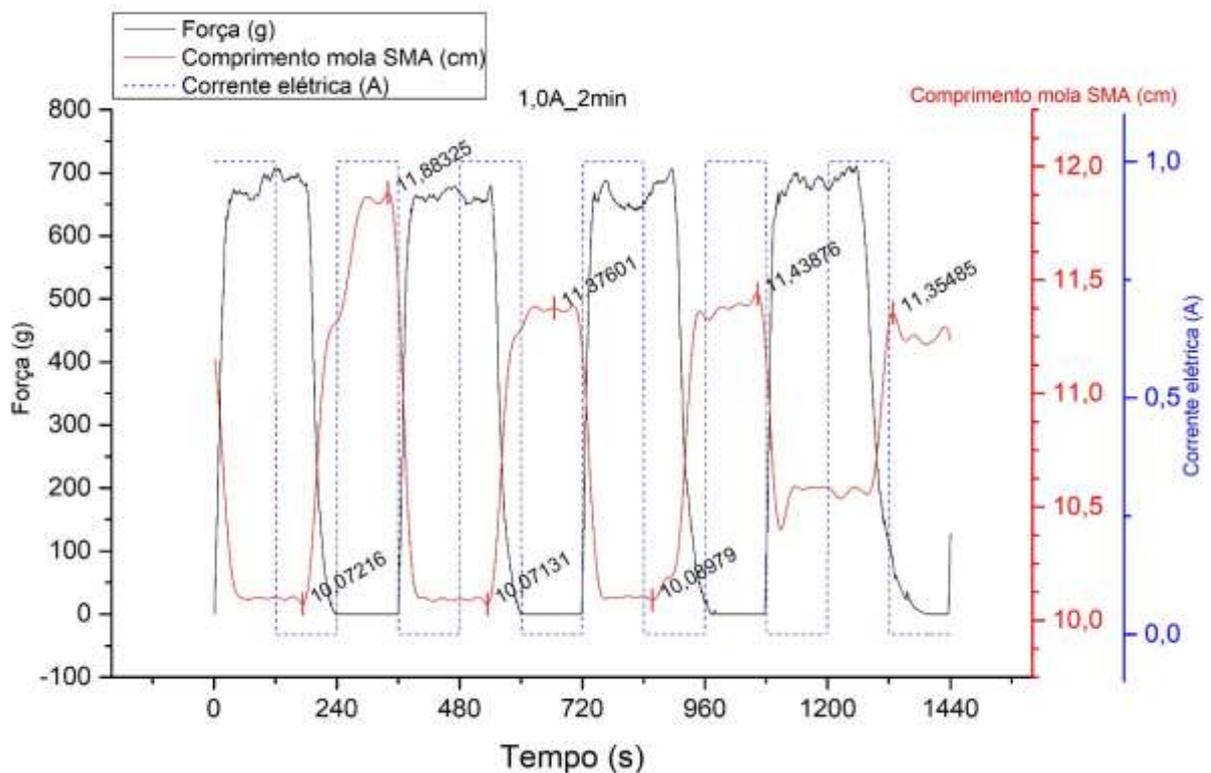
martensítica e em outros maioria austenítica. Esse comportamento está ligado a ausência de tempo hábil para fazer a transformação completa.

É necessário esclarecer que o comportamento visto nos gráficos anteriores foge do comportamento esperado do experimento. A força feita pela mola encontra-se com valores inferiores quando comparada aos outros experimentos deste capítulo, mesmo quando se compara a testes utilizando o mesmo carregamento de corrente elétrica. A variação do comprimento da mola também apresenta uma divergência de comportamento quando comparado aos outros experimentos deste capítulo. Esse comportamento fora do padrão esperado ocorre em função de interferências externas ao experimento, como a variação da temperatura no ambiente de testes, vibrações na mesa de testes e ruídos dos sensores durante as medições

## 8.2 – Teste de 2 minutos e 1A

Os gráficos das figuras 8-5 e 8-6 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 2 minutos e 1A.

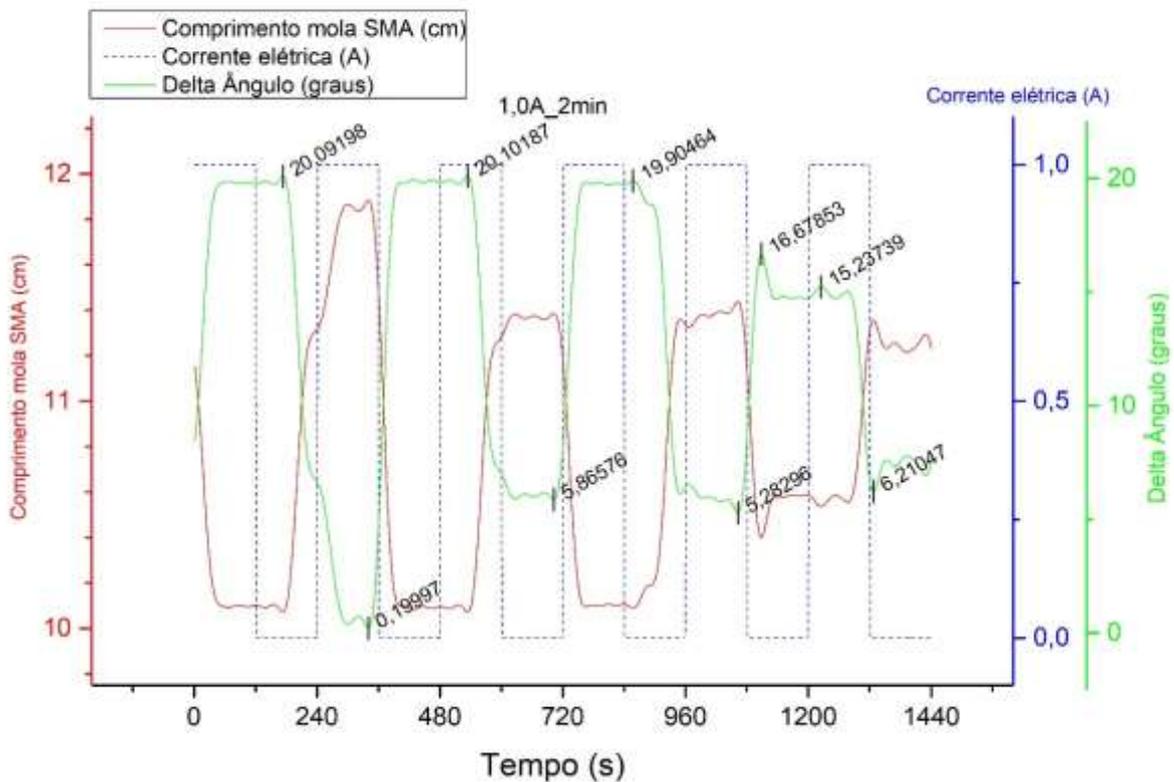
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 700g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,488 cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 20,109 graus.



**Figura 8-5:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 1A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



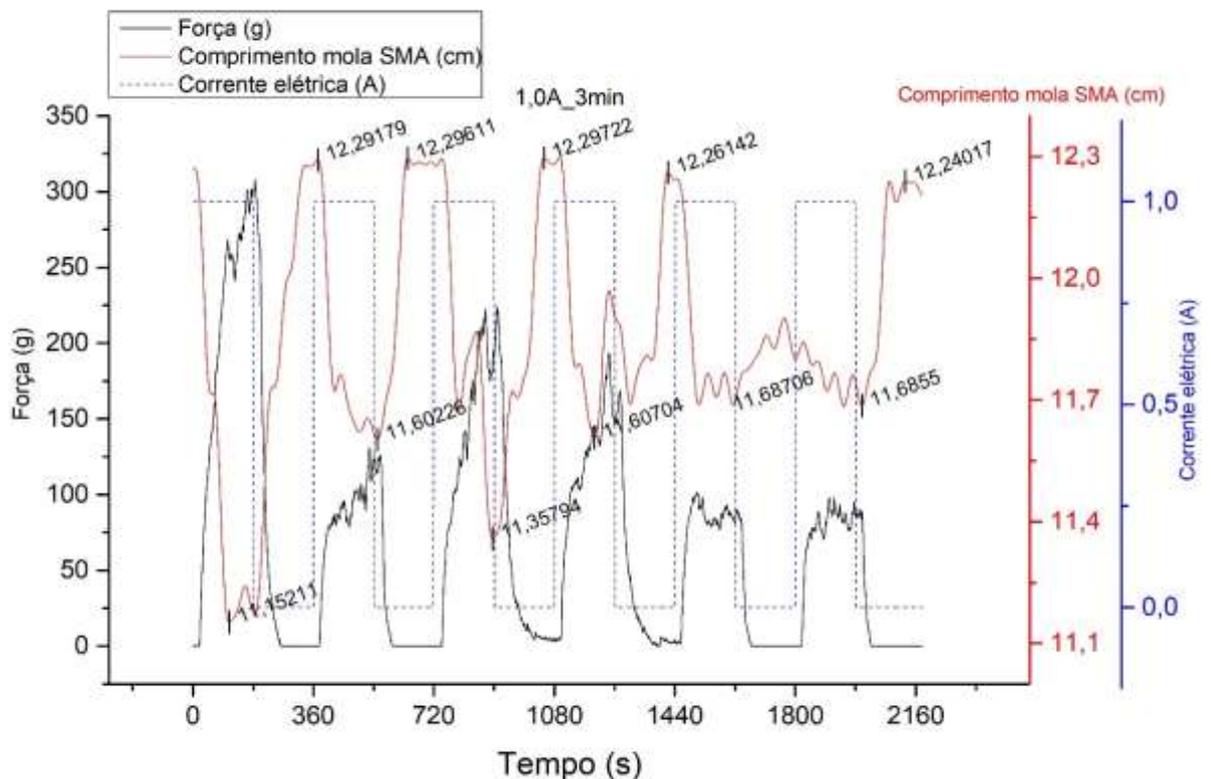
**Figura 8-6:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 1A (fonte própria)

No teste de 1A e 2 minutos observa-se o comportamento esperado do modelo de testes. Podendo ser visto com clareza os momentos em que ocorrem as transformações de fase. Fazendo a comparação com o teste anterior é possível ver um aumento da variação do comprimento da mola de SMA e um aumento da força feita pela mola de SMA, possivelmente isso ocorre em função de uma porcentagem maior da mola de SMA mudando de fase durante o teste devido ao maior intervalo de tempo disponível durante o carregamento e a retirada do carregamento.

### 8.3 – Teste de 3 minutos e 1A

Os gráficos das figuras 8-7 e 8-8 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 3 minutos e 1A.

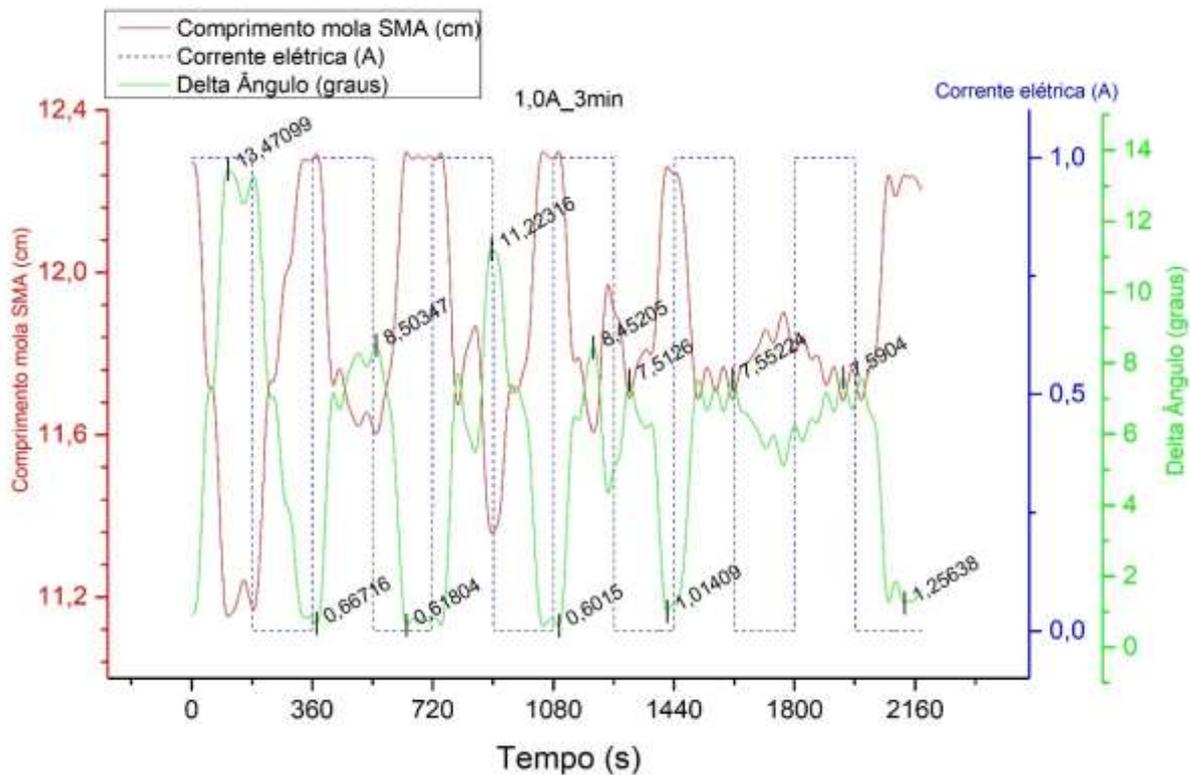
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 300g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 0,723 cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 13,471 graus.



**Figura 8-7:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 1A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-8:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 1A (fonte própria)

Assim como no teste de 1 minuto e 1A existiu a presença de interferência durante a realização deste experimento. O comportamento esperado era um intervalo expondo claramente os momentos em que ocorrem as transformações de fase e um esforço feito pela mola de SMA minimamente semelhante ao observado no teste de 1A e 2 minutos.

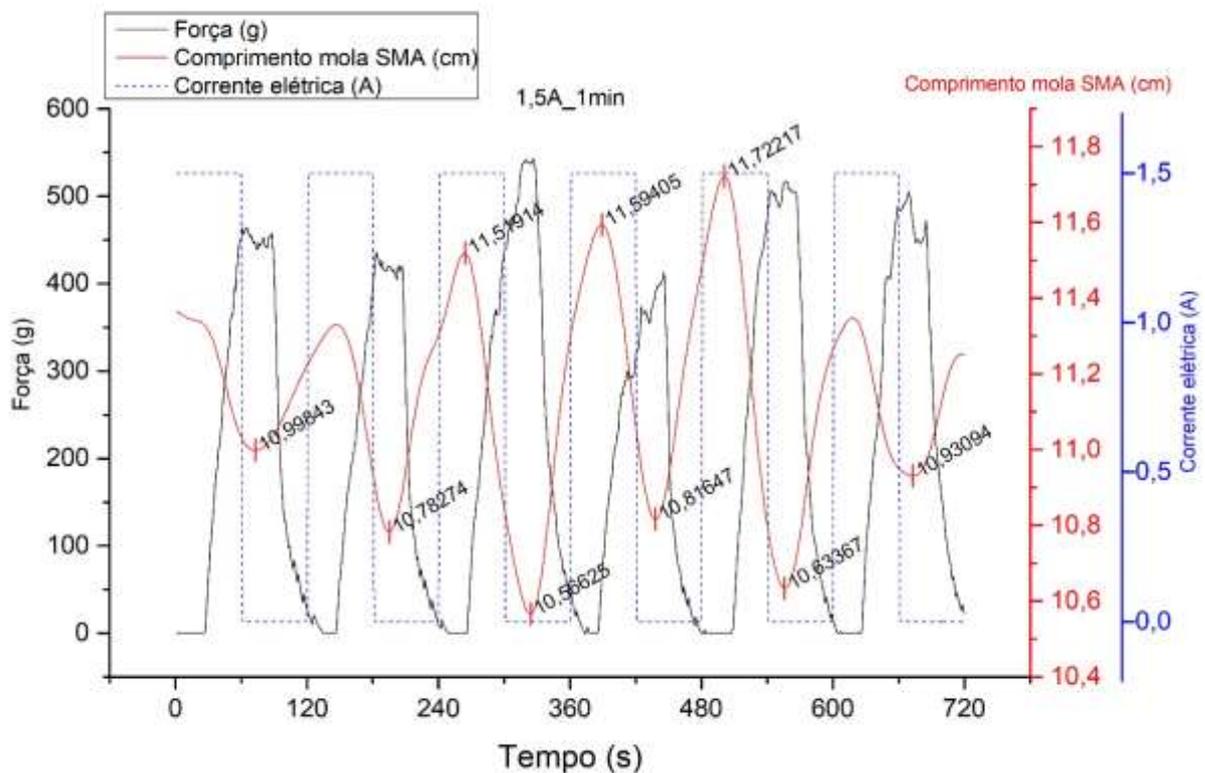
Verifica-se também que em comparação ao resultado anterior de 1 A e 2 minutos, os valores da força, variação média do comprimento da mola, e variação máxima do ângulo da

haste foram menores. Era de se esperar que com um tempo maior de aquecimento estes valores fossem maiores. Este resultado com valores menores pode ser interpretado como tendo um tempo maior de aquecimento a temperatura atingiu um valor maior, mas em compensação o tempo de resfriamento não foi suficiente para realizar uma transformação inversa que ocasiona uma distensão maior na mola de SMA, com o aumento de ciclos a mola tende a estabilizar o seu funcionamento com valores menores com relação ao teste anterior.

## 8.4 - Teste de 1 minuto e 1,5A

Os gráficos das figuras 8-9 e 8-10 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 1 minutos e 1,5A.

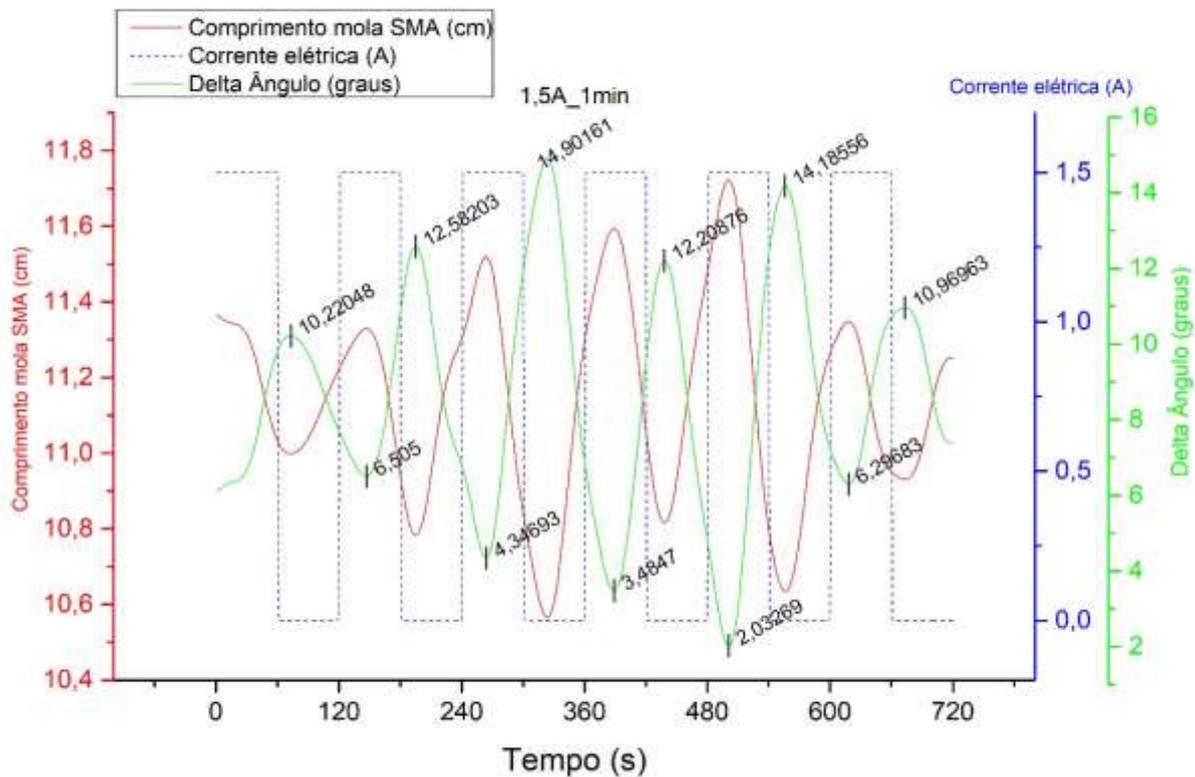
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 500g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 0,913 cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 14,902 graus.



**Figura 8-9:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 1,5A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito e reduzido é a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-10:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 1,5A (fonte própria)

Assim como no primeiro teste visto neste capítulo, 1 A e 1 minuto, e o teste de 2,5 A e 1 minuto, que será analisado posteriormente, pode-se observar que a mola não consegue responder ao ciclo de carregamento aplicado em tempo hábil. A mola de SMA neste teste a cada aplicação de carregamento dá início a mudança de fase se transformando e austenita ou mistura das fases austenítica e martensítica, no entanto o curto tempo de aplicação do carregamento de corrente elétrica não permite que a mola atinja o limite de modificação que

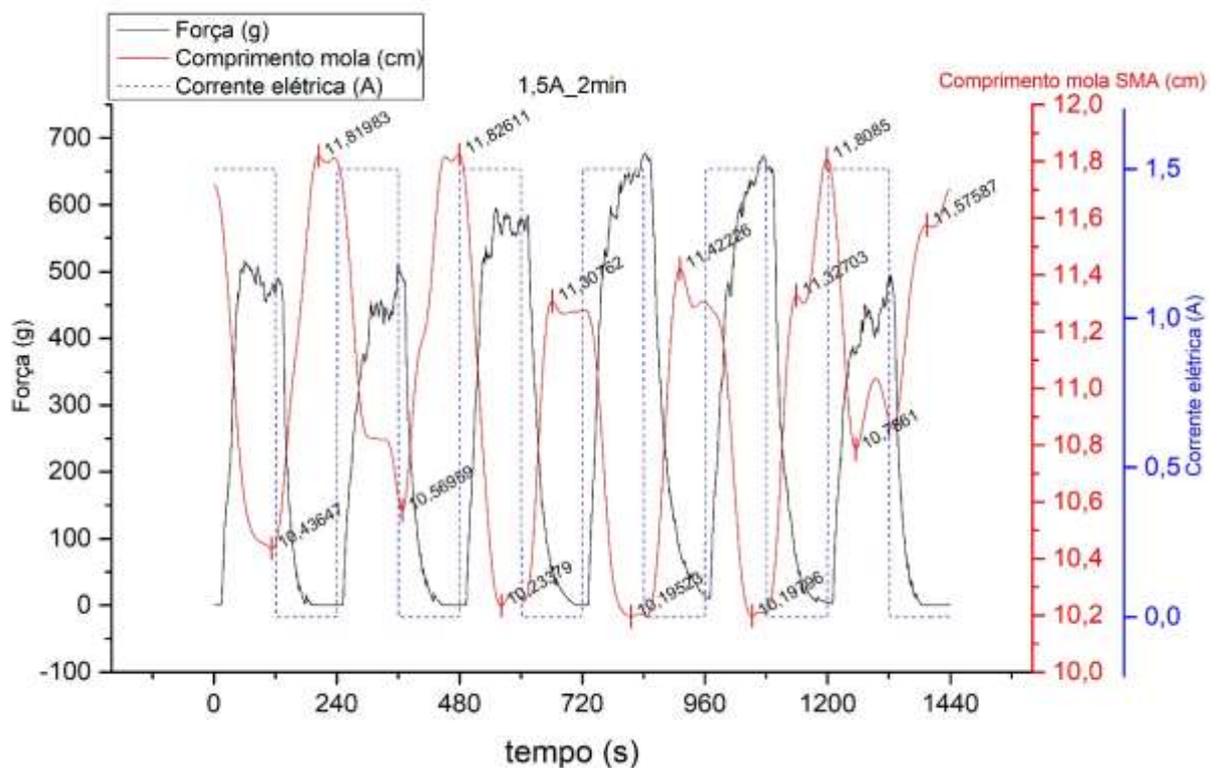
poderia ser atingido caso mais tempo fosse disponibilizado. O mesmo vale para a transformação que ocorre quando o carregamento é suspenso, a transformação de austenita para martensita não maclada ou uma mistura das variantes martensita maclada e não maclada.

Verifica-se que a variação no comprimento da mola neste teste foi superior ao teste com mesmo intervalo de tempo e 1 A. Isso ocorre devido ao aumento do valor de carregamento da corrente elétrica imposto sobre a mola de SMA. Verifica-se o mesmo aumento para a força que a mola de SMA faz no sistema.

## 8.5 - Teste de 2 minutos e 1,5A

Os gráficos das figuras 8-11 e 8-12 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 2 minutos e 1,5A.

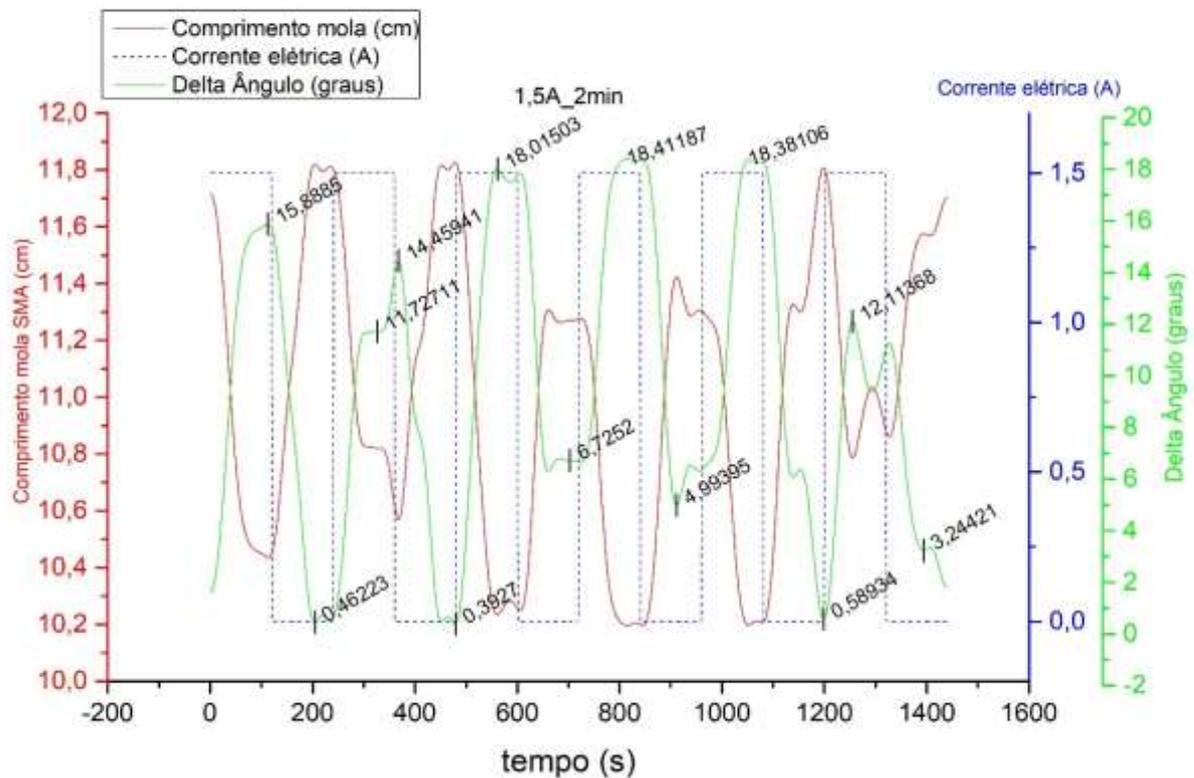
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 650g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,234cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 18,412 graus.



**Figura 8-11:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 1,5A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-12:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 1,5A (fonte própria)

Neste teste pode-se verificar que em relação ao teste de mesmo carregamento e com 1 minuto de ciclo, houve uma expansão dos valores medidos para a variação do comprimento da mola de SMA, a variação do ângulo da haste e a força feita pela mola de SMA. Isso ocorreu devido ao aumento do tempo disponível para a realização das transformações de fase do material durante o teste. Esse aumento de tempo disponível permitiu que uma maior

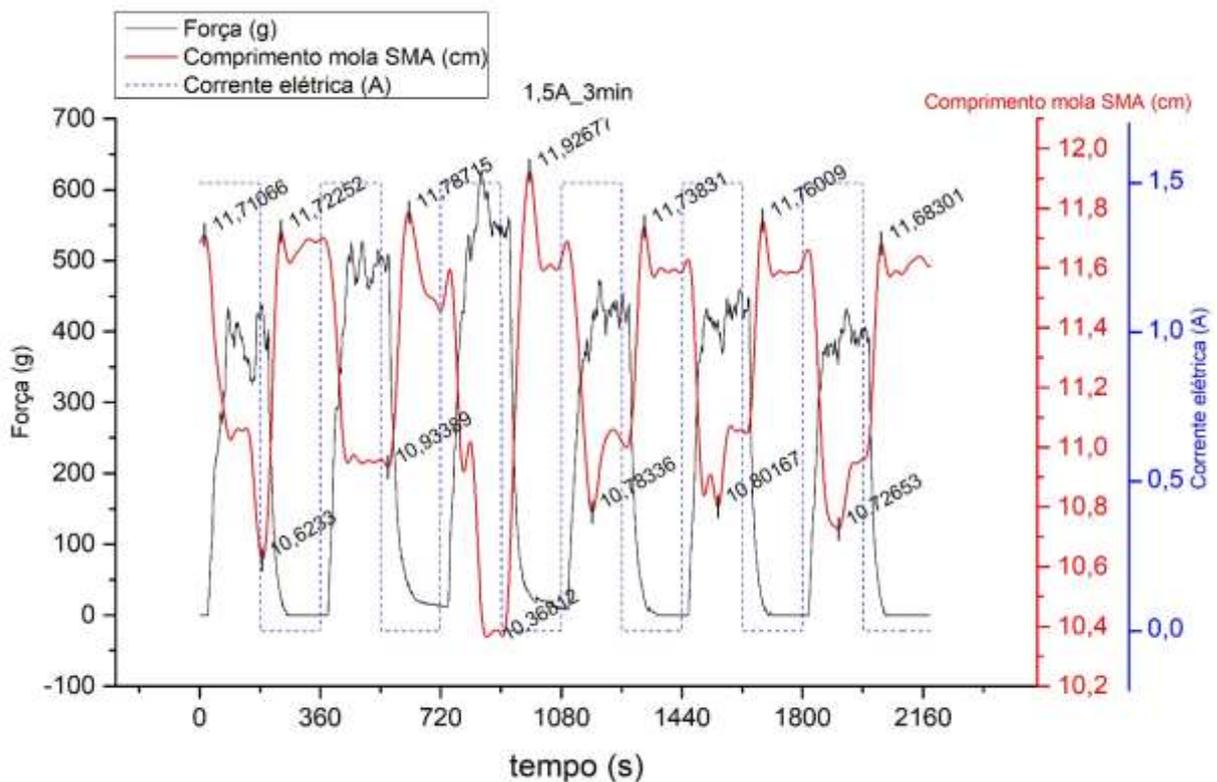
porcentagem da mola de SMA efetuasse a transformação de fase. Essa maior porcentagem de material fazendo a transformação está diretamente ligado à amplificação dos valores medidos.

Em comparação com o teste de 1 A e 2 minutos, visto anteriormente neste capítulo, também é possível observar uma expansão dos valores medidos. A justificativa para a variação é feita em função do aumento do carregamento de corrente elétrica aplicado na mola de SMA.

## 8-6 - Teste de 3 minutos e 1,5A

Os gráficos das figuras 8-13 e 8-14 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 3 minutos e 1,5A.

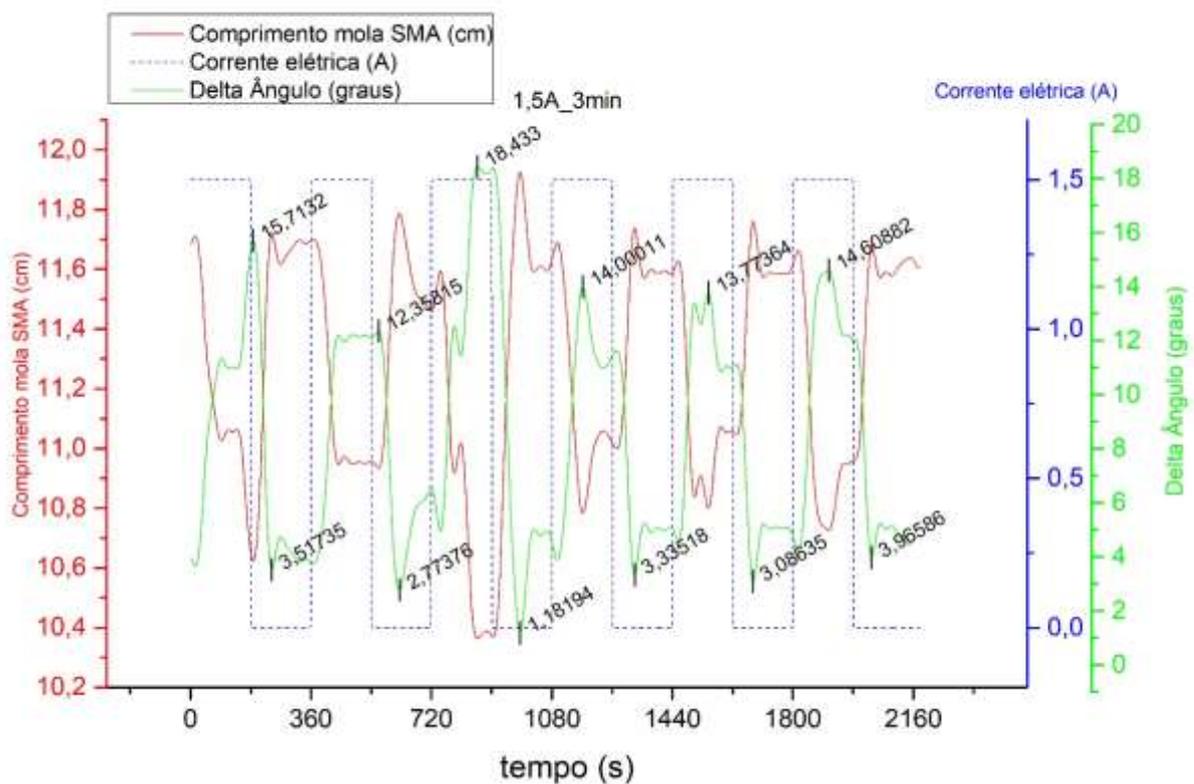
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 600g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,081cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 18,433 graus.



**Figura 8-13:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 1,5A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-14:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 1,5A (fonte própria)

Como é possível observar o teste analisado neste tópico apresenta dados obtidos semelhantes ao teste de 1,5 A e 2 minutos. Possivelmente isso ocorreu devido as interferências citadas anteriormente neste capítulo, que podem ser exemplificadas pela variação da temperatura no ambiente de testes, vibrações na mesa de testes e ruídos dos sensores durante as medições.

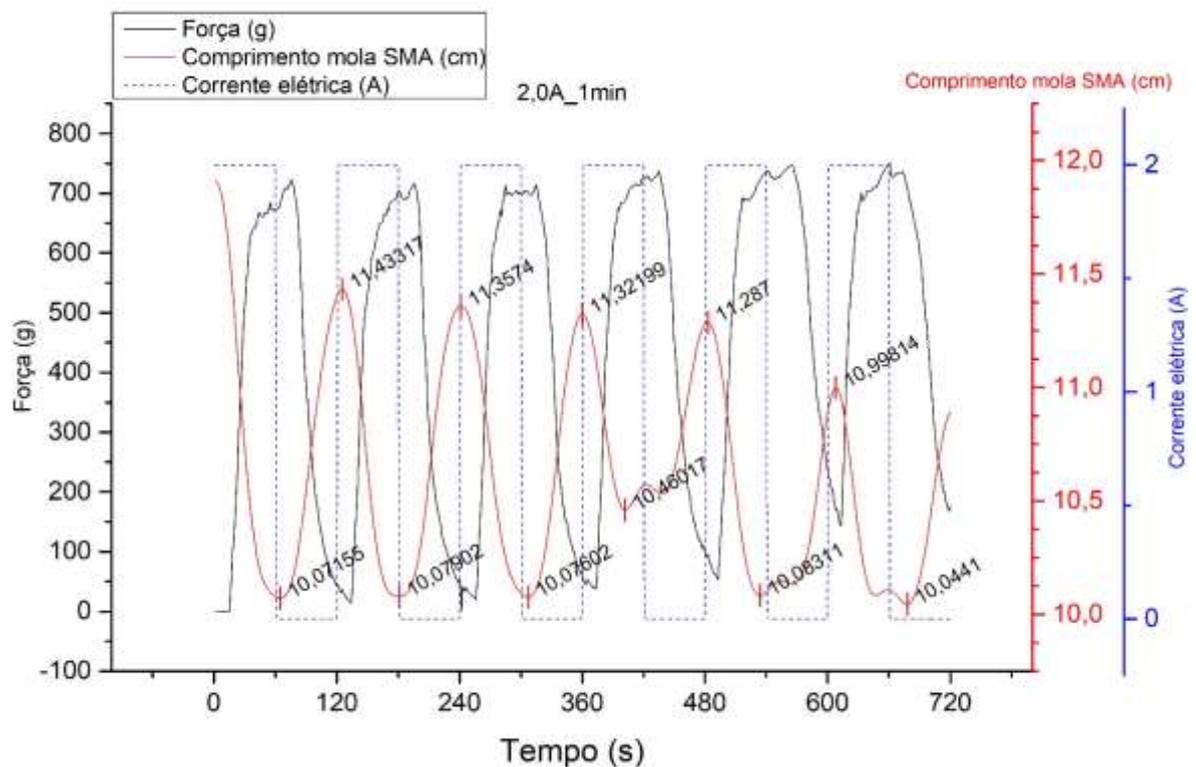
Neste teste assim como no anterior é possível visualizar com clareza os momentos em que ocorrem as mudanças de fase do material. A mudança da fase martensítica maclada ou

mistura de variantes, maclada e não maclada, para a fase austenítica ocorre no momento em que o carregamento elétrico está ativo. No momento em que o carregamento elétrico é suspenso pode-se observar que o material na fase austenítica ou mistura de fases austenítica e martensítica, retorna para a fase inicial a fase martensítica.

## 8.7 - Teste de 1 minuto e 2A

Os gráficos das figuras 8-15 e 8-16 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 1 minutos e 2A.

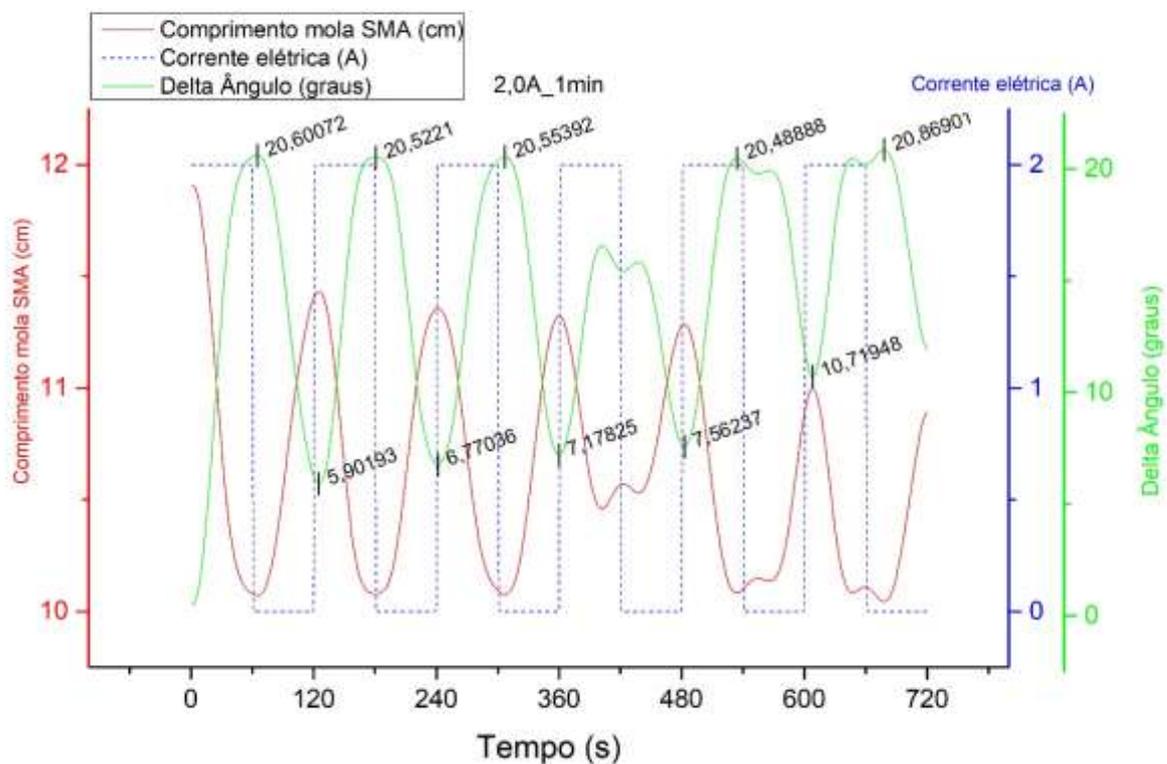
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 750g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,145cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 20,601 graus.



**Figura 8-15:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 2A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-16:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 2A (fonte própria)

Este teste sofre da mesma dificuldade sofrida em todos os testes de 1 minuto de duração. A falta de tempo disponível para a mola de SMA realizar as transformações de fase implica em uma perda na otimização do ciclo. Pois o braço deixa de realizar expansões e contrações devido a mola não realizar a mudança de fase da melhor forma para o movimento. Esse tipo de empecilho pode ser observado no gráfico, onde esse tipo de comportamento caracteriza-se por picos e

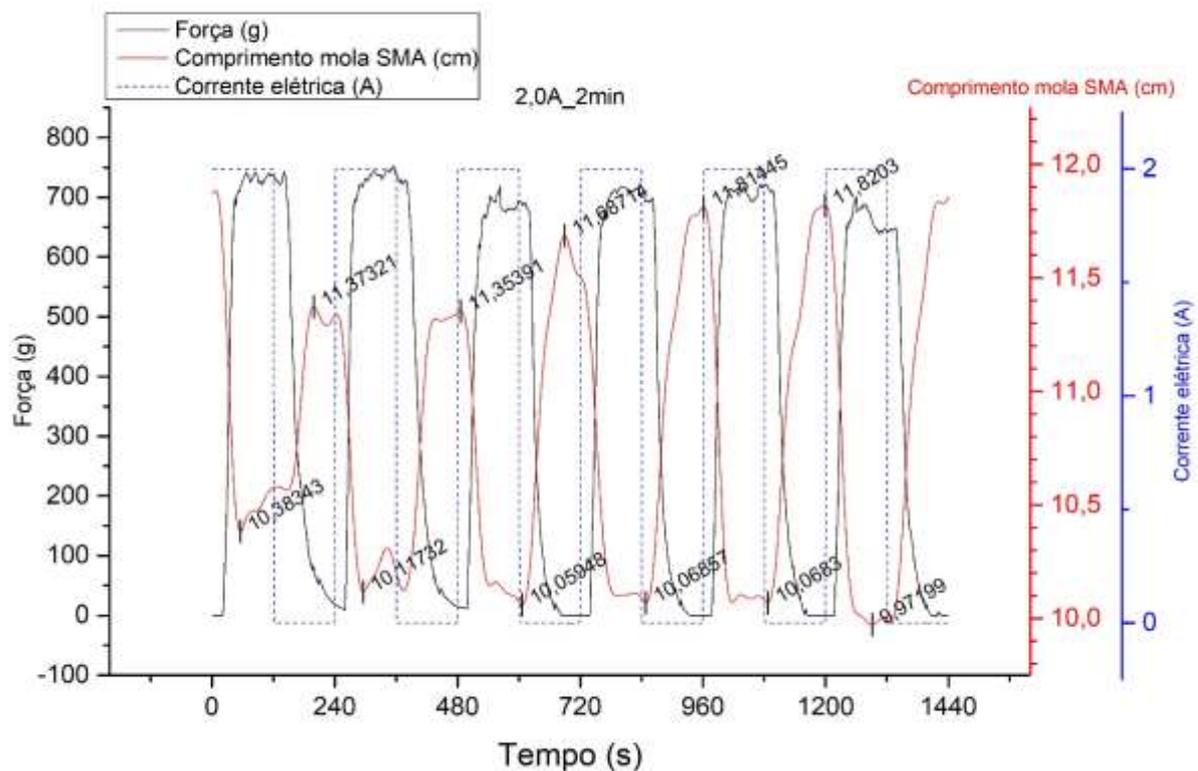
vales arredondados. Caso a transformação tivesse ocorrido na maior parte do material haveriam picos e vales mais largos e mais retos.

Em relação aos testes anteriores feitos com 1 minuto este possui os maiores resultados observados devido ao maior carregamento mecânico aplicado, que faz com que uma maior porcentagem do material troque de fase no tempo disponível.

## 8.8 - Teste de 2 minutos e 2A

Os gráficos das figuras 8-17 e 8-18 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 2 minutos e 2A.

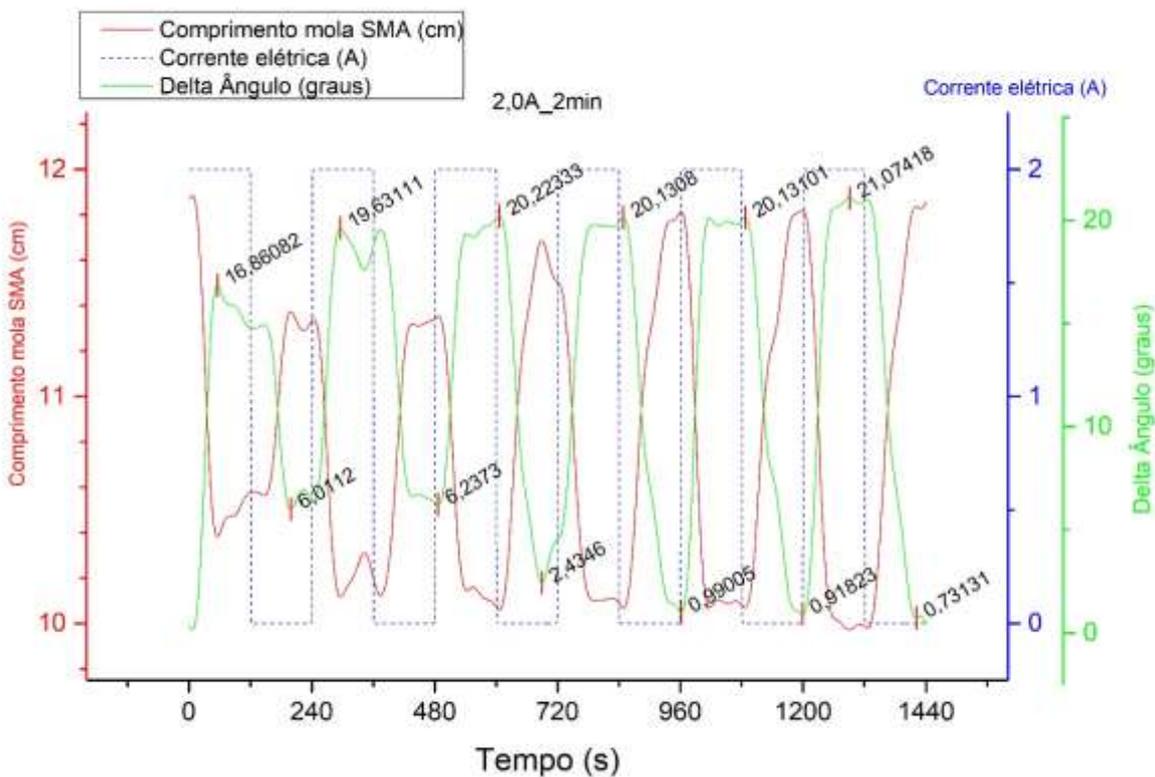
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 750g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,498cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 21,074 graus.



**Figura 8-17:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 2A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



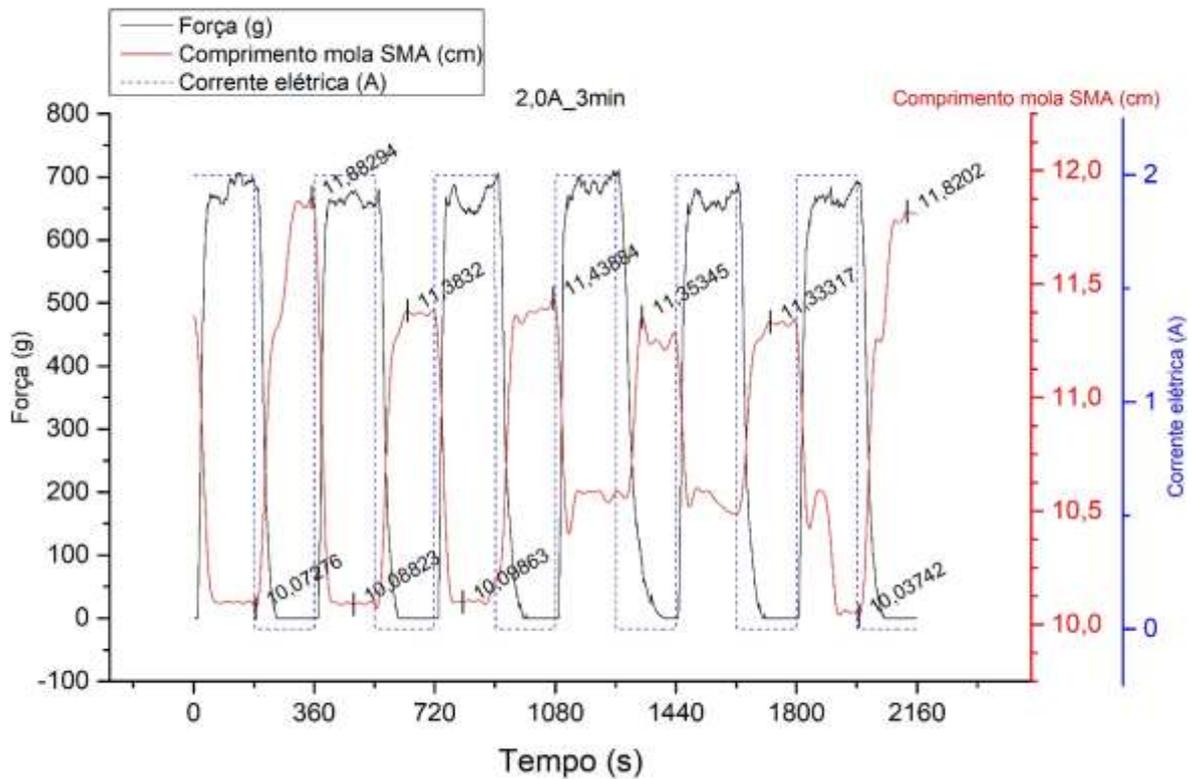
**Figura 8-18:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minutos e 2A (fonte própria)

O teste analisado neste tópico apresenta um comportamento dentro da expectativa do projeto. Os gráficos permitem observar que em relação ao teste anterior o material teve mais tempo para fazer as transformações de fase necessárias para fornecer movimento ao braço. Portanto houveram maiores amplitudes na variação no comprimento da mola e na variação do ângulo da haste.

## 8.9 - Teste de 3 minutos e 2A

Os gráficos das figuras 8-19 e 8-20 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 3 minutos e 2A.

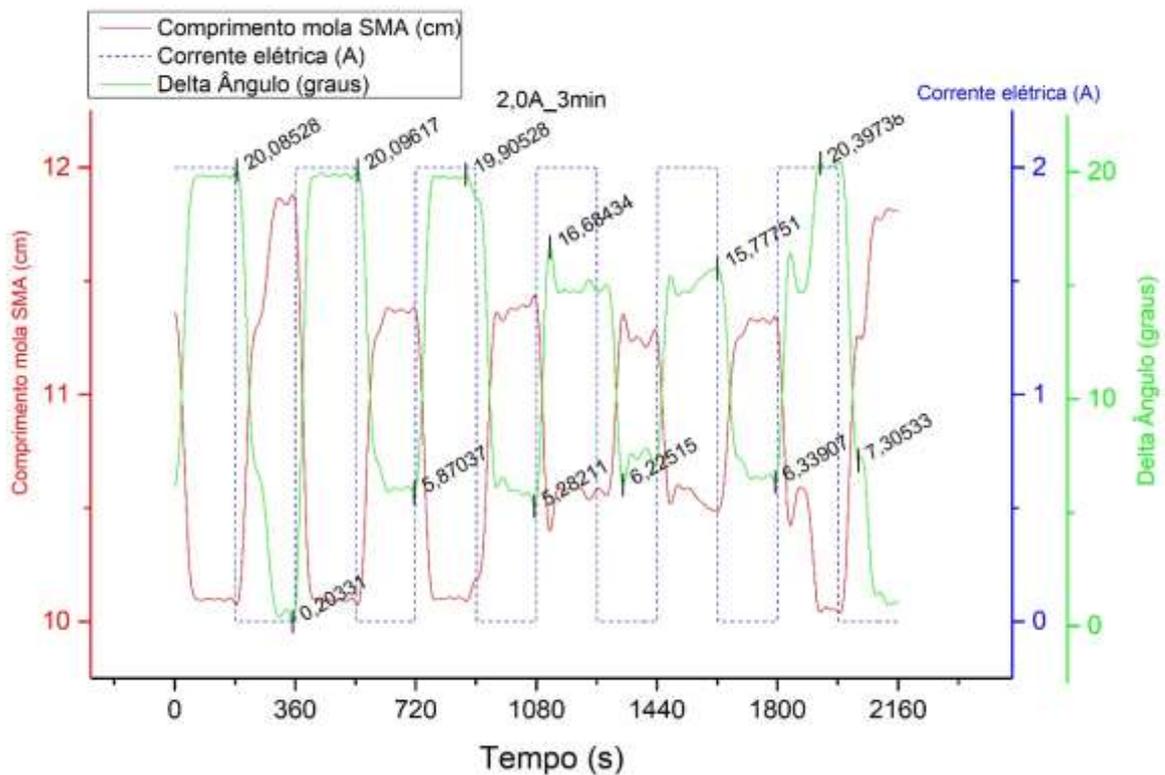
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 700g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,405cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 20,397 graus.



**Figura 8-19:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 2A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-20:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minutos e 2A (fonte própria)

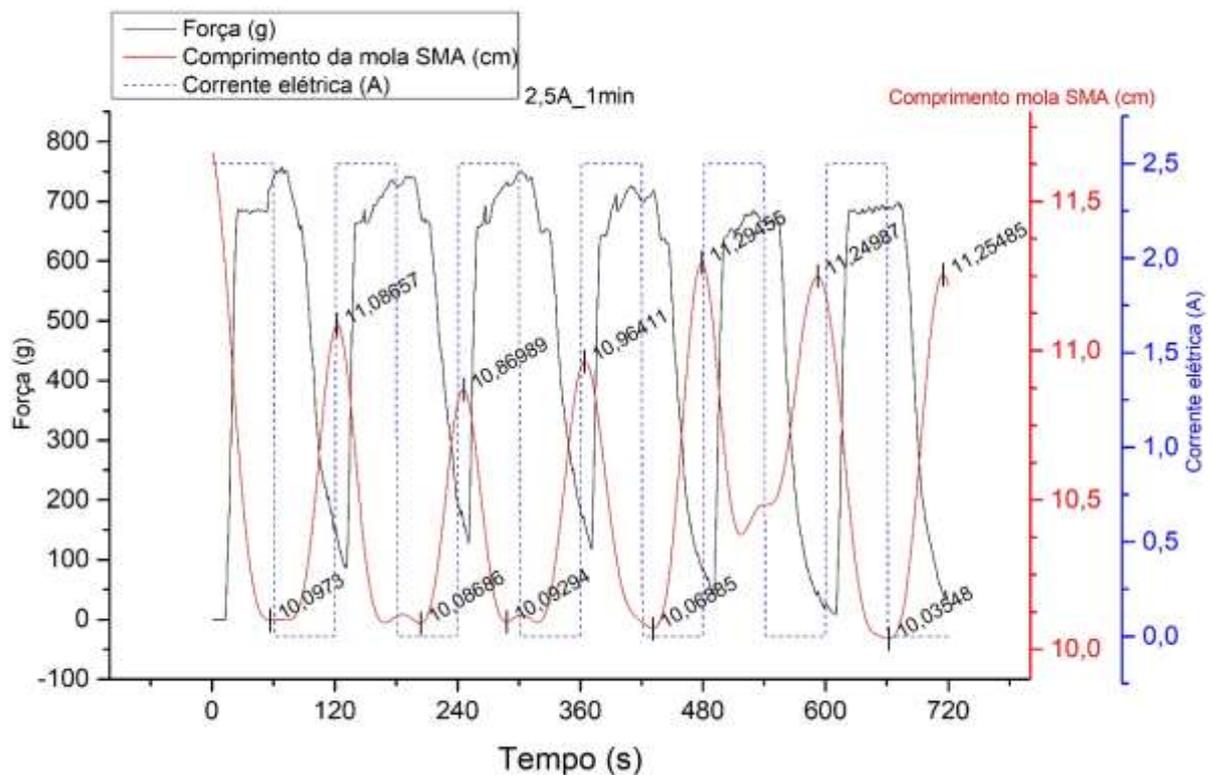
O teste apresenta um comportamento semelhante ao teste anterior. Inclusive apresentando valores obtidos parecidos. Isso pode significar que o intervalo de 2 minutos pode ser suficiente para a mola fazer a mudança de fase. Portanto o tempo a mais cedido durante o teste não agregou amplificações nos valores medidos. A força permaneceu quase semelhante, a

variação do comprimento da mola de SMA foi um pouco inferior e a variação do ângulo da haste também. Essa constatação pode ser válida até para os testes feitos com carregamentos de corrente elétrica inferiores a 2 A, ou seja, para os testes feitos com 2 A ou menos a diferença entre o movimento observado entre os testes feitos com 2 minutos e 3 minutos é bem pequena.

### 8.10 - Teste de 1 minuto e 2,5A

Os gráficos das figuras 8-21 e 8-22 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 1 minutos e 2,5A.

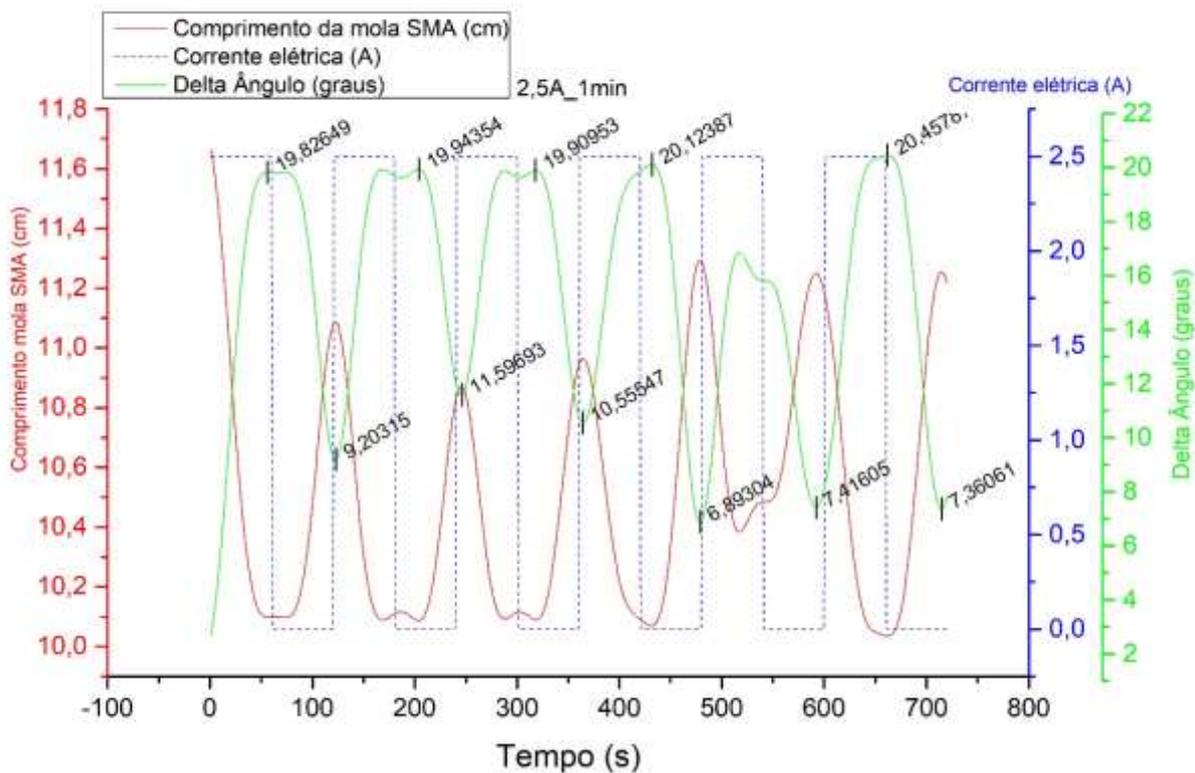
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 750g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,017cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 20,458 graus.



**Figura 8-21:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 2,5A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-22:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 1 minuto e 2,5A (fonte própria)

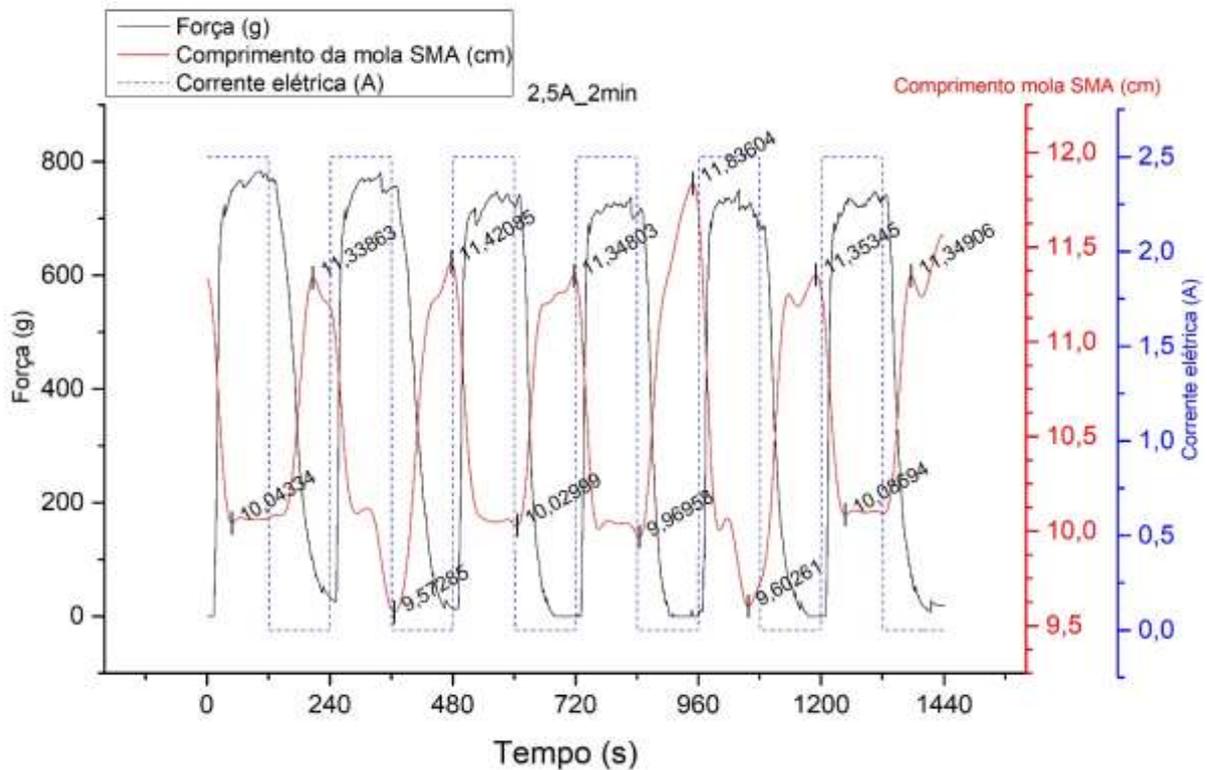
Os testes feitos com 2,5 A de carregamento tendem a apresentar os dados com maiores valores obtidos durante os testes, em função de ser o maior carregamento entre os quatro testados.

Os gráficos demonstram, assim como nos casos mostrados anteriormente, que 1 minuto não é tempo suficiente para a mola realizar a transformação de fase da melhor forma possível.

### 8.11 - Teste de 2 minutos e 2,5A

Os gráficos das figuras 8-23 e 8-24 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 2 minutos e 2,5A.

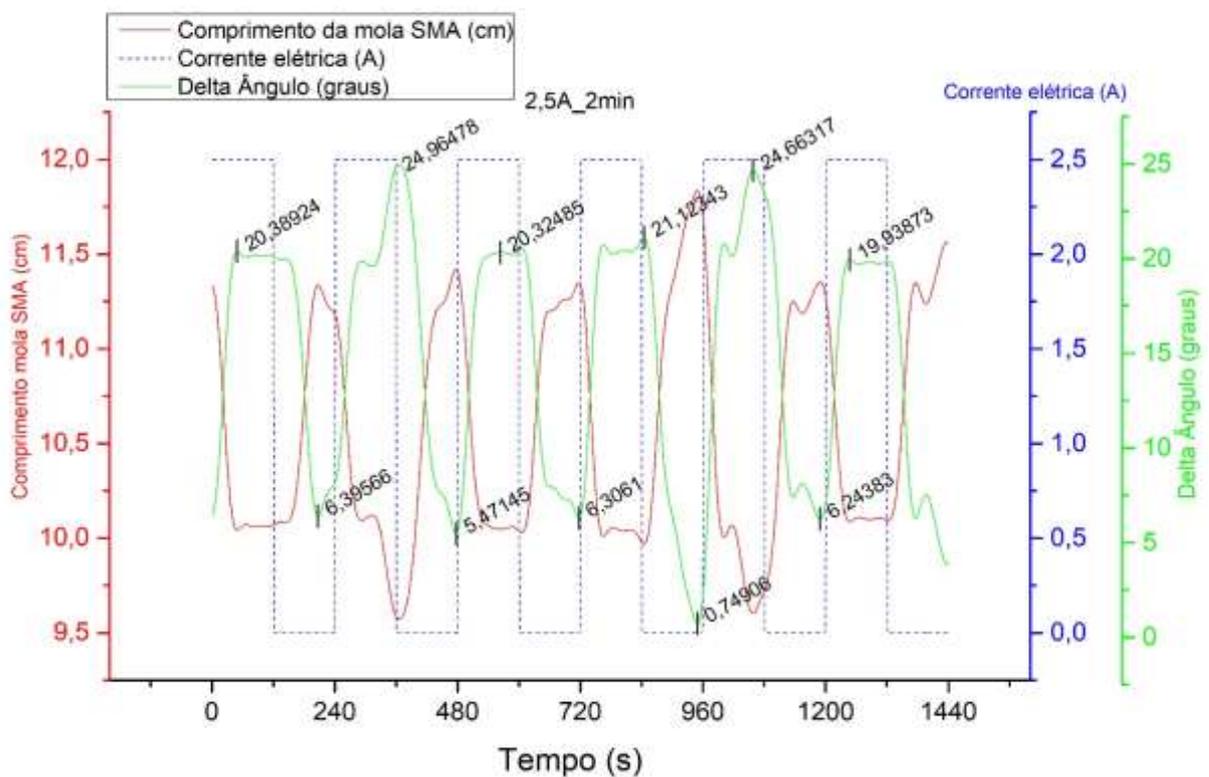
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 780g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,576cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 24,965 graus.



**Figura 8-23:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minuto e 2,5A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica,

que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste.



**Figura 8-24:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 2 minuto e 2,5A (fonte própria)

O teste feito acima demonstra que com carregamentos de 2,5 A se obtém a maior variação de deslocamento da mola de SMA dentre os testes de 2 minutos.

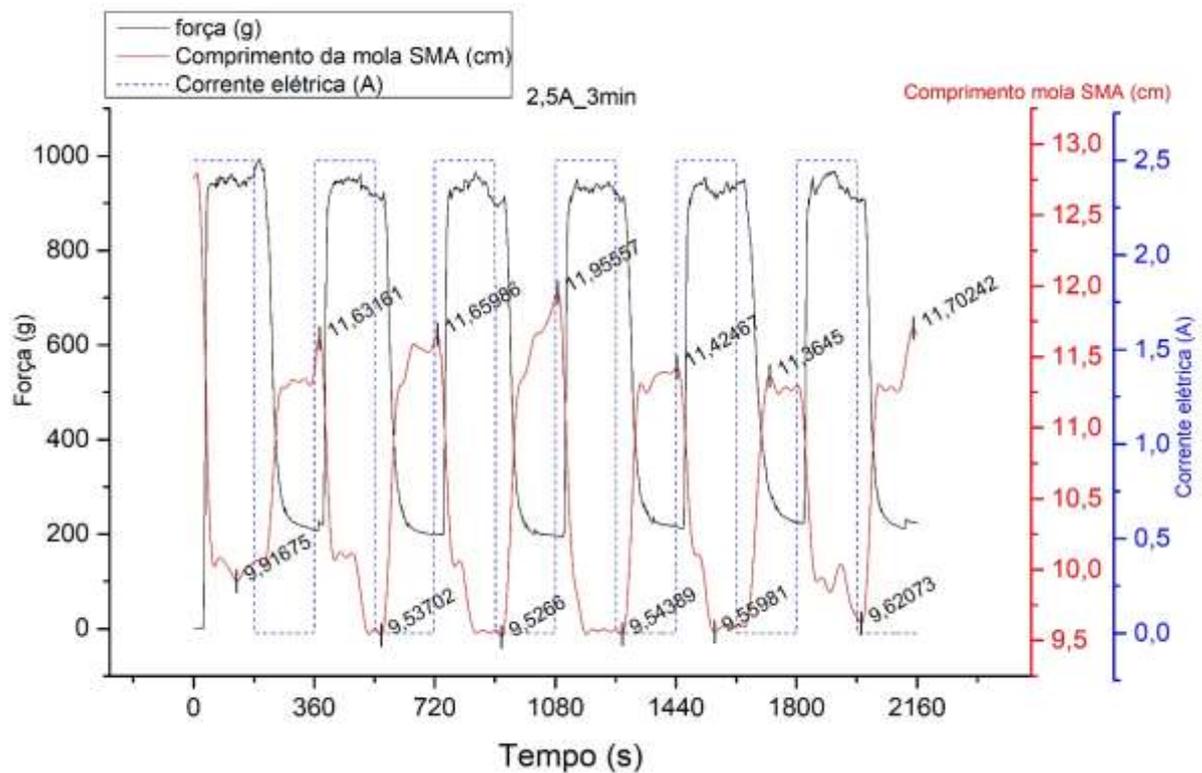
Os comportamentos observados nos gráficos acima são fieis aquilo que era esperado. Demonstrando claramente as mudanças de fase sofridas pela mola durante o teste.

Novamente, é possível observar que um aumento no tempo disponível para a mudança de fase da mola gera maiores variações observáveis no movimento, como maiores variações no comprimento da mola e maiores variações no ângulo da haste móvel.

## 8.12 - Teste de 3 minutos e 2,5A

Os gráficos das figuras 8-25 e 8-26 representam os resultados obtidos das análises feitas durante o teste de ciclos de 3 minutos e 2,5A.

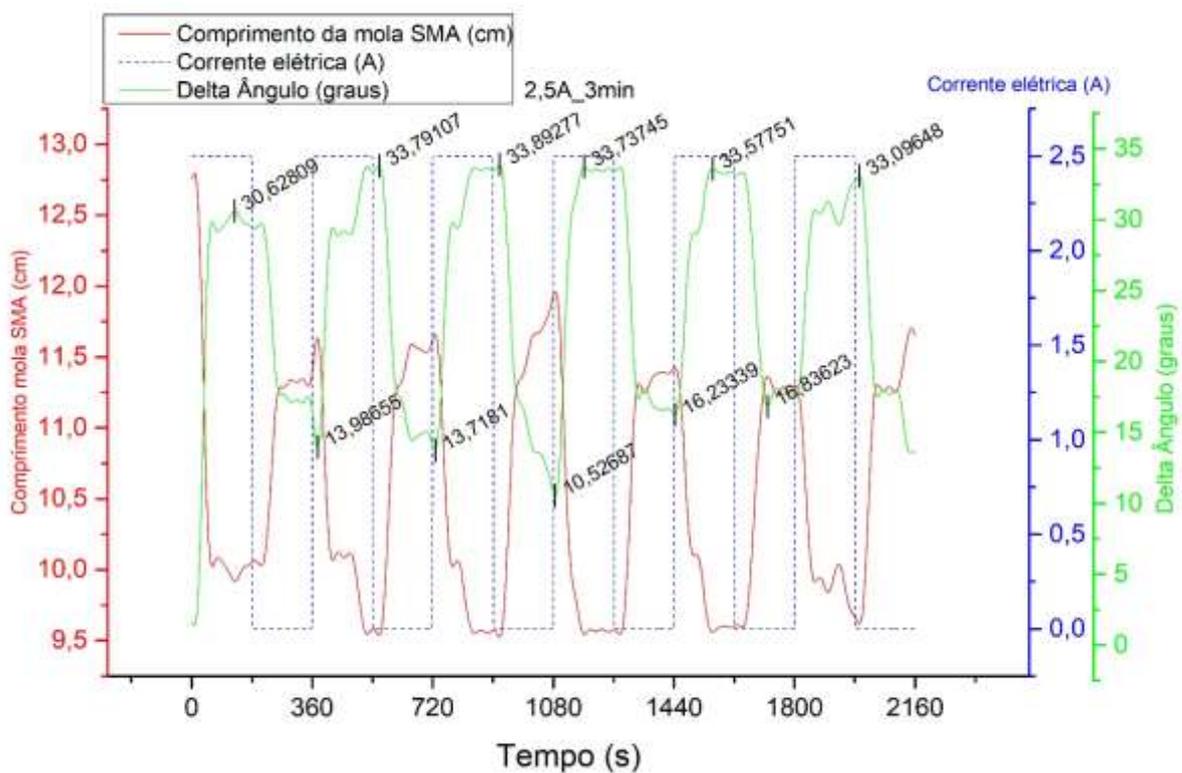
Os gráficos apresentam a força feita pela mola de SMA atingindo valores máximos de 1000g, uma variação média no comprimento da mola de SMA de 1,989cm e uma variação máxima do ângulo da haste de 33,893 graus.



**Figura 8-25:** Gráfico da força, do tamanho da mola de SMA e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minuto e 2,5A (fonte própria)

Assim como nos outros testes, verifica-se que no início do experimento a mola está a temperatura ambiente, logo tem-se a mola na fase martensítica não maclada ou uma mistura das variantes maclada e não maclada. A partir da aplicação do carregamento de corrente elétrica, a temperatura da mola aumenta e dá-se início a transformação de fase da mola. A mola ao fim da

transformação encontra-se na fase austenítica ou uma mistura da fase austenítica e martensítica, que dependerá da temperatura naquele instante. Observa-se que o comprimento da mola de SMA foi reduzido, a força feita pela mola de SMA aumentou e a haste rotacionou no sentido anti-horário, tudo isso ocorre em função da transformação de fase. Quando o carregamento é retirado a mola inicia a transformação de fase novamente, se transformando na fase martensítica maclada ou uma mistura das variantes martensítica maclada e não maclada. Após a transformação a mola aumenta de comprimento, o esforço feito é reduzido e a haste se movimenta no sentido horário. Esse ciclo se repetirá ao longo do teste



**Figura 8-26:** Gráfico do tamanho da mola de SMA, da variação do ângulo da haste e da corrente elétrica em função do tempo - teste de ciclo de 3 minuto e 2,5A (fonte própria)

O teste com os maiores valores obtidos, com a maior variação no comprimento da mola de SMA, a maior variação de movimento do ângulo da haste e a maior força feita pela mola de SMA sobre o sistema. Isso ocorreu devido a um maior espaço de tempo disponível para a mola mudar de fase e ao maior carregamento de corrente elétrica aplicado.

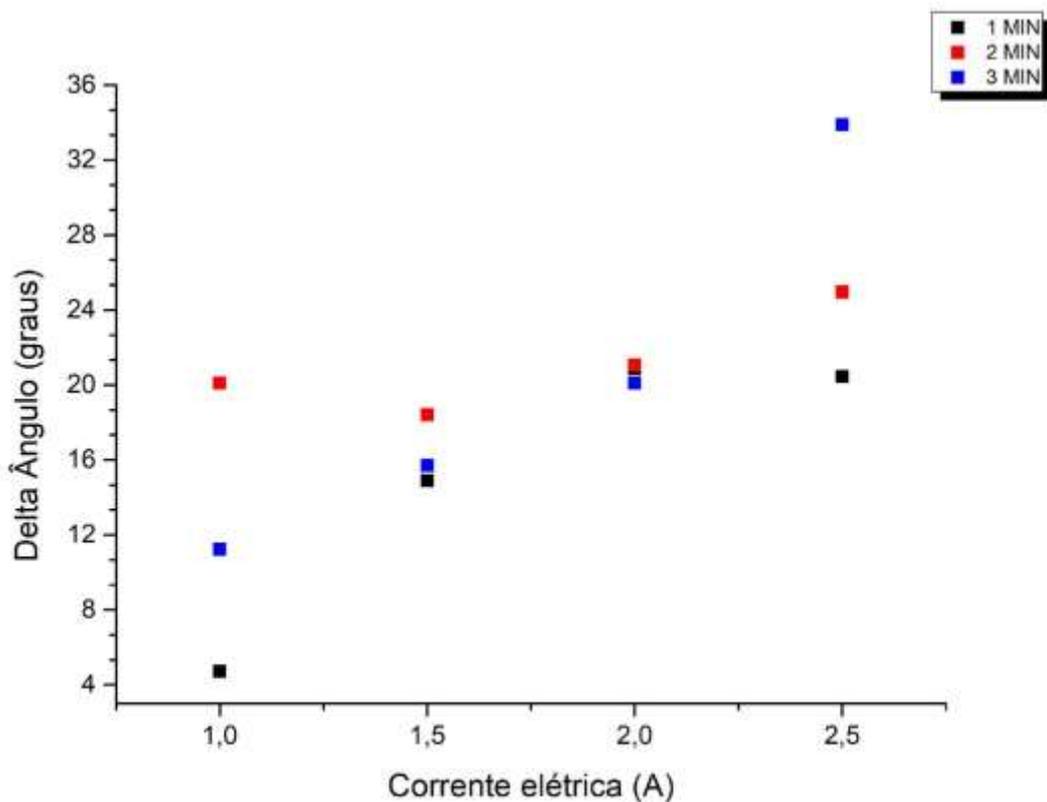
É possível observar que no caso da aplicação de carregamentos de 2,5 A ou mais o tempo necessário para a mola se transformar totalmente aumenta, pois ao analisar todos os testes feitos com 2,5 A e possível concluir que o teste que obteve maiores resultados foi o com maior tempo e o que obteve menores foi o com menor tempo.

Portanto o tempo influencia diretamente na porcentagem da mola transformada durante os testes junto com o carregamento de corrente elétrica aplicado.

Por fim e relevante ressaltar que os resultados dos testes feitos com 2,5 A apresentam a maior conformidade com o que era esperado de acordo com os estudos teóricos feitos para o desenvolvimento deste projeto. Os testes mostram um crescimento nos dados dos testes com os menores sendo detectados nos testes com 1 minuto e os maiores no teste com 3 minutos.

### 8.13 – Estudo comparativo entre os resultados

As figuras a seguir exibem a relação entre a variação angular máxima da haste, o tempo do ciclo e o carregamento da corrente elétrica aplicado. Lembrando que a variação máxima do ângulo da haste está diretamente ligada a variação do comprimento da mola de SMA.



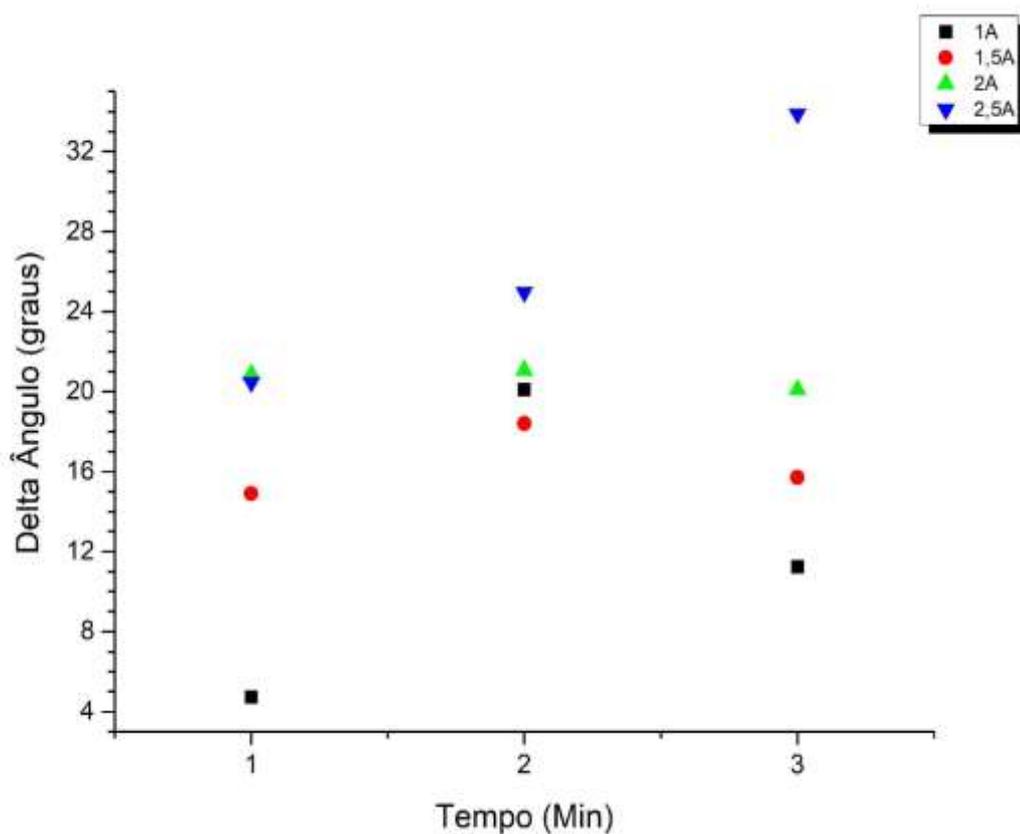
**Figura 8-27:** relação entre corrente elétrica e variação do ângulo da haste em relação ao tempo (fonte própria)

Observando a figura 8-27 é possível perceber que o ciclo com melhores resultados é o de 2,5A. Mostrando uma maior variação angular da haste quando submetido a testes de 3 minutos. Estes ciclos foram considerados os melhores por representar melhor o objetivo dos estudos feitos que era, o maior deslocamento da haste possível durante os testes.

É possível verificar que os testes de 1A não apresentaram consistência, como já foi dito anteriormente, acredita-se que isso tenha ocorrido em função de interferências externas.

Havendo também um comportamento incomum no qual, o teste de 1A e 1 minutos apresentou uma variação do ângulo da haste muito inferior aos demais.

Os testes de 1,5A e 2,0A apresentam um comportamento semelhante, com os resultados das variações angulares feitas pela haste durante os testes muito próxima em todos os tempos estudados. Acredita-se que esse tipo de comportamento ocorreu em função da insuficiência do carregamento da corrente elétrica quando aplicado a mola de SMA. Pois os testes de 2,5A, que foram feitos com um carregamento de corrente elétrica maior, apresentam variações significativas. Essa insuficiência fica visível, nos testes de 1,5A e 2,0A, pois mesmo com uma variação do tempo em que o carregamento fica aplicado não houve variações significativas na variação angular da haste de um teste em relação ao outro, sendo assim todos os testes de 1,5A e apresentaram resultados semelhantes nos três tempos testados e o mesmo ocorre com os testes de 2,0A.



**Figura 8-28:** relação entre tempo e variação do angulo da haste em relação a corrente elétrica aplicada (fonte própria)

A figura mostra por outra perspectiva as variações angulares observadas durante os testes. Como pode ser visto os testes com 2,5A apresentaram os melhores resultados e um comportamento em maior conformidade com o que era esperado, que era para maiores tempos disponíveis deve-se observar maiores variações do ângulo da haste. Essas maiores variações ocorrem em função do maior tempo disponível para as transformações de fase durante os testes.

Observa-se que o os ciclos de 1A fogem ao comportamento esperado. É possível verificar que os resultados obtidos no teste de 1A e 2 minutos foram maiores que o de 1A e 1 minuto e 1A e 3 minutos. Além disso a variação do movimento angular da haste no teste de 1A e 1 minuto é muito inferior aos outros testes, algo que não era esperado. Esse tipo de desempenho se distingue muito dos outros testes. Acredita-se que isso tenha ocorrido em função das interferências externas.

Por fim os ciclos de 1,5A e 2,0A, assim como dito quando foi analisada a figura 8-27, apresentam um comportamento similar. Ambos os casos a variação angular do movimento da haste são quase constantes em todos os períodos de tempo em que os testes foram feitos. Os testes de 2,0A apresentaram uma conformidade em todos os ciclos, em que, cada ciclo apresentou uma variação angular muito próxima dos demais feitos com o mesmo carregamento de corrente elétrica. Esse comportamento é atribuído ao carregamento de corrente elétrica, pois acredita-se que caso o carregamento fosse maior haveria uma maior parte da mola de SMA realizando a transformação de fase permitindo que a variação angular da haste fosse maior em função do tempo disponível para as transformações de fase. Os ciclos de 1,5A apesar de possuírem uma maior variação entre o movimento angular da haste nos ciclos feitos com esse carregamento, ainda assim, essa variação continua pequena e considera-se o comportamento dos ciclos semelhantes durante os testes. Assim como em 2,0A essa conformidade é atribuída a insuficiência do carregamento elétrico aplicado a mola de SMA para realizar as transformações de fase durante os ciclos.

## Capítulo 9

### 9. Conclusão

#### 9.1 – Fatores fundamentais

Após o término dos testes pode-se observar a presença de alguns fatores de extrema importância quando, se projetando o protótipo do braço mecânico. O tempo, a temperatura ambiente e o carregamento elétrico aplicado.

O tempo foi o principal fator observado durante as análises pois em função dele que pode ocorrer movimentos com maior amplitude. Um exemplo disso é que durante os testes usando 2,5 A de carregamento o tempo foi um fator chave para gerar diferentes variações no comprimento da mola durante os testes. No teste de 1 minuto foi visto a menor variação no comprimento da mola e conseqüentemente a menor variação no ângulo da haste. No teste com 2 minutos foi observado uma variação um pouco maior e já no teste de 3 minutos foi observado a maior das variações do comprimento da mola graças ao maior intervalo de tempo para a mola mudar de fase no sistema.

A temperatura ambiente foi um fator que acabou gerando muitas dificuldades ao longo do projeto, pois em função dela houveram flutuações e dificuldade na uniformidade de obtenção dos dados durante os testes.

Por fim o carregamento elétrico aplicado em cada testes teve resultados diferentes. Para carregamentos maiores a mola de SMA exerceu maiores forças sobre o sistema além de produzir uma maior variação no comprimento da mesma.

## **9.2 - Funcionamento esperado para o braço mecânico**

Durante o projeto do braço não se chegou a definir qual seria o foco do desenvolvimento. Por exemplo, poderia ser uma maior velocidade de movimento ou uma maior amplitude de movimento. De acordo com os testes uma maior amplitude de movimento e uma maior velocidade de movimento do braço podem gerar desempenhos diferentes. Além disso pode-se definir um limite de carregamento elétrico fornecido de acordo com o projeto desejado e ambiente em que será usado o braço ou um limite de tempo para o movimento do braço. Portanto o modelo de funcionamento a ser escolhido para o braço dependeria da tarefa a ser executada e o ambiente em que seria empregado.

## Capítulo 10

### 10. Trabalhos futuros

Definição de função para o braço mecânico. Como foi dito no final do capítulo anterior, uma definição do que se deseja do funcionamento do braço mecânico, permitiria uma melhor análise do protótipo e um direcionamento dos estudos para um comportamento mais interessante para a função desejada. Seja procurando maior amplitude de movimento, ou maior número de aberturas e fechamentos do braço no menor tempo possível, ou buscando a melhor relação consumo de energia elétrica deslocamento do braço.

Pode-se melhorar o projeto retirando-se algumas das possíveis interferências externas ao funcionamento do protótipo. Inserindo-se um sistema de controle automatizado para o carregamento de corrente elétrica e manutenção do tempo dos ciclos, e a utilização de uma câmara com isolamento térmico, retirando-se a influência do ambiente externo sobre o comportamento da mola de SMA.

## Capítulo 11

### 11. Referências bibliográficas.

CZECHOWICZ, A.; LANGBEIN, S.; *Shape Memory Alloy Valves Basics, Potentials, Design*, Switzerland: Springer International, 2015.

LAGOUDAS, D.C.; *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*, New York: Springer Science, 2008.

BRAILOVSKI, V.; et al.; *SMA Actuators for Morphing Wings*, Montreal: 3rd International Symposium on Shape Memory Materials for Smart Systems, 2010.

KEERTHI SAGAR, S.N.; SREEKUMAR, M.; *Miniaturized Flexible Flow Pump using SMA Actuator*, Chennai: International Conference on Design and Manufacturing, 2013.

ZHENYUN, S.; et al.; *A fuzzy PID-controlled SMA actuator for a two-DOF joint*, Beijing: Chinese Journal of Aeronautics, 2014.

TANIGUCHI, H.; *Flexible Artificial Muscle Actuator Using Coiled Shape Memory Alloy Wires*, Tsuyama: ICBET 2013: May 19-20, Copenhagen, Denmark, 2013.

PFEIFFER, C.; MAVROIDIS, C; *shape memory alloy actuated prostheses: initial prototypes*: Rutgers University, Piscataway, New Jersey, USA, 1999

LANGE, G.; LACHMANN, A.; *Shape Memory Alloys as Linear Drives in Robot Hand Actuation*, University of Applied Sciences Osnabrü, Osnabrück, Germany, 2015

NESPOLI, A.; BASSANI, E.; *Rotational mini-actuator activated by two antagonist shape memory alloy wires*, CNR-IENI, Lecco, Italy, 2015

ZUNIGA1, J.; KATSAVELIS, D.; *Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences*, Creighton University, Omaha, USA, 2015

CARDOSO, J.; *Desenvolvimento de um Dispositivo Inteligente Acionado por Memória de Forma em um Protótipo de Leme Para Embarcações*, Rio de Janeiro, Brasil, Cefet-rj, 2017