

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

**Desenvolvimento de um atuador inteligente para  
uma mesa deslizante utilizando materiais com  
memória de forma**

Julio Gabriel Dourado Correia  
Sebastião Valeiro Fernandes Miranda

Orientador: Sergio de Almeida Oliveira

**Rio de Janeiro  
Junho de 2018**

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

**Desenvolvimento de um atuador inteligente para  
uma mesa deslizante utilizando materiais com  
memória de forma**

Julio Gabriel Dourado Correia  
Sebastião Valeiro Fernandes Miranda

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

Orientador: Sergio de Almeida Oliveira

**Rio de Janeiro  
Junho de 2018**

## CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

C824 Correia, Julio Gabriel Dourado  
Desenvolvimento de um atuador inteligente para uma mesa  
deslizante utilizando materiais com memória de forma / Julio Gabriel  
Dourado Correia, Sebastião Valeiro Fernandes Miranda.—2018.  
xv, 81f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 80-81

Orientador : Sergio de Almeida Oliveira

1. Engenharia mecânica. 2. Materiais inteligentes. 3. Ligas com  
memória de forma. I. Miranda, Sebastião Valeiro Fernandes. II.  
Oliveira, Sergio de Almeida (Orient.). III. Título.

CDD 621

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos este trabalho aos nossos pais que sempre acreditaram em nós e nos apoiaram sempre, mesmo nos momentos de maior adversidade. Dedicamos também aos nossos amigos e pessoas mais próximas que sempre torceram para o nosso sucesso e aos nossos professores que contribuíram com a nossa evolução ao longo do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Deus pela saúde para poder continuar estudando e realizando este longo trabalho.

Agradecemos também aos nossos pais por sempre nos ensinarem a importância de uma boa educação, por todo suporte ao longo de nossa jornada, pela paciência e carinho mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradecemos a todos os professores que contribuíram com a nossa formação acadêmica sempre contribuindo com suas experiências e passando seus conhecimentos. Em especial ao nosso orientador, Sérgio de Almeida Oliveira, que sempre se mostrou muito solícito e dedicado, dando palavras de incentivo e fazendo críticas construtivas.

Agradecemos ainda a todos os colegas que nos deram suporte no Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico de Materiais (LACTM) durante a realização dos experimentos.

## RESUMO

A utilização de tecnologias com materiais inteligentes tem crescido consideravelmente nos últimos anos, em diversas áreas de desenvolvimento de projetos. Como exemplo no campo da engenharia, essa utilização ocupa um importante espaço no desenvolvimento de projetos de sistemas mecânicos. Estes materiais inteligentes apresentam características importantes que tentam explorar a ideia de construir sistemas e estruturas com comportamento adaptativo que tenham a capacidade de alterar propriedades devido às mudanças ambientais e reparar-se quando necessário. Dentre esses materiais inteligentes podem-se citar a utilização das ligas com Memória de forma (LMFs). Estas LMFs apresentam um acoplamento termomecânico que lhes dá a capacidade de recuperar uma forma previamente definida, quando submetidas a um processo de carregamento termomecânico apropriado. Quando há uma restrição para a recuperação de forma, essas ligas promovem forças de restituição elevadas. As propriedades singulares das LMFs estão associadas com transformações de fase responsáveis por diferentes comportamentos termomecânicos dessas ligas. Basicamente, duas fases distintas são possíveis nas LMFs: austenita e martensita. A fase austenítica é estável em altas temperaturas e em um estado livre de tensão, apresentando uma única variante. Por outro lado, a fase martensítica é estável a baixas temperaturas em um estado livre de tensão, estando relacionada com inúmeras variantes. Uma transformação de fase pode ser induzida por tensão ou pela temperatura. Aproveitando-se das características termomecânicas das Ligas com Memória de Forma, este trabalho visa construir uma mesa deslizante que funcionará como um elevador de posicionamento, o qual será acionado por meio de atuadores constituídos com ligas com memória de forma, e realizar um estudo numérico experimental do conceito de atuação inteligente da Liga com Memória de Forma.

**Palavras-chave:** materiais inteligentes, ligas com memória de forma, atuadores, mesa pantográfica, mesa elevatória, austenita, martensita, transformação de fase, carregamento termomecânico.

## ABSTRACT

The use of technologies with active materials has risen reasonably in the past years for a variety of applications in many fields. In engineering, for example, this type of material has an important role in mechanical systems. These active materials have interesting characteristics that tend to explore the idea of building systems and structures with an adaptive behavior and have the ability to respond non-mechanical fields with a mechanical response. Among this group of materials, we have to give prominence to the Shape Memory Alloys (SMAs). These SMAs are a unique class of material with the ability to recover their shape under a proper thermomechanical load. These type of alloys promote high restitution forces when their shape recovery is restricted. The unique properties of the SMAs are associated with phase transformations that are responsible for different thermomechanical behaviors. Basically, two distinct phases are possible in SMAs: austenite and martensite. The austenitic phase is stable at higher temperatures with no tension. On the other hand, the martensitic phase is stable at lower temperatures with no tension having innumerable variants. A phase transformation can be induced by loading or temperature variations. Taking advantage of the thermomechanical characteristics of shape memory alloys, this work aims to construct a lift platform that will function as a positioning elevator, which will be actuated by actuators made of shape memory alloys, and perform an experimental numerical study of the concept of intelligent actuation of the shape memory alloys.

**Keywords:** active materials, shape memory alloys, actuators, pantograph table, lift platform, austenite, martensite, phase transformation, thermomechanical loading.

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Organização do trabalho.....	4
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Fundamentos Teóricos.....</b>	<b>15</b>
3.1 Ligas com memória de forma.....	15
3.2 Comportamento da estrutura cristalina.....	15
3.3 Efeito memória de forma.....	19
3.4 Pseudoelasticidade.....	20
3.5 Memória de forma com tensão assistida.....	21
3.6 Comportamento cíclico das LMF.....	22
<b>4. Projeto da Mesa Pantográfica Inteligente.....</b>	<b>25</b>
<b>5. Metodologia Experimental.....</b>	<b>28</b>
5.1 Molas utilizadas.....	28
5.2 Caracterização das molas utilizadas.....	29
5.2.1 Ensaio de tração.....	29
5.3 Montagem da estrutura experimental.....	30
5.4 Testes com carregamento constante.....	34
5.5 Procedimento experimental.....	38
5.5.1 Testes com ciclos de 1min.....	39
5.5.2 Testes com ciclos de 2min.....	39
5.5.3 Testes com ciclos de 3min.....	39
<b>6. Resultados Obtidos.....</b>	<b>40</b>
6.1 Ensaio de tração.....	40
6.1.1 Mola SMA 1.....	40
6.1.2 Mola SMA 2.....	40
6.1.3 Mola de tração de aço.....	41
6.2 Testes com carregamento constante.....	41
6.2.1 Teste 1min a 1,0 A.....	42
6.2.1.1 Mola 1.....	42
6.2.1.2 Mola 2.....	43
6.2.2 Teste 1min a 1,5 A.....	44
6.2.2.1 Mola 1.....	44
6.2.2.2 Mola 2.....	46
6.2.3 Teste 1min a 2,0 A.....	47
6.2.3.1 Mola 1.....	47
6.2.3.2 Mola 2.....	48
6.2.4 Teste 1min a 2,5 A.....	50
6.2.4.1 Mola 1.....	50
6.2.4.2 Mola 2.....	51



6.2.5	Teste 2min a 1,0 A.....	52
6.2.5.1	Mola 1.....	52
6.2.5.2	Mola 2.....	54
6.2.6	Teste 2min a 1,5 A.....	55
6.2.6.1	Mola 1.....	55
6.2.6.2	Mola 2.....	56
6.2.7	Teste 2min a 2,0 A.....	57
6.2.7.1	Mola 1.....	57
6.2.7.2	Mola 2.....	59
6.2.8	Teste 2min a 2,5 A.....	60
6.2.8.1	Mola 1.....	60
6.2.8.2	Mola 2.....	61
6.2.9	Teste 3min a 1,0 A.....	62
6.2.9.1	Mola 1.....	62
6.2.9.2	Mola 2.....	64
6.2.10	Teste 3min a 1,5 A.....	65
6.2.10.1	Mola 1.....	65
6.2.10.2	Mola 2.....	66
6.2.11	Teste 3min a 2,0 A.....	67
6.2.11.1	Mola 1.....	67
6.2.11.2	Mola 2.....	68
6.2.12	Teste 3min a 2,5 A.....	70
6.2.12.1	Mola 1.....	70
6.2.12.2	Mola 2.....	71
6.2.13	Resultados comparativos.....	72
6.2.13.1	Testes com 1min.....	72
6.2.13.2	Testes com 2min.....	74
6.2.13.3	Testes com 3min.....	76
<b>7.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>78</b>
7.1	Sobre o procedimento experimental.....	78
7.2	Sugestões futuras.....	79

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Exemplos de mesas pantográficas.....	2
FIGURA 2: Mesa pantográfica com articulador duplo.....	3
FIGURA 3: Mesa pantográfica com tampo giratório.....	3
FIGURA 4: Doca móvel para carga e descarga.....	3
FIGURA 5: Comparativo da densidade de energia de diferentes tipos de materiais inteligentes (LAGOUDAS, 2008).....	5
FIGURA 6: Comparativo das frequências de atuação de diferentes tipos de materiais inteligentes (LAGOUDAS, 2008).....	6
FIGURA 7: Atuador SMA linear simples (HUANG, 2002).....	7
FIGURA 8: Configurações dos atuadores de LMF (HUANG, 2002).....	8
FIGURA 9: Modelo de atuador linear em uma direção (PULNEV, 2004).....	8
FIGURA 10: Modelo de atuador linear que se move em duas direções proposto (PULNEV, 2004).....	9
FIGURA 11: LMF usada na redução de ruído de uma turbina (HARTL, 2010).....	9
FIGURA 12: Modelo dos fios atuadores de NiTi (COURA, 2016).....	10
FIGURA 13: Arcos ortodônticos de Nitinol.....	11
FIGURA 14: Stent com memória de forma.....	11
FIGURA 15: Válvula de transmissão atuada SMA (MOHD et, al., 2014).....	12
FIGURA 16: Força externa x deslocamento em liga SMA fria e quente.....	12
FIGURA 17: Força externa atuando junto com a mola SMA.....	13
FIGURA 18: Válvula de desvio aberta.....	13
FIGURA 19: Válvula de desvio fechada.....	14
FIGURA 20: Deformação da estrutura cristalina em uma liga de memória de forma.....	16
FIGURA 21: (a) Temperaturas de transformações de fase e (b) Evolução da fração volumétrica de martensita em função da temperatura (LAGOUDAS, 2008).....	17
FIGURA 22: Transformação $M_t \rightarrow M_d$ com aplicação de uma carga (LAGOUDAS, 2008).....	17
FIGURA 23: Descarregamento seguido de reaquecimento de uma LMF e suas estruturas (LAGOUDAS, 2008).....	18
FIGURA 24: Transformação de fases induzida por temperatura na presença de uma carga (LAGOUDAS, 2008).....	19

FIGURA 25: Diagrama tensão-deformação-temperatura exibindo o efeito memória de forma em uma liga NiTi (LAGOUDAS, 2008).....	19
FIGURA 26: Diagrama de fases com carregamento mecânico a temperatura nominal (LAGOUDAS, 2008).....	20
FIGURA 27: Exemplo de um gráfico de histerese. Adaptado de PAIVA <i>et al.</i> , 2004.....	21
FIGURA 28: Efeito memória de forma com tensão assistida (CZECHOWICZ, 2015).....	22
FIGURA 29: Carregamento termomecânico cíclico (50 ciclos) de uma liga NiTi sob tensão de 150 MPa (LAGOUDAS, 2008).....	24
FIGURA 30: Resposta pseudoelástica de um fio de NiTi com $A_f=65^\circ\text{C}$ , testada a $70^\circ\text{C}$ e a histerese pseudoelástica estabilizada após 20 ciclos (LAGOUDAS, 2008).....	24
FIGURA 31: Vista explodida com as molas de SMA (verdes) e de compressão (azul) na mesa. Fonte própria.....	25
FIGURA 32: Mesa na posição inferior com as molas de aço comprimida. Fonte própria.....	26
FIGURA 33: Mesa na posição superior com as molas ativadas. Fonte própria.....	26
FIGURA 34: Ensaio de tração. Fonte própria.....	29
FIGURA 35: Primeiro protótipo da mesa inteligente. Fonte própria.....	30
FIGURA 36: Primeira estrutura de testes utilizada. Fonte própria.....	31
FIGURA 37: Microestrutura de acordo com a temperatura. (1) mola aquecida, (2) mola resfriada. Fonte própria.....	32
FIGURA 38: Tampo de papelão e plástico. Fonte própria.....	33
FIGURA 39: Estrutura de testes final. Fonte própria.....	33
FIGURA 40: Microcontrolador Arduino Mega 2560.....	34
FIGURA 41: Sensor ultrassônico HC-SR04.....	34
FIGURA 42: Princípio de funcionamento do HC-SR04.....	35
FIGURA 43: Representação da ligação entre o sensor e o Arduino.....	35
FIGURA 44: Célula de carga 1kg.....	36
FIGURA 45: Amplificador de sinal HX711.....	36
FIGURA 46: Representação da ligação entre a célula de carga, o amplificador e o Arduino.....	37
FIGURA 47: Fonte elétrica DC POWER SUPPLY HY3003E-3. Fonte própria.....	37
FIGURA 48: Gráfico força por deslocamento do ensaio de tração. Fonte própria.....	40
FIGURA 49: Ensaio de tração da mola de aço. Fonte própria.....	41
FIGURA 50: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	43

FIGURA 51: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	44
FIGURA 52: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	45
FIGURA 53: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	46
FIGURA 54: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 2,0 A da mola 1. Fonte própria.....	48
FIGURA 55: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	49
FIGURA 56: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	50
FIGURA 57: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	51
FIGURA 58: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	53
FIGURA 59: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	54
FIGURA 60: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	55
FIGURA 61: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	57
FIGURA 62: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	58
FIGURA 63: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	59
FIGURA 64: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	60
FIGURA 65: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	61
FIGURA 66: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	63
FIGURA 67: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	64

FIGURA 68: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	65
FIGURA 69: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	66
FIGURA 70: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	68
FIGURA 71: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	69
FIGURA 72: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	70
FIGURA 73: Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	71
FIGURA 74: Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 1min para a Mola 1. Fonte própria.....	73
FIGURA 75: Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 1min para a Mola 2. Fonte própria.....	73
FIGURA 76: Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 2min para a Mola 1. Fonte própria.....	75
FIGURA 77: Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 2min para a Mola 2. Fonte própria.....	75
FIGURA 78: Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 3min para a Mola 1. Fonte própria.....	77
FIGURA 79: Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 3min para a Mola 2. Fonte própria.....	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Propriedades da mola de 0,75 mm de diâmetro do fio.....	28
TABELA 2: Propriedades da mola de 1,00 mm de diâmetro do fio.....	28
TABELA 3: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	43
TABELA 4: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	44
TABELA 5: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	45
TABELA 6: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	47
TABELA 7: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	48
TABELA 8: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	49
TABELA 9: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	51
TABELA 10: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	52
TABELA 11: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	53
TABELA 12: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	54
TABELA 13: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	56
TABELA 14: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	57
TABELA 15: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	58
TABELA 16: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	59

TABELA 17: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	61
TABELA 18: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	62
TABELA 19: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	63
TABELA 20: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	64
TABELA 21: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	66
TABELA 22: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	67
TABELA 23: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.....	68
TABELA 24: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.....	69
TABELA 25: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.....	70
TABELA 26: Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.....	71

# Capítulo 1

## Introdução

Atualmente na indústria, existem diversos sistemas de atuadores que permitem a transmissão de movimento e força para determinado dispositivo, sendo os mais comuns: o hidráulico, o pneumático e o eletromecânico. Porém, com o desenvolvimento da tecnologia, principalmente por parte das indústrias automobilística e aeroespacial, estes sistemas de atuação passaram a ser considerados muito pesados já que além dos atuadores, são compostos de outros elementos como bombas hidráulicas, compressores de ar e motores elétricos.

Como esses setores da indústria estão constantemente em busca da redução de peso já que o mesmo influencia no consumo de combustível, na capacidade de transporte de carga, dentre outros fatores, a substituição dos sistemas de atuação utilizados atualmente por sistemas mais leves tornou-se uma necessidade.

Com isso, um grupo de materiais chamados de materiais inteligentes começou a ganhar notoriedade na aplicação de sistemas de atuação. Estes materiais, em geral, apresentam uma resposta mecânica (mudança de forma ou propriedade física) quando submetidos a um campo não-mecânico (seja térmico, elétrico, magnético, etc.) ou até mesmo a uma tensão mecânica, e essa resposta tem uma magnitude maior do que materiais convencionais, como por exemplo em uma expansão térmica. Alguns exemplos de materiais inteligentes são os piezoelétricos, os piezomagnéticos, os magneto-strictivos e as ligas com memória de forma (do inglês, Shape Memory Alloys).

Neste estudo, pretende-se dar foco às ligas com memória de forma (LMF, sigla em português) que são uma classe única de materiais que possuem a habilidade de recuperar sua forma de acordo com a variação de temperatura. Essa recuperação pode ocorrer mesmo que o material esteja sob aplicação de altas cargas o que possibilita sua aplicação não só nas indústrias automobilística e aeroespacial, como também em outros setores como a biomedicina e a exploração de petróleo.

Baseando-se na aplicabilidade dessas ligas, buscou-se neste trabalho, criar uma mesa pantográfica com atuadores de LMF no lugar de um sistema hidráulico ou pneumático (que são geralmente mais usados). Isso reduziria o peso de todo o sistema e, portanto, permitiria que a mesa tivesse uma capacidade maior de levantamento de cargas e melhor ergonomia.



Uma mesa pantográfica é um equipamento de elevação destinado à transferência de cargas. Ocupa lugar de grande importância na ergonomia dando condições de trabalho aos operadores com a elevação, giro ou inclinação das cargas até as posições de trabalho, eliminando esforços repetitivos e preservando a saúde do ser humano. A mesa pode ser acionada através de um pedal ou por uma botoeira pneumática e é geralmente fabricada em aço, alumínio ou inox, dependendo da necessidade de aplicação.

Hoje, no mercado, há diversos tipos de mesas pantográficas, como pode-se ver na Figura 1, de forma que para cada necessidade há um tipo de equipamento específico. Pode-se citar aqui a mesa com articulador duplo (Figura 2) que proporciona um bom trabalho com cargas altas e mantém o palete sempre na altura ideal. A mesa com mola e tampo giratório, mostrada na Figura 3, que permite o fácil acesso a qualquer lado do palete ao operador sem que ele saia do lugar. Além disso, sua elevação é controlada pelo tipo de mola aplicada e a própria mercadoria nela condicionada, atua por gravidade, sobreposta ao piso é ideal para paletização. E a mesa doca, ideal para carga e descarga de caminhões ou nivelar alturas diferentes. Possui pestana de aproximação com veículo e está ilustrada na Figura 4.

O objetivo do trabalho, então, é projetar uma mesa com atuadores LMF que possam substituir os sistemas convencionais usados hoje no mercado a fim de promover melhorias no equipamento que facilitem também a vida do trabalhador. Deixando a mesa mais leve, o sistema terá não só uma maior capacidade de levantamento de cargas, como também facilitará o manuseio ou transporte por parte do operador, quando necessário. Outro benefício seria a possível redução dos custos de manutenção e maior segurança para o operador.



**Figura 1:** Exemplos de mesas pantográficas.



**Figura 2:** Mesa pantográfica com articulador duplo.



**Figura 3:** Mesa pantográfica com tampo giratório.



**Figura 4:** Doca móvel para carga e descarga.

## **1.1- Organização do trabalho**

Este trabalho será apresentado em seis capítulos. O capítulo 2 terá uma revisão bibliográfica para apresentar ao leitor alguns estudos e aplicações das ligas com memória de forma.

O capítulo 3 terá uma fundamentação teórica com conceitos sobre o comportamento das LMFs que serão usados para explicar os princípios do projeto no decorrer do trabalho.

O capítulo 4 apresentará o projeto inicial da mesa inteligente com base nos conceitos apresentados anteriormente e dará detalhes do seu funcionamento.

O capítulo 5 trará a metodologia experimental utilizada durante o estudo, incluindo todos os ensaios e testes feitos.

O capítulo 6 irá mostrar os resultados obtidos nestes ensaios e testes já explicados no capítulo 5.

E o capítulo 7 abordará as conclusões a que se pôde chegar sobre o procedimento experimental e trará sugestões para a continuação do trabalho.

## Capítulo 2

### Revisão bibliográfica

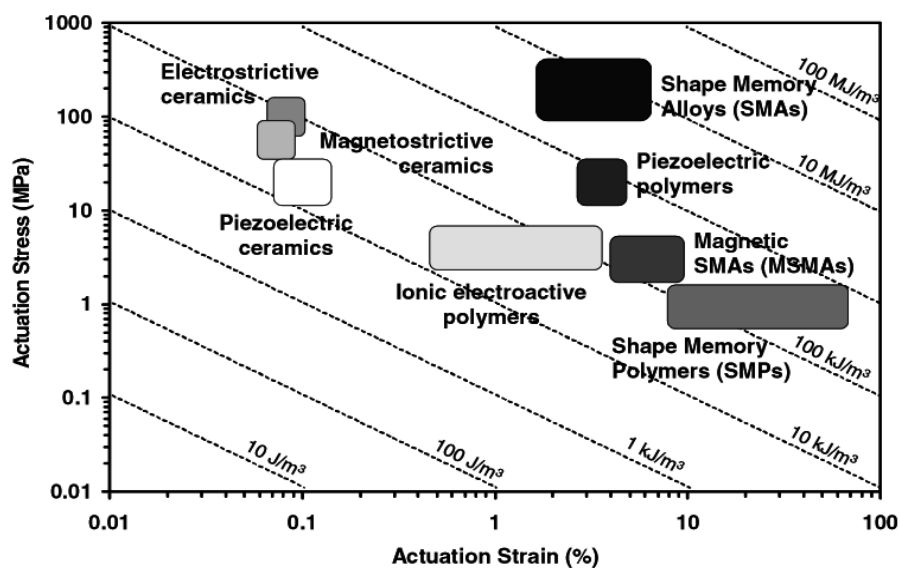
As ligas com memória de forma são importantes em diversas áreas quando agem como atuadores e respondem a estímulos térmicos ou mecânicos, alterando sua forma, rigidez, posição, entre outras características (AQUINO, 2011).

O potencial dessas ligas na condição de atuadores vem sendo ampliado em diversas áreas científicas.

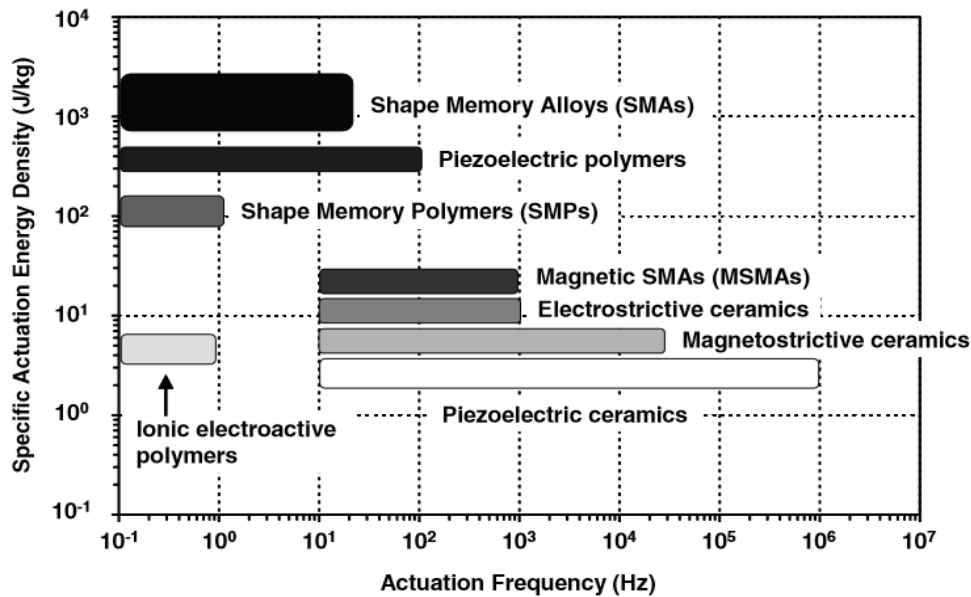
As ligas com memória de forma têm sido muito empregadas como sensores/atuadores inteligentes em uma extensa variedade de aplicações. Como setor aeroespacial, automotivo e área médica.

O aumento de pesquisas relacionadas a atuadores foca em uma busca contínua em reduzir o tamanho dos dispositivos, associando o alto desempenho com baixo volume, originando uma demanda do mercado por projetos mais eficientes, leves, compactos, simples, silenciosos e com menores custos (MONTEIRO *et al.*, 2013).

A atuação não só das ligas com memória de forma, assim como dos materiais inteligentes, no geral, depende de muitos fatores, sendo dois fundamentais: a densidade de energia (quantidade de energia que o material é capaz de absorver por unidade de volume) e a frequência de atuação do material (LAGOUDAS & KUMAR, 2008).



**Figura 5:** Comparativo da densidade de energia de diferentes tipos de materiais inteligentes. (LAGOUDAS, 2008).



**Figura 6:** Comparativo das frequências de atuação de diferentes tipos de materiais inteligentes (LAGOUDAS, 2008).

As Figuras 5 e 6 mostram as diferentes densidades de energia e frequência entre os materiais inteligentes mais comumente utilizados. É possível perceber através delas que as LMFs possuem alta densidade de energia, porém possuem uma frequência de atuação baixa quando comparadas a outros materiais inteligentes já que sua aplicação como atuador depende da troca de calor com o ambiente. Então, caso as LMFs sejam aplicadas em campos onde o tempo seja um fator determinante, será necessário um controle maior do processo de troca de calor, resultando assim em um abreviamento do tempo de resposta do atuador (PAIVA, 2017; ROMANO, 2008). Mais recentemente, um novo grupo de materiais inteligentes vem sendo pesquisado. São as chamadas ligas magnéticas com memória de forma (Magnetic Shape Memory Alloys - MSMAs, em inglês) que conseguem atingir patamares maiores de frequência de atuação (LAGOUDAS & KUMAR, 2008).

A descoberta da martensita nos metais na década de 1890 por Adolf Martens foi um grande passo para a descoberta das ligas com memória de forma. Primeiramente, a transformação foi observada no sistema Fe-C como um fenômeno irreversível, porém, em 1949, o conceito de transformação martensítica termoelástica introduzido por Kurdjumov e Khaznos, baseado em experimentos com ligas de CuZn e CuAl, explicou a transformação martensítica como um processo reversível.

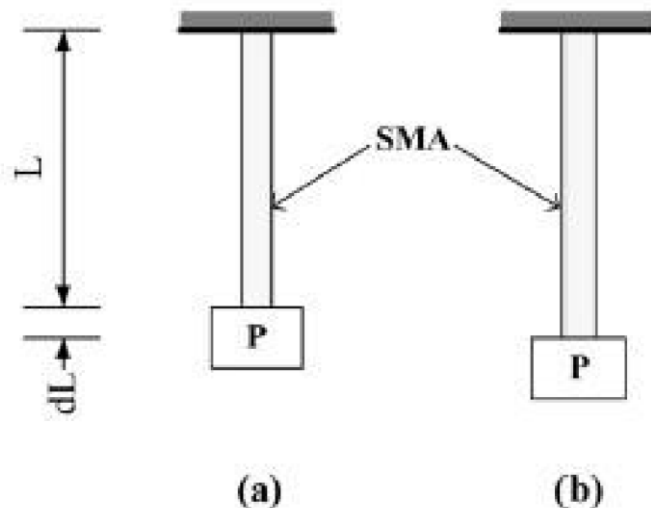
As aplicações na engenharia só vieram a acontecer a partir de 1963 com a descoberta das ligas NiTi por Buehler em um estudo sobre materiais com blindagem térmica onde foi

possível perceber que, além de boas propriedades mecânicas quando comparadas aos metais comuns que já eram usados no setor, essas ligas também possuíam a capacidade de recuperação de forma.

A partir daí as ligas a base de NiTi passaram a ser chamadas de "NiTiNOL" em homenagem ao local onde foram descobertas, o Naval Ordnance Laboratory (NOL). E, ao comportamento de recuperação de forma foi dado o nome de efeito memória de forma (Shape Memory Effect - SME). Neste período, os estudos sobre tratamentos térmicos, composição química e microestrutura foram vastamente investigados e serviram como um primeiro passo para o estudo das LMFs (LAGOUDAS & KUMAR, 2008).

Mais tarde, durante a década de 1970, essas ligas começaram a ter aplicações desenvolvidas na área biomédica e foram popularizadas comercialmente a partir da década de 1990, sendo aplicadas em atuadores por diversas vantagens, como: redução de peso, de sujeira e de ruídos, simplicidade do mecanismo, remotabilidade e baixa tensão elétrica aplicada (NESPOLI *et al.*, 2010)

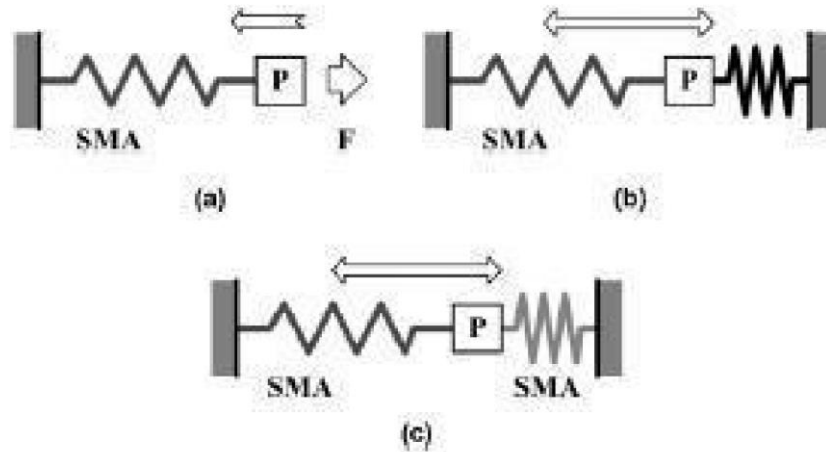
Em 2002, Huang apresentou os tipos básicos de atuadores LMF em seu trabalho, que consiste em um fio LMF a alta temperatura em seu comprimento normal. Em baixa temperatura, o fio apresenta-se tensionado e deformado  $dL$ , como mostra a Figura 7.



**Figura 7:** Atuador SMA linear simples (HUANG, 2002)

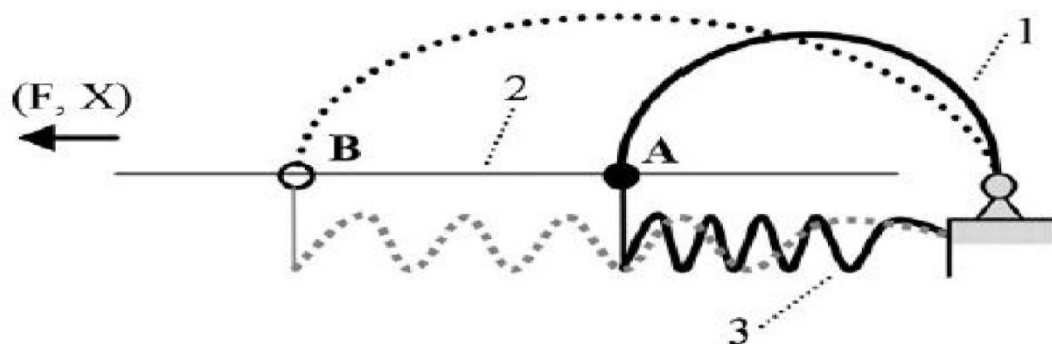
A Figura 8 mostra os três tipos básicos de atuadores, baseados no EMF da liga. A Figura 8 (a) mostra a configuração em que o atuador move o elemento P somente para uma direção, na Figura 8 (b) observa-se uma configuração em que o atuador utiliza uma mola para mover o elemento P para as duas direções e por fim, a Figura 8 (c) apresenta o tipo em que o

atuador é composto somente por LMF para mover o elemento P. Em todas as configurações apresentadas a LMF é pré-deformada.

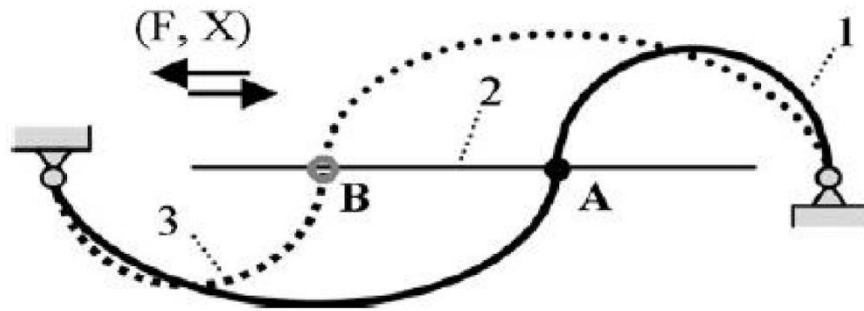


**Figura 8:** Configurações dos atuadores de LMF (HUANG, 2002)

Em 2004, PULNEV desenvolveu dois tipos de atuadores lineares por LMF. O primeiro, consiste num fio de CuAlNi e uma mola de aço. Ao fornecer calor ao fio, há uma mudança em sua forma, caracterizada pelo movimento do ponto A ao ponto B, gerando assim uma deformação na mola. Quando resfriado, a mola atua para retornar o fio ao seu formato original (Figura 9). O segundo atuador consiste em duas direções e dois fios LMF. Quando se aquece o fio 1, o comprimento do fio 1 aumenta, fazendo com que seu ponto mais extremo se desloque, do ponto A ao B. Então, o fio 2 é aquecido, causando o retorno do ponto à posição A. Como mostrado na Figura 10.



**Figura 9:** Modelo de atuador linear em uma direção (PULNEV, 2004)



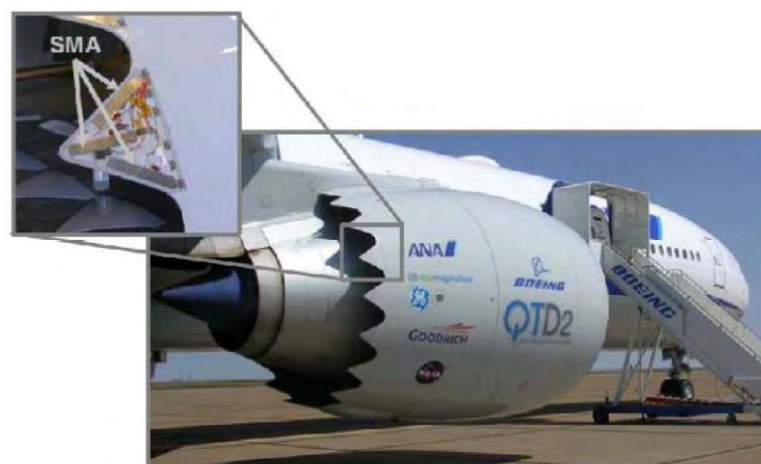
**Figura 10:** Modelo de atuador linear que se move em duas direções proposto (PULNEV, 2004).

A indústria aeroespacial tem a constante busca na redução de peso de suas aeronaves já que isto influencia no consumo de combustível, na quantidade de carga transportada pelas aeronaves, no aumento da eficiência das mesmas em voo, dentre outros (MAESTA, 2012).

Os atuadores clássicos, pneumáticos, hidráulicos ou eletromecânicos, podem ser de diversos tipos e tamanhos e, geralmente, possuem elevado peso devido ao grande número de componentes que são necessários para ativá-los, como motores, bombas, sensores, etc.

Uma possibilidade é a substituição dos sistemas de atuação usados atualmente por sistemas de atuação mais leves e com funcionamento mais simples, por isso as ligas com memória de forma tornam-se grandes candidatas para essa aplicação.

As LMFs já são utilizadas pela indústria aeroespacial, como por exemplo, para reduzir o ruído gerado pelas turbinas durante a decolagem e a aterrissagem de uma aeronave, como mostrado na Figura 11.

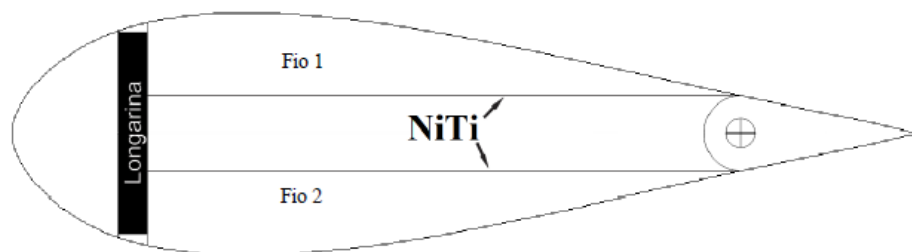


**Figura 11:** LMF usada na redução de ruído de uma turbina (HARTL, 2010).



Para esta aplicação os elementos de LMF são usados para dobrar as bordas em “V” durante o vôo a baixa altitude e baixa velocidade de vôo, aumentando, assim, a mistura de gases e reduzindo o ruído gerado. Durante velocidades e altitudes de cruzeiro, os componentes de LMF esfriam, alinhado a forma de “V” que resulta no aumento do desempenho do motor (AQUINO, 2011).

Há também atuadores de LMF que tem a função de mover uma das superfícies de controle de uma aeronave. A Figura 12 mostra um modelo de atuador composto por dois fios de NiTi que são posicionados no flap de um aeromodelo.



**Figura 12:** Modelo dos fios atuadores de NiTi (COURA, 2016).

Os fios de NiTi são presos nas extremidades do sistema de forma antagônica de forma que o fio acionado causa deformação no fio adjacente, e vice-versa. Uma das extremidades dos fios é presa a uma superfície fixa que pode ser a longarina ou a própria estrutura da asa, desde que esta extremidade não se mova. A outra extremidade dos fios é presa no elemento atuado, no caso o flap, mas poderia ser qualquer outra das superfícies de comando da aeronave.

Seu princípio de funcionamento é bem simples. Quando o fio 1 é acionado, o mesmo é aquecido e, pelo efeito memória de forma, encurta-se, causando um movimento giratório no sentido anti-horário. Ao mesmo tempo, esse processo causará uma extensão do fio 2, que será tracionado com deformação de magnitude igual a da deformação recuperada pelo fio 1. Quando o fio 2 é acionado, ocorre o oposto. O fio 2 é aquecido e recupera parte de sua forma original ao atingir uma temperatura crítica do material, tracionado o fio 1 e resultando em um movimento giratório no sentido horário.

No setor de biomedicina, as LMFs também vêm sendo bastante utilizadas. Desde os anos 1970, arcos de Nitinol são usados de maneira efetiva em tratamentos ortodônticos. A vantagem destes arcos pseudoelásticos é que eles conseguem atuar em um "plateau" pseudoelástico, estado em que o material tem mudança de tensão quase igual a zero com um incremento de deformação considerável, em outras palavras, esses arcos de Nitinol utilizam

sua capacidade de pseudoelasticidade para fornecer uma tensão de restituição uniforme e praticamente constante, fazendo com que não sejam necessários repetidos apertos e assim, reduzindo o processo corretivo.

Além disso, devido a sua boa biocompatibilidade, os materiais com memória de forma também passaram a ser aplicados em stents cardiovasculares, que são aparelhos com a função de manter uma artéria aberta e sustentar o fluxo sanguíneo. As duas aplicações estão ilustradas nas Figuras 13 e 14, abaixo.

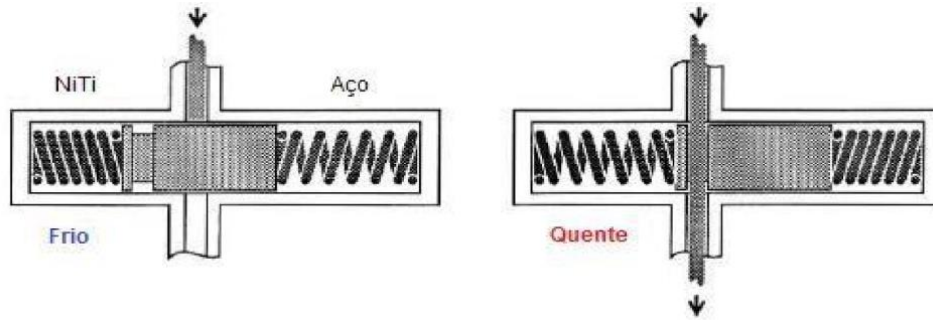


**Figura 13:** Arcos ortodônticos de Nitinol.



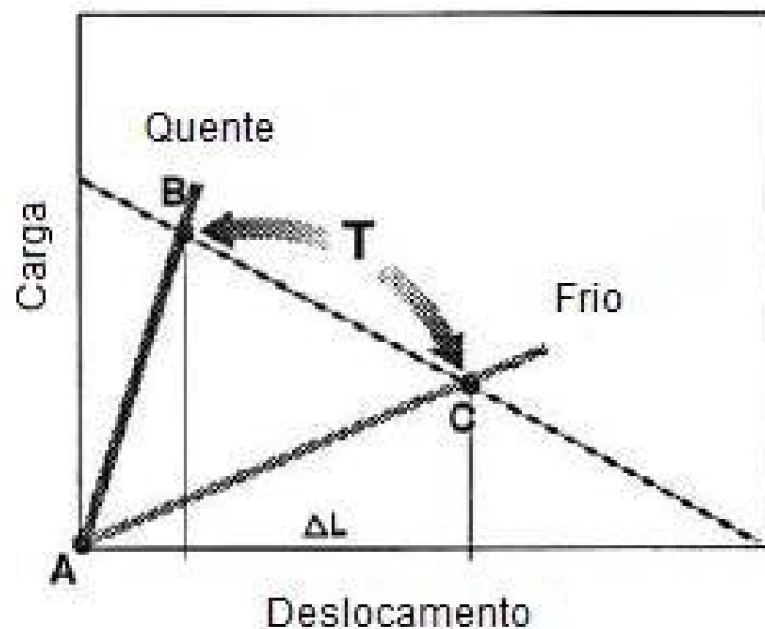
**Figura 14:** Stent com memória de forma.

Na indústria automobilística, os materiais com memória de forma também ganharam seu espaço. A Mercedes-Benz utiliza um dispositivo de NiTi na atuação de válvulas de transmissão automática em seus veículos. O dispositivo trabalha em uma posição fechada a frio e, quando a temperatura do sistema alcança a adequada, o sistema é atuado passando para a configuração aberta, como ilustra a Figura 15.

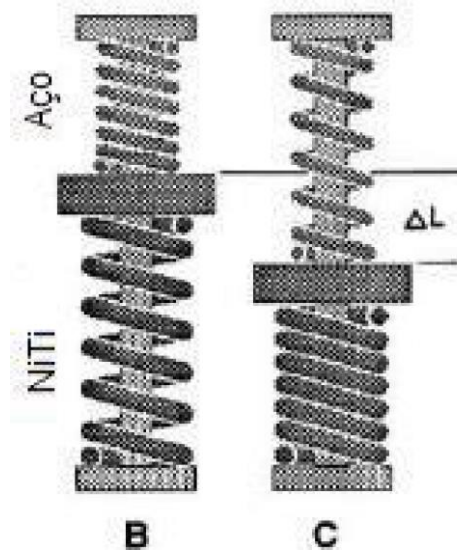


**Figura 15:** Válvula de transmissão atuada SMA (MOHD et, al., 2014).

Ao se utilizar uma mola elástica para funcionar junto com a mola LMF no sistema de atuação, a curva de força/deformação para esta mola tem que ser sobreposta às características austeníticas e martensíticas da mola LMF. Em altas temperaturas (na condição austenítica) a mola LMF é forte o suficiente para comprimir a mola de aço. No entanto, a baixas temperaturas (no estado martensítico) a mola de aço é capaz de comprimir a mola LMF (figuras 16 e 17). As chamadas TVR springs (molas termo variáveis) tem sido utilizadas com sucesso como sensores-atuadores nas áreas de compensação térmica, acionamento térmico e proteção térmica.

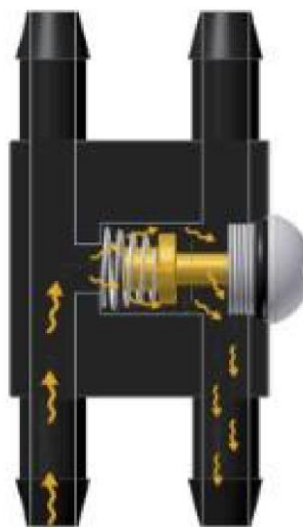


**Figura 16:** Força externa x deslocamento em liga SMA fria e quente.

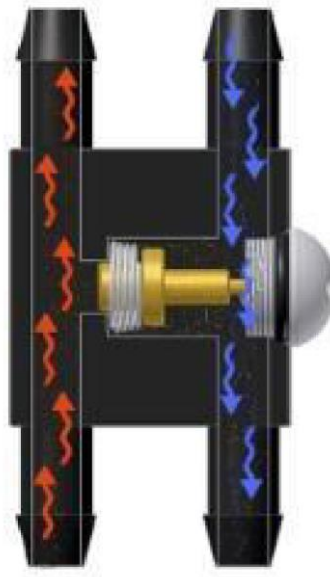


**Figura 17:** Força externa atuando junto com a mola SMA.

As válvulas by-pass ou simplesmente válvulas de desvio, também utilizam ligas NiTi, como podemos observar nas Figuras 18 e 19. A pressão no sistema hidráulico de uma transmissão automática é maior em baixas temperaturas, devido a maior viscosidade do óleo. Em temperaturas normais o óleo toma o caminho de menor resistência e passa pela cavidade da válvula em vez de ir para o radiador. Com elevadas temperaturas, a mola SMA atua fechando a válvula e o óleo vai direto para o radiador.



**Figura 18:** Válvula de desvio aberta.



**Figura 19:** Válvula de desvio fechada.

## Capítulo 3

### Fundamentos teóricos

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

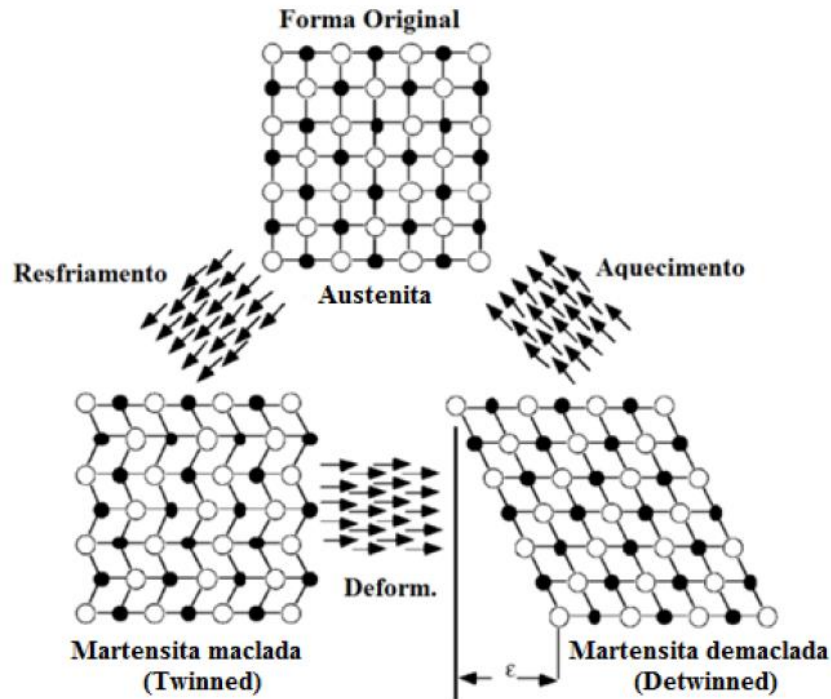
#### 3.1 - Ligas com memória de forma

Liga com memória de forma é um termo aplicado ao grupo de materiais metálicos que demonstram a capacidade de recuperar sua forma original mesmo após sofrerem deformações relativamente grandes, devido a um carregamento mecânico ou térmico, os quais irão induzir transformações de fase na respectiva liga. As ligas a base de Níquel e Titânio, Ni-Ti são as mais utilizadas em aplicações comerciais por combinar as propriedades associadas às ligas com memória de forma com boas propriedades mecânicas. (LAGOUDAS, 2008). Além destas, também são muito utilizadas as ligas a base de Cobre, tais como Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni

#### 3.2 - Comportamento da estrutura cristalina

Distinto das ligas de Fe-C, onde a fase martensítica pode possuir uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) ou uma estrutura monocíclica e a fase austenítica, uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), o carbono precisa migrar dentro da estrutura. Em ligas com memória de forma não existe migração de átomos na microestrutura, a transformação ocorre apenas pela reorganização dos átomos, ou seja, não ocorre por difusão de átomos e sim, por distorção da rede de cisalhamento. Isso faz com que esse efeito nas LMF não dependa do tempo, apenas de um estímulo termomecânico adequado. Estes estímulos podem resultar em uma estrutura de martensita maclada ( $M_t$ ), quando induzida por temperatura, e a não maclada ou demaclada ( $M_d$ ), induzida por tensão (trativa ou compressiva). Cada cristal martensítico pode ter diferentes orientações, o que dá-se o nome de variantes. A montagem destas variantes martensíticas é que vão determinar a martensita gerada de forma que, quando as variantes acomodam-se entre si, tem-se martensita maclada e, quando uma variante se torna dominante, tem-se martensita demaclada.

Quando a fase dominante tem a presença de martensita demaçada e há aumento da temperatura, retornamos à forma cúbica de face centrada, fase austenítica. O comportamento da estrutura cristalina em relação aos estímulos termomecânicos pode ser definido pela Figura 20.

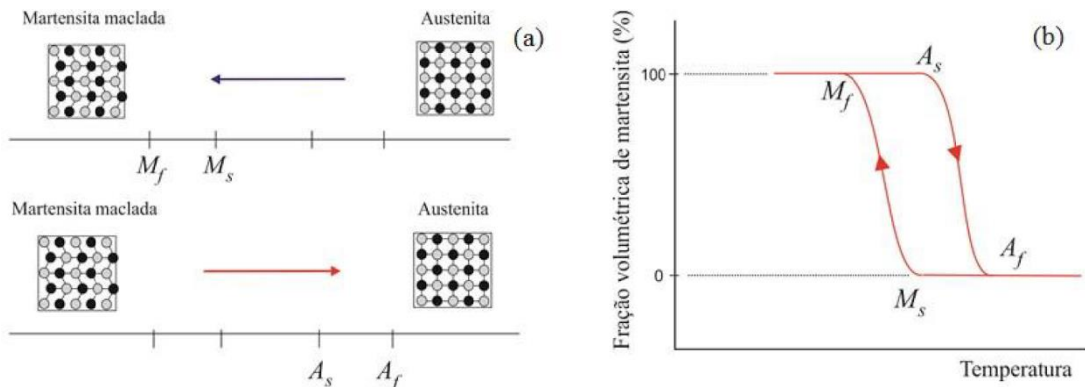


**Figura 20:** Deformação da estrutura cristalina em uma liga de memória de forma.

Através da Figura 20, é possível perceber que as ligas com memória de forma apresentam duas fases com diferentes estruturas cristalinas, quando analisadas em uma variação de temperatura de operação ou quando há uma variação de carregamento mecânico, e portanto, diferentes propriedades. De forma que a austenita ( $A$ ) é estável a altas temperaturas e a martensita ( $M$ ) é estável a baixas temperaturas.

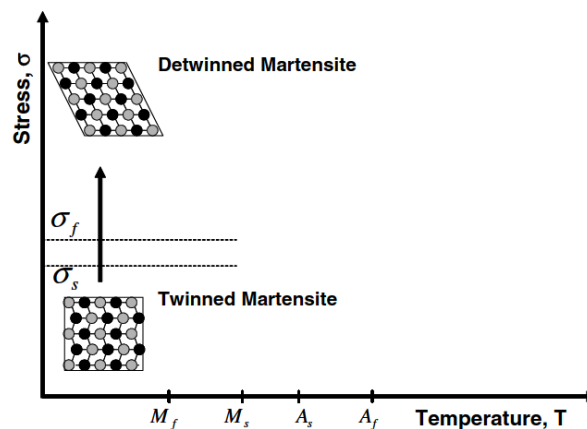
Quando uma LMF é resfriada sem uma carga aplicada, a estrutura cristalina muda de austenita para martensita maclada ( $A \rightarrow M_t$ ) e essa transformação é denominada transformação martensítica ( $T_M$ ). A  $T_M$  pode ser caracterizada pelas temperaturas em que começa e termina a mudança na estrutura cristalina do material, de forma que, quando se atinge uma temperatura crítica  $M_s$ , tem-se o início da  $T_M$  através do mecanismo de cisalhamento. E, quando o resfriamento chega a uma temperatura denominada  $M_f$ , a  $T_M$  acaba, deixando apenas martensita maclada.

Quando a liga é reaquecida, a estrutura cristalina volta a ser austenita em um processo que recebe o nome de transformação reversa ( $T_R$ ). Essa transformação tem início em uma temperatura  $A_s$  e termina em uma temperatura  $A_f$  onde a liga será totalmente austenita de novo. Este processo caracteriza o efeito memória de forma e pode ser visto na Figura 21.



**Figura 21:** (a) Temperaturas de transformações de fase e (b) Evolução da fração volumétrica de martensita em função da temperatura (LAGOUDAS, 2008).

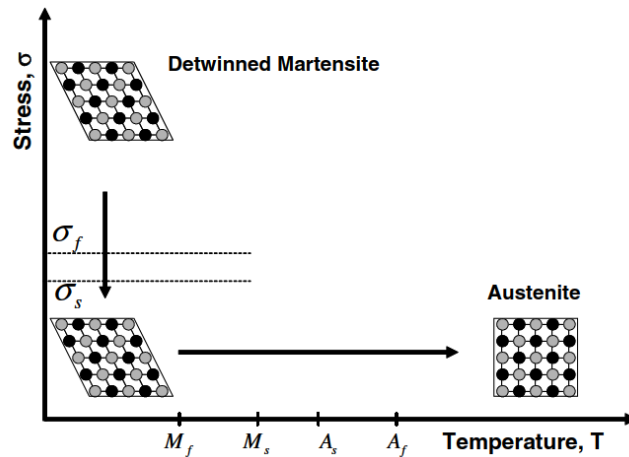
Caso seja aplicada uma carga à liga em baixas temperaturas, ou seja, enquanto martensita maclada, é possível demaclar a martensita através da reorientação de uma certa quantidade de variantes. O que ocorre é que as interfaces formadas na  $T_M$  são móveis, então, com a aplicação de uma tensão, como na Figura 22, há o começo do movimento dos contornos das variantes, promovendo o crescimento daquelas que estão orientadas em relação à direção da tensão aplicada e, por consequência, a reorientação da martensita, originando a martensita não maclada.



**Figura 22:** Transformação  $M_t \rightarrow M_d$  com aplicação de uma carga (LAGOUDAS, 2008).



Pelo efeito memória de forma, se a martensita demaçada for reauecida acima de  $A_f$ , acontecerá a  $T_R$  e a liga voltará a ser completamente austenítica, promovendo uma recuperação de forma completa, como mostrado na Figura 23. Porém, se for feito um resfriamento abaixo de  $M_f$ , o material terá novamente a forma de martensita maçada sem nenhuma mudança de forma associada, conforme a Figura 20.



**Figura 23:** Descarregamento seguido de reauecimento de uma LMF e suas estruturas (LAGOUDAS, 2008).

Essas temperaturas definidas,  $A_f$  e  $M_f$ , assim como  $A_s$  e  $M_s$ , variam de acordo com a composição química e o histórico termomecânico da liga e as cargas aplicadas devem obedecer a uma margem de magnitude que atenda uma magnitude mínima capaz de começar o processo de mação, denominada  $\sigma_s$ . As cargas suficientemente grandes para demaçar totalmente a martensita recebem a denominação de  $\sigma_f$  (Figura 24).

Quando o material é resfriado com uma carga aplicada à fase austenítica maior que  $\sigma_s$ , a transformação vai resultar diretamente em martensita demaçada e vai haver uma mudança de forma. Pode-se recuperar a forma do material reauecendo-o enquanto a tensão ainda estiver sendo aplicada.

Dito isso, deve-se observar que as temperaturas de transformação vão depender da magnitude da carga aplicada de forma que quanto maior a carga aplicada, maiores são as temperaturas de transformação. Sob a ação de uma carga uniaxial com uma deformação correspondente  $\sigma$ , determina-se as temperaturas de transformação  $M_f^\sigma$  (fim da transformação martensítica),  $M_s^\sigma$  (início da transformação martensítica),  $A_s^\sigma$  (início da transformação reversa) e  $A_f^\sigma$  (fim da transformação reversa).

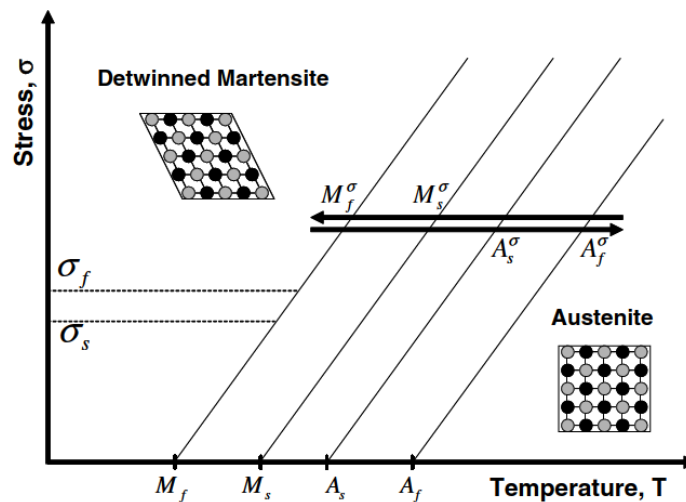


Figura 24: Transformação de fases induzida por temperatura na presença de uma carga (LAGOUDAS, 2008).

### 3.3 - Efeito memória de forma

Uma liga com memória de forma apresenta o efeito memória de forma (*EMF*) quando é deformada em martensita maclada e descarregada a uma temperatura abaixo de  $A_s$ . Quando a liga é reaquecida a uma temperatura acima de  $A_f$ , a mesma irá reganhar sua forma original voltando a sua fase-mãe austenita. A Figura 25 abaixo representa um diagrama tensão-deformação-temperatura de uma liga NiTi testada sob ação de uma carga uniaxial.

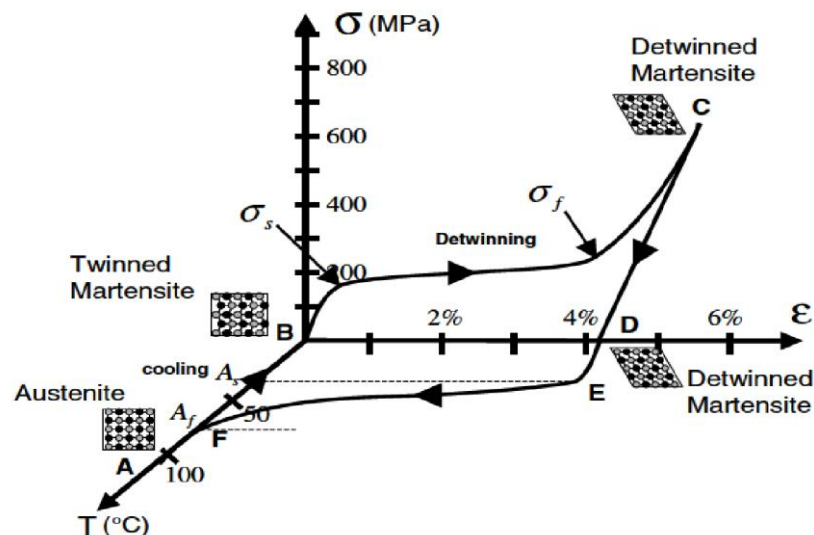


Figura 25: Diagrama tensão-deformação-temperatura exibindo o efeito memória de forma em uma liga NiTi (LAGOUDAS, 2008).

Começando do ponto A, onde está presente somente fase-mãe, austenita, a liga começa a ser resfriada sem aplicação de carga, passa pelas temperaturas  $A_f$  e  $A_s$  até chegar no ponto B, onde se transforma em martensita maclada. A partir deste momento, a liga começa a receber uma carga que vai aumentando até que ultrapasse  $\sigma_s$  (carga necessária para o início do processo de reorientação) e, posteriormente, ultrapasse também  $\sigma_f$  onde a martensita se encontrará totalmente demaçada no ponto C. O material, então, começa a ser descarregado elasticamente até chegar no ponto D com  $\sigma=0$ , ainda como martensita demaçada. É quando começa o reaquecimento e a temperatura atinge novamente  $A_s$  que a transformação reversa tem seu início. E após atingir a temperatura  $A_f$ , a transformação se completa fechando o ciclo novamente no ponto A onde só existe austenita.

### 3.4 - Pseudoelasticidade

O comportamento pseudoelástico das LMF está associado à transformação induzida por tensão que gera uma deformação durante a aplicação de uma carga e uma subsequente recuperação dessa deformação durante a retirada de carga em temperaturas acima de  $A_f$ .

Um carregamento termomecânico desse tipo geralmente começa em temperaturas suficientemente grandes onde só exista fase austenita, se desenvolve, sob tensão, a um estado onde a martensita demaçada se encontra estável e por último, retorna a um estado zero tensão onde haverá somente austenita novamente. Um exemplo desse processo está descrito na Figura 26, abaixo.

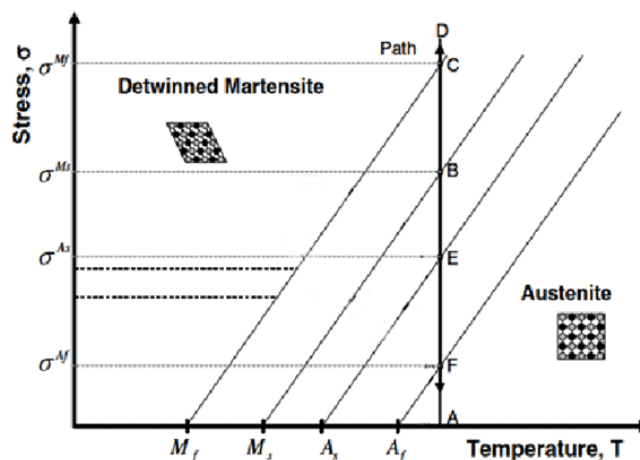
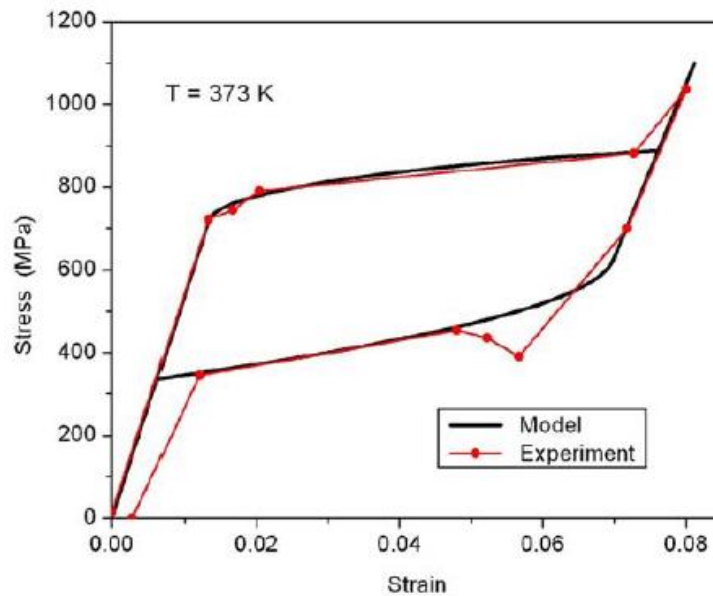


Figura 26: Diagrama de fases com carregamento mecânico a temperatura nominal (LAGOUDAS, 2008).

Para ilustrar com mais clareza o comportamento pseudoelástico, pode-se considerar uma temperatura nominal. Começando do ponto A, a carga começa a ser aplicada e o próximo ponto será B, onde começa a transformação para martensita demaçada a uma tensão igual a  $\sigma^{Ms}$ . Logo depois, no ponto C, a tensão será igual a  $\sigma^{Mf}$  e a liga se encontrará totalmente como martensita demaçada. No ponto D, ainda há aumento na tensão porém nada ocorre na estrutura a não ser deformação elástica na martensita presente. Quando a tensão é aliviada, o diagrama chega ao ponto E, onde a tensão é de  $\sigma^{As}$ , ou seja, tensão necessária para o começo da transformação reversa que, vai terminar no ponto F com tensão igual a  $\sigma^{Af}$ . O ciclo de tensão e deformação se comporta como no gráfico de histerese apresentado na Figura 27.



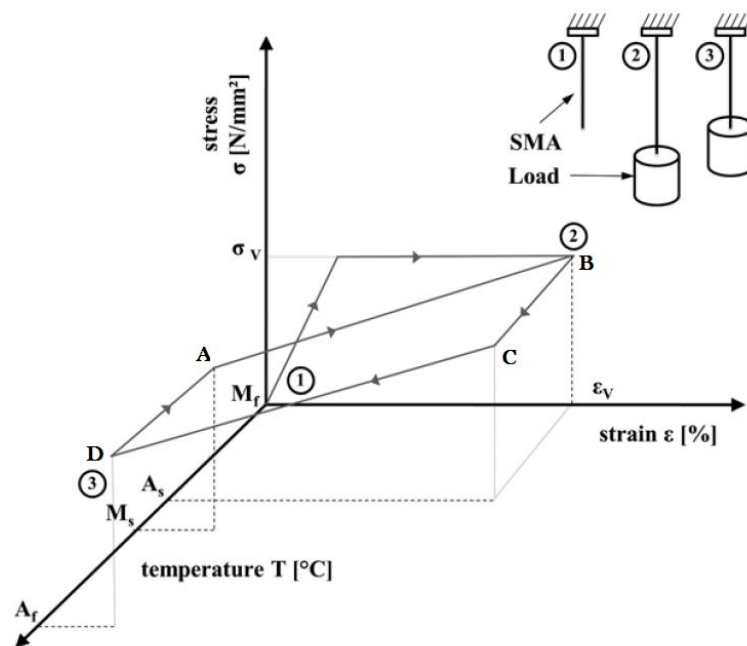
**Figura 27:** Exemplo de um gráfico de histerese. Adaptado de PAIVA *et al.*, 2004.

### 3.5 - Memória de forma com tensão assistida

Esse tipo de efeito memória de forma descreve o comportamento de elementos que estão continuamente submetidos a uma pré-carga mecânica. A Figura 28 representa um diagrama tensão-deformação-temperatura inicialmente uma liga SMA se encontra totalmente martensítica. A partir do ponto 1, a martensita começa a se deformar devido a uma carga externa até alcançar seu limite de elasticidade no ponto 2. Neste ponto, a martensita encontra-se demaçada. Quando a liga SMA é aquecida, a transformação para austenita começa na temperatura  $A_s$  e se completa na temperatura  $A_f$ , no ponto 3.

Por causa da tensão aplicada constantemente, por uma carga externa, o material é deformado diretamente a uma estrutura martensítica demaçada durante o processo de resfriamento. E a transformação de fase para austenita novamente pode ser acionada por efeito Joule a fim de contrair uma mola por corrente elétrica, por exemplo. Uma liga SMA pode exercer uma reação mecânica ao nível de tensão aplicada e o produto desta reação é uma força resultante que pode ser utilizada para trabalhos mecânicos.

Através de estratégias de controle, é possível manter posições intermediárias ao longo da curva de histerese, o que permite o uso de ligas SMA como atuadores.



**Figura 28:** Efeito memória de forma com tensão assistida (CZECHOWICZ, 2015).

### 3.6 - Comportamentos cíclicos das LMF

Agora que já foi apresentado o comportamento uniaxial de uma LMF, pode-se dizer que em alguns processos, uma LMF pode exibir mudanças de forma repetitivas quando submetida a mudanças de temperatura cíclicas sem aplicação de carga.

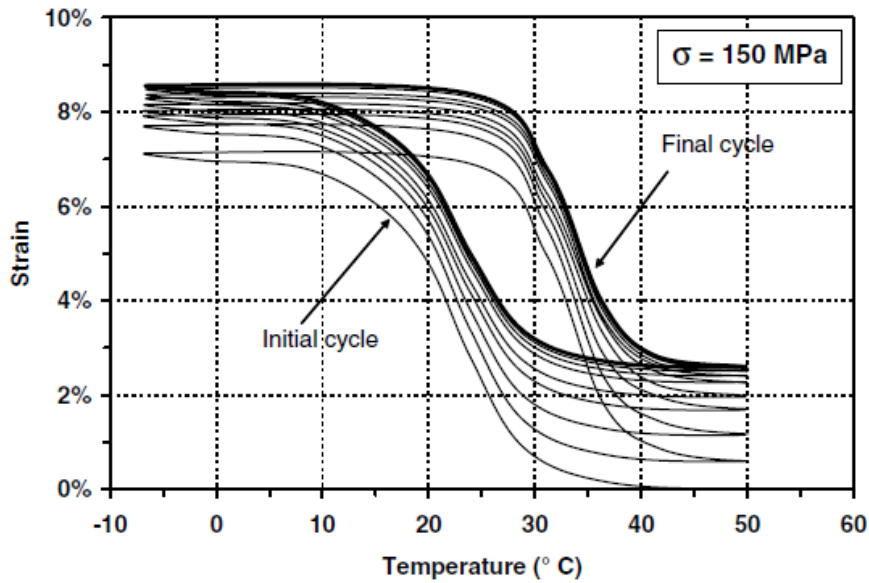
Esse comportamento é chamado de efeito memória de forma bidimensional (two-way shape memory effect - TWSME, em inglês) e pode ser observado em um material que tenha passado por um ciclo termomecânico (treinamento), Figuras 29 e 30. A repetição por um número grande de ciclos pode induzir mudanças na microestrutura do material, o que causa mudanças permanentes macroscopicamente.

O termo "treinamento" é geralmente usado para se referir a um processo em que a liga é submetida à ciclagem térmica e/ou mecânica de modo a induzir  $T_M$  e  $T_R$  sucessivamente, podendo-se estabilizar a martensita. Isso acontece porque o processo de treinamento cria um caminho preferencial de orientação das variantes de martensita na direção do carregamento (MILLER & LAGOUDAS, 2001). Muitos autores referem-se a esse processo como sendo um tipo de tratamento termomecânico. Apesar de estar correto, o fato de o processo de trabalho a frio seguido de recozimento ser usualmente chamado de tratamento termomecânico pode gerar ambiguidades ao se associar esse termo também ao processo de treinamento.

O resultado do treinamento é a introdução de defeitos na microestrutura do material, decorrente da tensão e/ou temperatura cíclicas pela região de transformação, resultado em um aumento na resistência da liga. Isso dificulta a geração de novos deslocamentos durante a aplicação real da LMF em dispositivos (ATLI *et al.*, 2013), resultando assim em um comportamento mais estável quando em serviço. Além disso, a realização do treinamento na liga antes de sua aplicação em dispositivos pode melhorar a sua resistência à fadiga, pois o acúmulo de defeitos na microestrutura aumenta a histerese térmica do comportamento de transformação, promove o endurecimento da liga e melhora o efeito memória de forma (URBINA *et al.*, 2009).

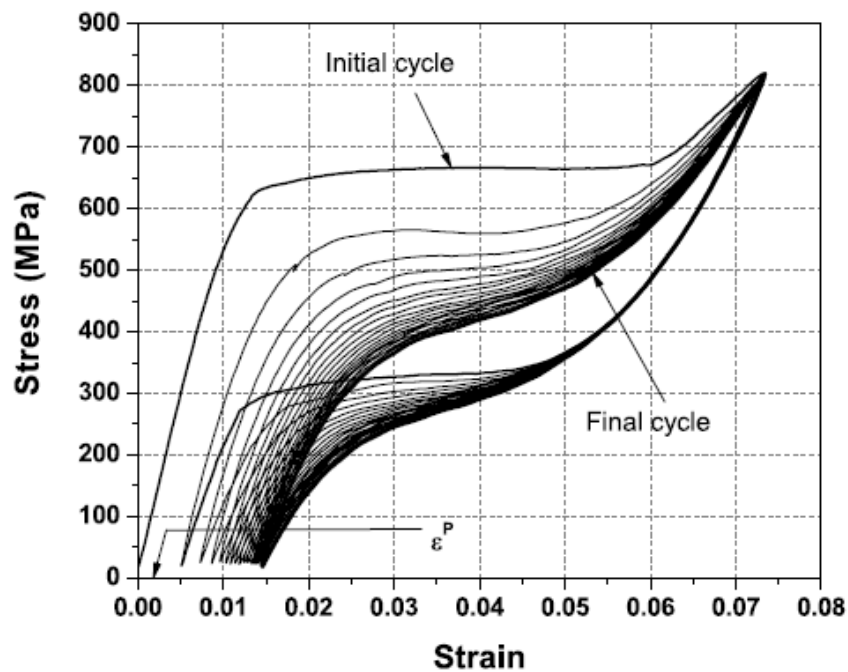
Em termos microestruturais, a presença de deslocamentos produz tensões residuais que favorecem a nucleação e o crescimento de variantes preferenciais de martensita e também dificulta a ocorrência da  $T_R$ , fazendo com que a martensita possa ser estabilizada (MITWALLY & FARAG, 2009). Do ponto de vista termodinâmico, os deslocamentos resultantes do treinamento têm menor energia nas variantes "treinadas", de forma que o crescimento dessas variantes será termodinamicamente favorecido. Uma vez que a densidade de deslocamentos aumenta com o número de ciclos até um valor de saturação, o favorecimento termodinâmico das variantes treinadas também aumenta até um certo valor.

Analogamente, a estabilidade e a reprodutibilidade do EMF aumentam com o número de ciclos (HUMBEECK & STALMANS, 1998). Em outras palavras, uma tensão residual permanece na estrutura do material após cada ciclo e, a cada ciclo que passa, essa tensão deixada vai ficando menor até que se chegue a saturação (MILLER & LAGOUDAS, 2001), fazendo com que a partir daí nenhuma alteração significativa nas propriedades funcionais seja mais observada.



**Figura 29:** Carregamento termomecânico cíclico (50 ciclos) de uma liga NiTi sob tensão de 150 MPa (LAGOUDAS, 2008).

Um comportamento similar pode ser observado no caso de um ciclo mecânico de uma LMF em seu regime pseudoelástico até a saturação como pode ser visto na figura abaixo.

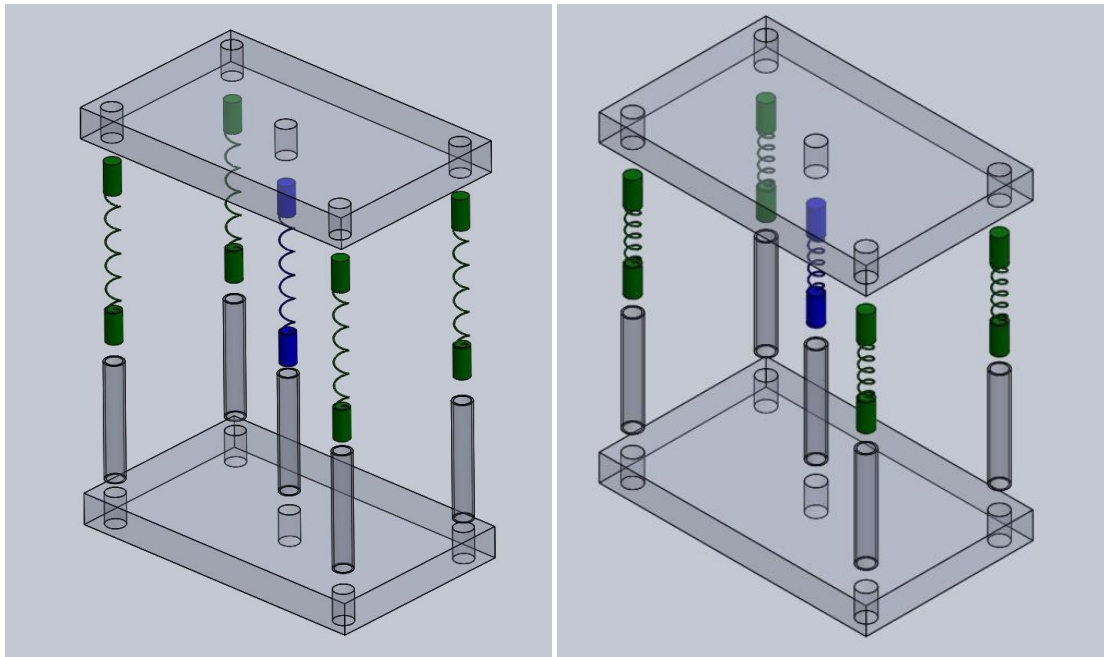


**Figura 30:** Resposta pseudoelástica de um fio de NiTi com  $A_f=65^\circ\text{C}$ , testada a  $70^\circ\text{C}$  e a histerese pseudoelástica estabilizada após 20 ciclos (LAGOUDAS, 2008).

## Capítulo 4

### Projeto da mesa pantográfica inteligente

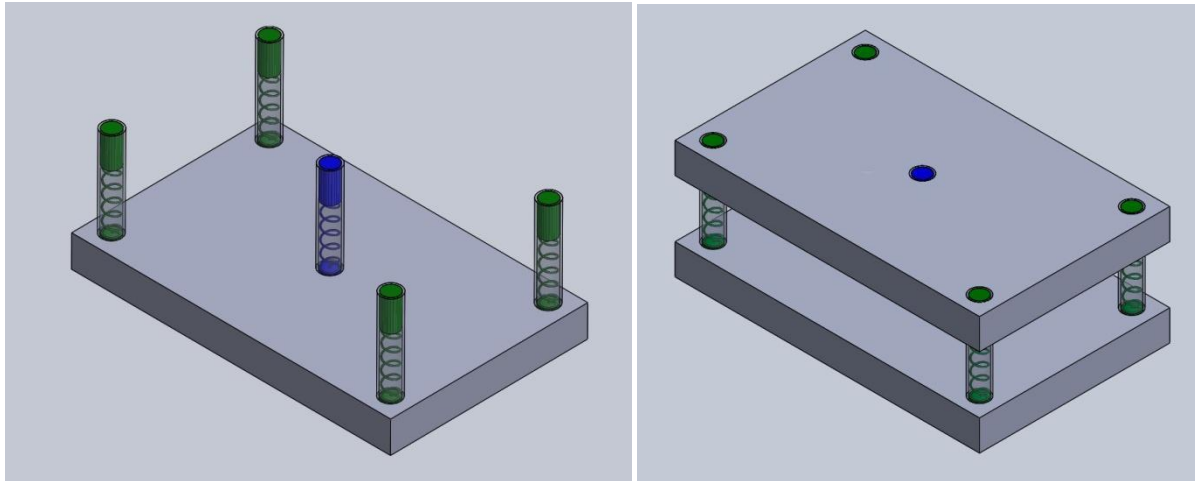
Para projetar a mesa inteligente, deve-se avaliar a função que ela vai exercer. No caso, a mesa deve apenas mudar uma carga de nível (erguendo-a ou abaixando-a) sem qualquer tipo de inclinação, a princípio. A fim de realizar essa tarefa, ficou definida a aplicação de quatro molas de SMA que serão posicionadas nos vértices da mesa cuja geometria será quadrada. E, mais uma mola de aço, de compressão que terá a função de restringir o movimento da mesa e será posicionada no centro da mesa, conforme apresentado na Figura 31.



**Figura 31:** Vista explodida com as molas de SMA (verdes) e de compressão (azul) na mesa. Fonte própria.

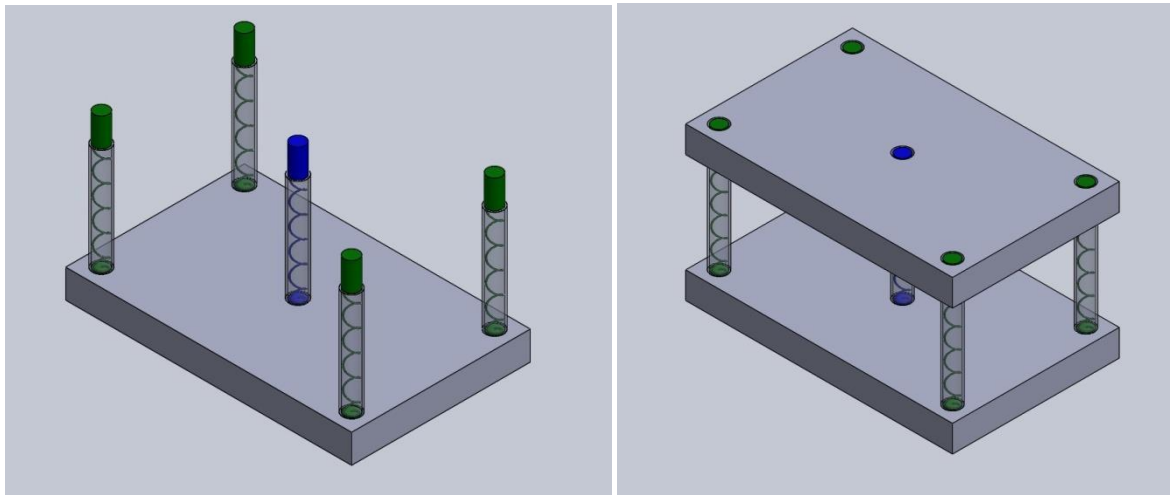
A partir dessas considerações, duas posições de trabalho foram analisadas: a primeira seria na posição mais baixa da mesa (Figura 32). A segunda seria na sua posição superior (Figura 33). A posição 1 é a representação da mesa na sua posição inferior, posição em que as molas de SMA se encontram aquecidas e, portanto, na fase austenita, e a mola de compressão se encontra comprimida, conforme a Figura 32 abaixo.





**Figura 32:** Mesa na posição inferior com as molas de aço comprimida. Fonte própria.

Quando se retira a corrente, as molas de LMF se resfriam, entrando na fase martensita e a mola de compressão se descomprime, fazendo a mesa ir para a posição 2, onde se encontram com uma microestrutura de martensita não maclada e maclada ou simplesmente não maclada, com a mesa na sua posição superior, como já citado anteriormente, conforme mostrado na Figura 33.



**Figura 33:** Mesa na posição superior com as molas ativadas. Fonte própria.

Desta forma, o projeto atua pelo conceito do efeito memória de forma com tensão assistida (Stress-Assisted Two-Way Memory Effect - SATWME) já descrito no capítulo anterior. Fazendo uma relação do funcionamento prático com o diagrama apresentado na Figura 28, em 1, as molas de SMA se encontram com uma estrutura cristalina de martensita maclada.

A partir do ponto A, as molas de compressão começam a carregar as molas de SMA com uma tensão até atingir o ponto B (posição 2). Neste ponto há uma transformação de toda a microestrutura em martensita não maclada. Seguindo o ciclo de carregamento termomecânico, as molas de SMA sofrem um carregamento térmico e são aquecidas até uma temperatura  $A_s$  (temperatura de início de transformação da austenita), onde começa a transformação da fase da martensita não maclada para a fase austenita (ponto C). Quando o carregamento térmico atinge o ponto D, a temperatura  $A_f$  é atingida. Neste ponto, toda a fase de martensita não maclada é transformada na fase autênica (posição 3). A partir deste momento, as molas de SMA são resfriadas devido a troca de calor com o ambiente onde o carregamento termomecânico retorna ao ponto A e começa a se repetir.

## Capítulo 5

### Metodologia experimental

#### 5.1 - Molas utilizadas

Foram escolhidas duas molas de SMA para efeito de comparação neste projeto, uma com diâmetro do fio igual a 0,75 mm (Mola 1) e outra com diâmetro do fio igual a 1,00 mm (Mola 2). As propriedades das molas, segundo o fabricante *DYNALLOY, Inc.*, estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente:

**Tabela 1:** Propriedades da mola de 0,75 mm de diâmetro do fio.

Comprimento mínimo	29,00 mm
Comprimento máximo	140,00 mm
Corrente máxima suportada	3,00 A
Diâmetro do fio	0,75 mm
Diâmetro externo	6,10 mm
Nº de espiras ativas	20
$A_f$	70-80°C

**Tabela 2:** Propriedades da mola de 1,00 mm de diâmetro do fio.

Comprimento mínimo	25,70 mm
Comprimento máximo	125,50 mm
Corrente máxima suportada	*
Diâmetro do fio	1,00 mm
Diâmetro externo	6,30 mm
Nº de espiras ativas	21
$A_f$	*

\*Não foi possível ter acesso às especificações do fabricante.

Ainda houve a utilização de uma mola de tração de aço que tinha a função de restituir o movimento da mesa, antagonizando as molas de SMA. Esta mola em questão tinha o diâmetro do fio igual a 0,50 mm e o diâmetro externo igual a 11,60 mm.

## 5.2 - Caracterização das molas utilizadas

### 5.2.1 - Ensaio de tração

O ensaio de tração tem como finalidade, obter uma curva *força versus deslocamento*. Para isso, a mola a ser ensaiada é presa ao aparelho por grampos especiais e submetida a uma pré-carga, como mostrado na Figura 34. Durante o ensaio, a mola é exposta a um carregamento cíclico o qual irá gerar um gráfico para efeitos de análise. Para este trabalho, a mola de SMA foi submetida a uma pré-carga de 0,10 N e o ensaio foi programado para aplicar uma força de até 4,5 N em dois ciclos, com uma taxa de 2 mm/min. Enquanto que a mola de aço foi submetida a uma deformação de 5 mm/min em dois diferentes períodos, uma com as espiras ainda juntas (mola contraída) e outra com as espiras separadas (mola distendida) para determinação de sua constante elástica.

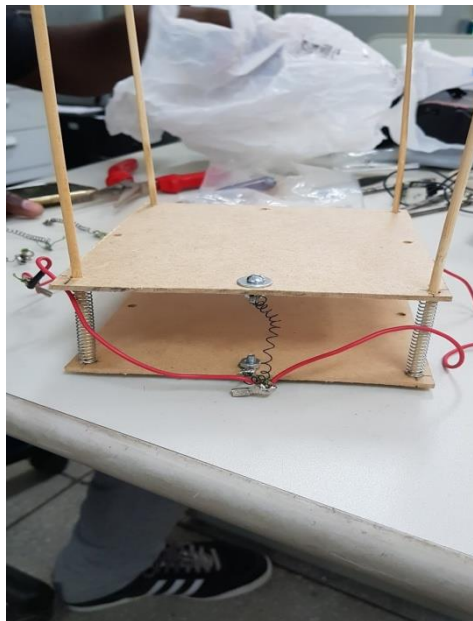


**Figura 34:** Ensaio de tração. Fonte própria.

### 5.3 - Montagem da estrutura experimental

Com as propriedades das molas obtidas e sabendo seus limites de aplicação, partiu-se para a montagem da estrutura experimental, a qual tinha como finalidade, possibilitar a realização dos testes de carregamento constante.

Para a reprodução do teste, primeiramente foi feito um protótipo da mesa conforme a Figura 35.



**Figura 35:** Primeiro protótipo da mesa inteligente. Fonte própria.

Feita com madeira, a mesa era composta por uma base e um tampo quadrados de 15 cm de lado. Foram utilizadas quatro molas SMA de trabalhos anteriores (diâmetro do fio igual a 0,51 mm), ligadas em um circuito em paralelo, e quatro molas de compressão que eram guiadas por palitos de madeira, utilizados como curso.

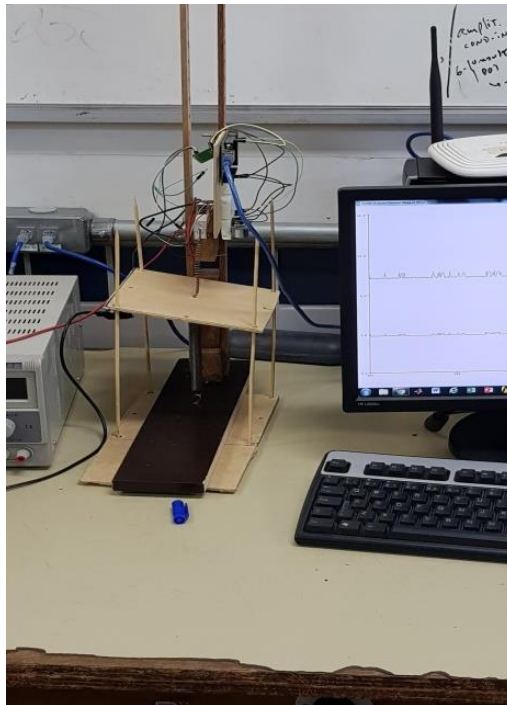
As molas SMA tinham a função de abaixar a mesa quando recebiam calor e as molas de compressão tinham a função de fazer a força contrária necessária para que as molas SMA voltassem a sua posição inicial, quando o calor fosse cessado. Porém, as molas SMA encontravam-se plastificadas e não se comportaram como esperado.

Foram, então, fabricadas molas SMA de mesmo diâmetro que as anteriores mas, ao observar o primeiro teste realizado, percebeu-se que as molas de compressão atuavam com mais força do que o necessário para movimentar a mesa.

Primeiramente, a solução foi diminuir o número de molas de compressão para duas, o que também não produziu deslocamento algum da mesa.

Neste momento, surgiram algumas limitações quanto ao protótipo e à realização do teste pois a outra solução pensada foi de aumentar o diâmetro e a rigidez das molas SMA. Como não havia fio com diâmetro maior disponível para fabricar uma mola no laboratório, foram aproveitadas duas molas SMA com diâmetros iguais a 0,75 mm (Mola 1) e 1,00 mm (Mola 2) de trabalhos anteriores que não eram suficientes para manter a estabilidade da mesa trabalhando sozinhas, um número maior de molas seria necessário. Como possuíam diâmetros diferentes, as molas acabaram sendo testadas separadamente o que serviu para comparar qual seria a mais adequada ao projeto.

Assim, uma estrutura de testes, mostrada na Figura 36 abaixo, foi construída e possibilitou a realização do teste com apenas uma mola SMA e uma mola de tração no lugar das de compressão. Dessa forma, o resultado obtido pelo teste será usado para apenas uma das molas a serem utilizadas na mesa de fato. A princípio, imaginou-se um projeto com quatro molas então, o resultado obtido deverá ser multiplicado por quatro.

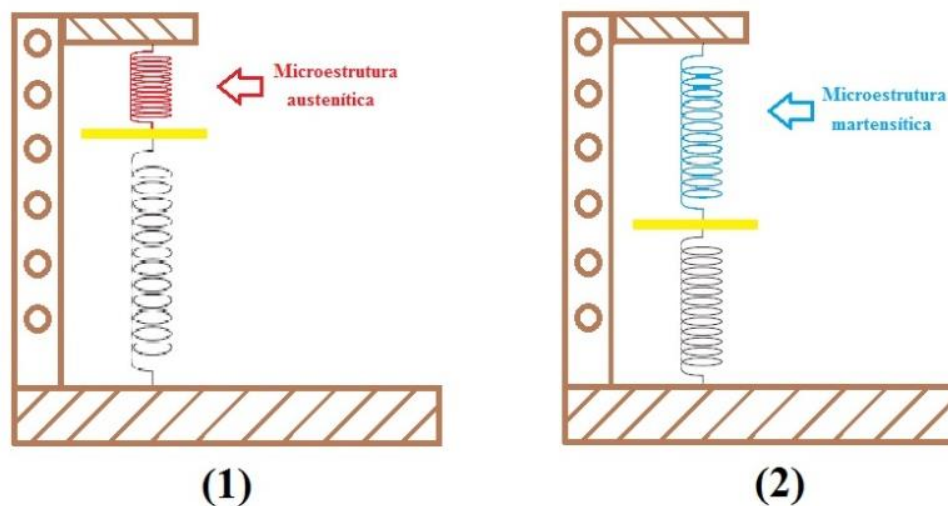


**Figura 36:** Primeira estrutura de testes utilizada. Fonte própria.

A estrutura possuía um bloco de madeira de altura regulável no qual foi fixada uma célula de carga. A mola SMA foi acoplada à célula e unida em série à mola de tração. Quando

a mola SMA recebia calor e contraía, a mesa subia (Figura 37 (1)) e quando deixava de receber calor, a mola de tração fazia força para que a SMA voltasse para a sua posição inicial causando a descida da mesa (Figura 37 (2)), diferentemente do protótipo anterior. O problema desta vez era o atrito causado pelos palitos de madeira, que serviam de curso, que não permitiam o deslocamento paralelo do tampo em relação à base. Sem os cursos, a mola SMA, por não ter deslocamento linear, fazia o tampo balançar demais e com isso, não seria possível ter uma precisão do seu deslocamento.

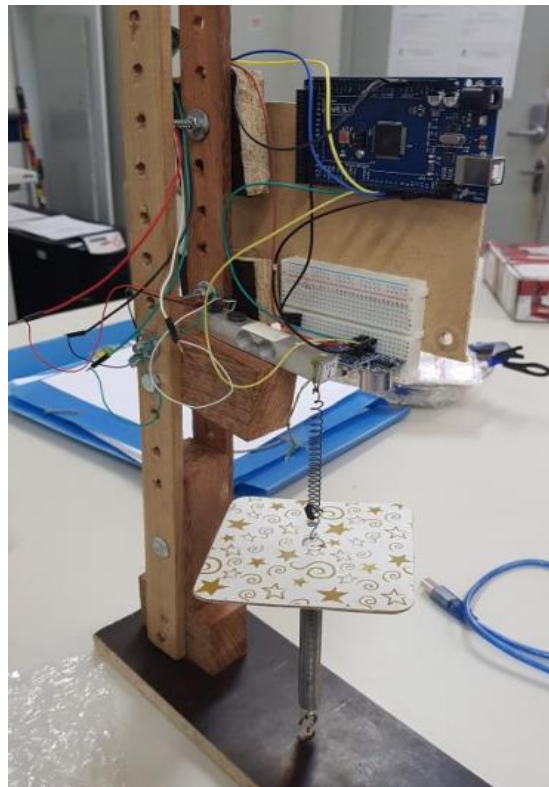
Notou-se que para dimensões menores, obtinha-se uma precisão melhor no deslocamento da mesa. Então, foi fabricado um tampo, de papelão e plástico, quadrado, com 100 mm de lado, que foi acoplado à mola de tração, mostrado na Figura 38. O resultado final do conjunto na estrutura de testes é mostrado na Figura 39.



**Figura 37:** Microestrutura de acordo com a temperatura. (1) mola aquecida, (2) mola resfriada. Fonte própria.



**Figura 38:** Tampo de papelão e plástico. Fonte própria.



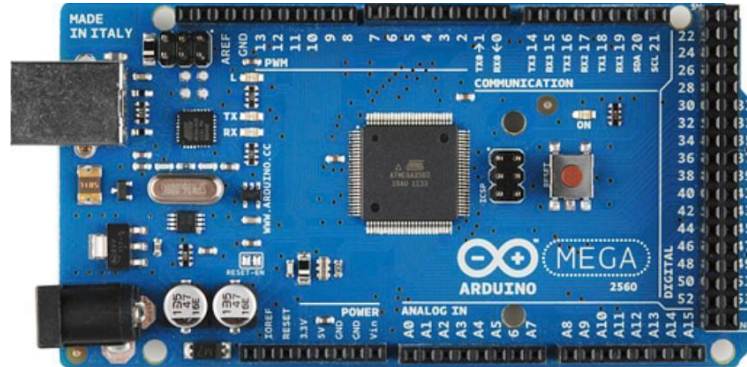
**Figura 39:** Estrutura de testes final. Fonte própria.

#### **5.4 - Testes com carregamento constante**

Com a estrutura finalmente funcionando de forma esperada, foi possível começar a aferição de dados com o objetivo de mostrar como as molas se comportariam em termos práticos de aplicação de diferentes correntes elétricas, além de comparar e poder chegar a uma conclusão de qual seria a mola mais adequada para a utilização no produto final.



Os dados foram obtidos através de um conjunto de sensores que foram utilizados junto a um microcontrolador Arduino Mega 2560 (Figura 40). Estes sensores foram programados por um código escrito no *software* Arduino.



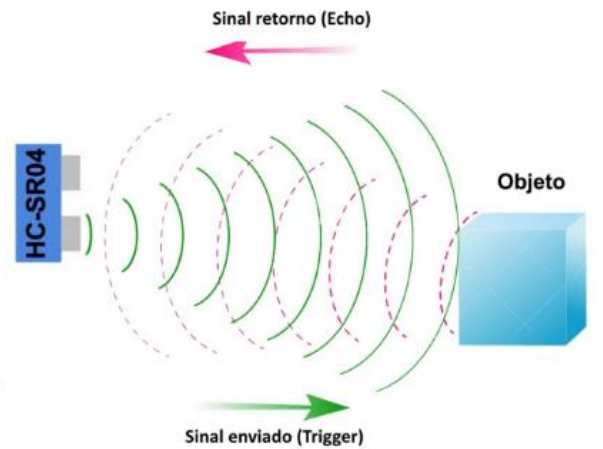
**Figura 40:** Microcontrolador Arduino Mega 2560.

Como a intenção do teste era mostrar um gráfico comparativo entre a força que a mola SMA exercia e o seu deslocamento de acordo com cada corrente aplicada no tempo, foram usados dois sensores: um para medir a deslocamento e outro para medir a força.

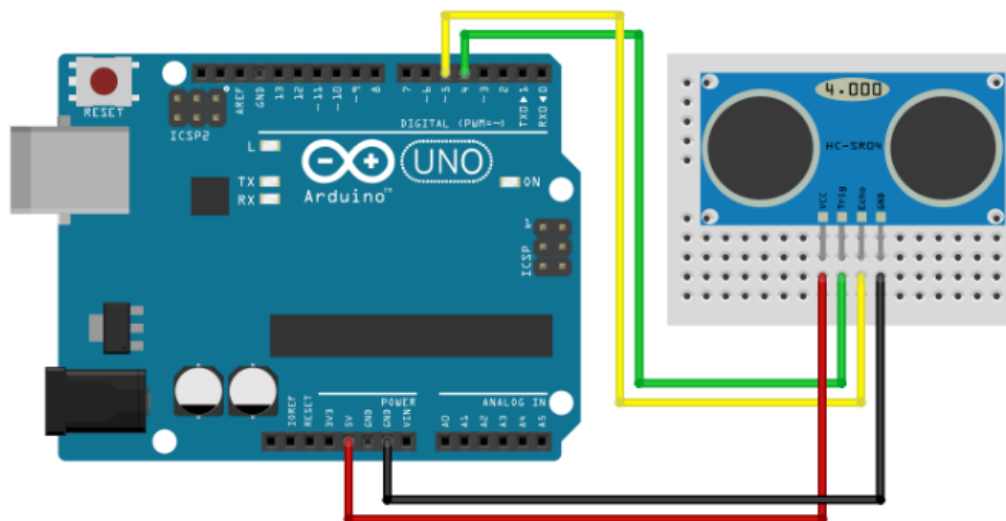
O HC-SR04 (Figura 41) é um sensor ultrassônico muito comum em projetos com Arduino que permite leituras de distância entre 20 mm e 4 m, com precisão de 3 mm. Seu funcionamento está esquematizado na Figura 42 e se baseia no envio de sinais ultrassônicos pelo sensor, que aguarda o retorno (echo) do sinal, e com base do tempo de envio e retorno, calcula a distância entre o sensor e o objeto detectado, no caso o tampo da mesa. Desta forma, o HC-SR04 foi capaz de aferir o deslocamento da mola SMA, calculando a distância variável entre as suas duas extremidades. A ligação entre o HC-SR04 e o Arduino está descrita na Figura 43.



**Figura 41:** Sensor ultrassônico HC-SR04.



**Figura 42:** Princípio de funcionamento do HC-SR04.



**Figura 43:** Representação da ligação entre o sensor e o Arduino.

A célula de carga é um componente eletrônico desenvolvido para atuar como uma balança. Uma célula de carga com capacidade de medir até 1kg (Figura 44) foi utilizada no experimento.

Seu funcionamento é simples. A célula é composta por uma ponte resistiva que varia em função do peso da carga aplicada. No seu centro há uma superfície sensível que faz a detecção da carga porém não é necessário que a carga seja aplicada sobre esta superfície central para que as leituras sejam realizadas.

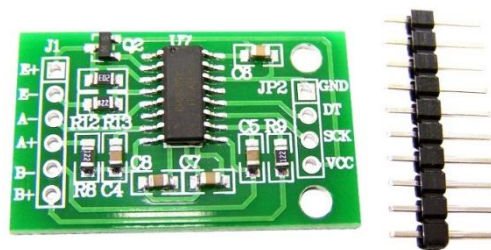
O que se faz necessário é o uso de um amplificador de sinal para que o microcontrolador Arduino possa fazer a leitura já que a tensão enviada pela célula é muito

baixa. O amplificador utilizado foi o HX711 (Figura 45) que permitiu a aferição da força produzida pela mola SMA.

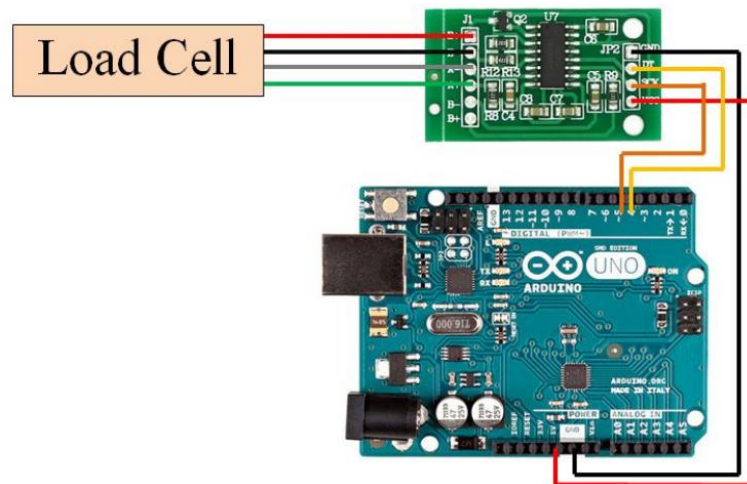
A ligação entre o sensor, a célula de carga e o Arduino está esquematizada na Figura 46. Além disso, uma calibração da célula de carga também é necessária antes do início dos testes. Nesta calibração, o objetivo é obter um fator de calibração que é inserido no código do programa para alcançar a melhor precisão possível. Este fator é conhecido através da aferição de uma massa conhecida.



**Figura 44:** Célula de carga 1kg.



**Figura 45:** Amplificador de sinal HX711.



**Figura 46:** Representação da ligação entre a célula de carga, o amplificador e o Arduino.

Vale ressaltar que algumas modificações foram feitas em relação ao esquema apresentado na ligação a fim de tornar possível a utilização simultânea dos dois sensores.

## 5.5 - Procedimento experimental

Como já dito anteriormente, o objetivo do teste com carregamento constante é comparar a força que a mola SMA exerce e o seu deslocamento de acordo com diferentes ciclos de carregamento térmico. Para controlar a intensidade da corrente elétrica entre as espiras da mola em cada ciclo, foi utilizada uma fonte DC POWER SUPPLY HY3003E-3 ilustrada na Figura 47.



**Figura 47:** Fonte elétrica DC POWER SUPPLY HY3003E-3. Fonte própria.

Foram feitos quatro testes em três ciclos de tempo diferentes, variando a corrente máxima ( $I_{max}$ ) constante em cada um dos ciclos. As correntes máximas aplicadas foram iguais a 1,0 A, 1,5 A, 2,0 A e 2,5 A. Os testes seguiram um procedimento experimental descrito abaixo, variando apenas o ciclo de tempo e a corrente aplicada. Vale ressaltar que os tempos foram escolhidos com base nos tempos de funcionamento de uma mesa pantográfica industrial.

### **5.5.1 - Testes com ciclos de 1min**

1. Carregamento até  $I_{max}$  na mola SMA em aproximadamente 5 segundos;
2. Permanência da corrente  $I_{max}$  por 1 minuto;
3. Descarregamento até cessar a corrente na mola SMA em aproximadamente 5 segundos;
4. Tempo de repouso para resfriamento da mola SMA de 1 minuto;
5. Realizar os passos de 1 a 4 por 6 ciclos.

### **5.5.2 - Testes com ciclos de 2min**

1. Carregamento até  $I_{max}$  na mola SMA em aproximadamente 5 segundos;
2. Permanência da corrente  $I_{max}$  por 2 minutos;
3. Descarregamento até cessar a corrente na mola SMA em aproximadamente 5 segundos;
4. Tempo de repouso para resfriamento da mola SMA de 2 minutos;
5. Realizar os passos de 1 a 4 por 6 ciclos.

### 5.5.3 - Testes com ciclos de 3min

1. Carregamento até  $I_{max}$  na mola SMA em aproximadamente 5 segundos;
2. Permanência da corrente  $I_{max}$  por 3 minutos;
3. Descarregamento até cessar a corrente na mola SMA em aproximadamente 5 segundos;
4. Tempo de repouso para resfriamento da mola SMA de 3 minutos;
5. Realizar os passos de 1 a 4 por 6 ciclos.

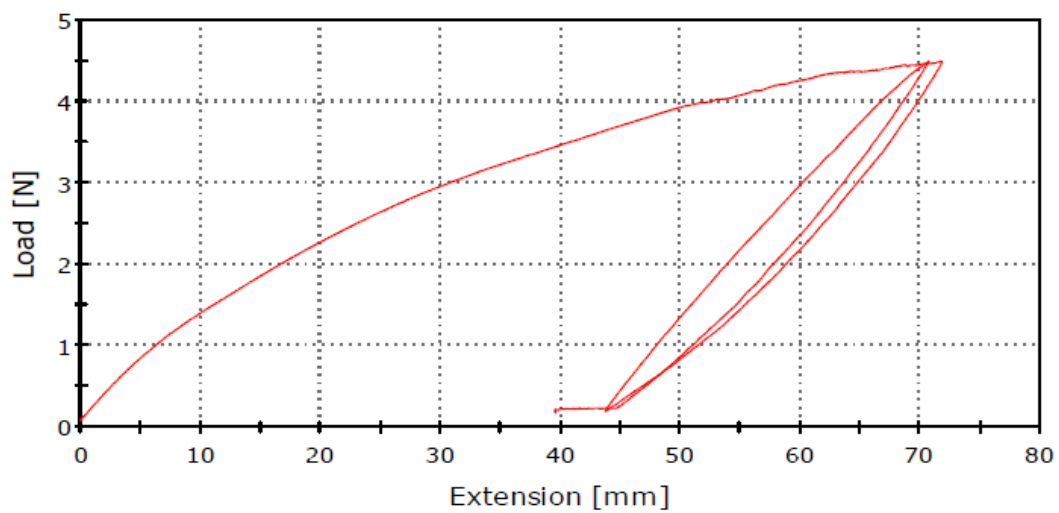
## Capítulo 6

### Resultados obtidos

#### 6.1 Ensaio de tração

##### 6.1.1 Mola SMA 1

Segundo o fabricante *DYNNALLOY, Inc.*, esta mola pode ser estendida em até 140 mm, usando uma força de aproximadamente 6 N. E podem ser comprimidas em até 30 mm aproximadamente com uma força de 8.4 N e uma corrente de 3 A. A sua ativação ocorre entre 70°C e 80°C e a mesma possui 6 mm de diâmetro externo. A fim de verificar as informações passadas quanto às deformações e comparar essas informações com a magnitude das deformações a serem obtidas nos testes com carregamento constante, realizou-se um ensaio de tração que resultou em uma curva de força por deslocamento, exposta na Figura 48 abaixo.



**Figura 48:** Gráfico força por deslocamento do ensaio de tração. Fonte própria.

##### 6.1.2 Mola SMA 2

A mola SMA 2 foi aproveitada de um experimento realizado no MECANON na UFRJ e a realização do ensaio de tração não foi permitida tendo em vista que a mola não poderia ser danificada.

### 6.1.3 Mola de tração de aço

Através do ensaio de tração da mola de aço pôde-se obter a sua constante elástica, o que é importante para conhecer a força que a mola de SMA terá de fazer para antagonizar o movimento da mola de tração. Pelo gráfico da Figura 49, a constante elástica da mola de tração foi igual a 0,0297 N/mm, calculada pela média das retas tangentes às curvas obtidas no ensaio.

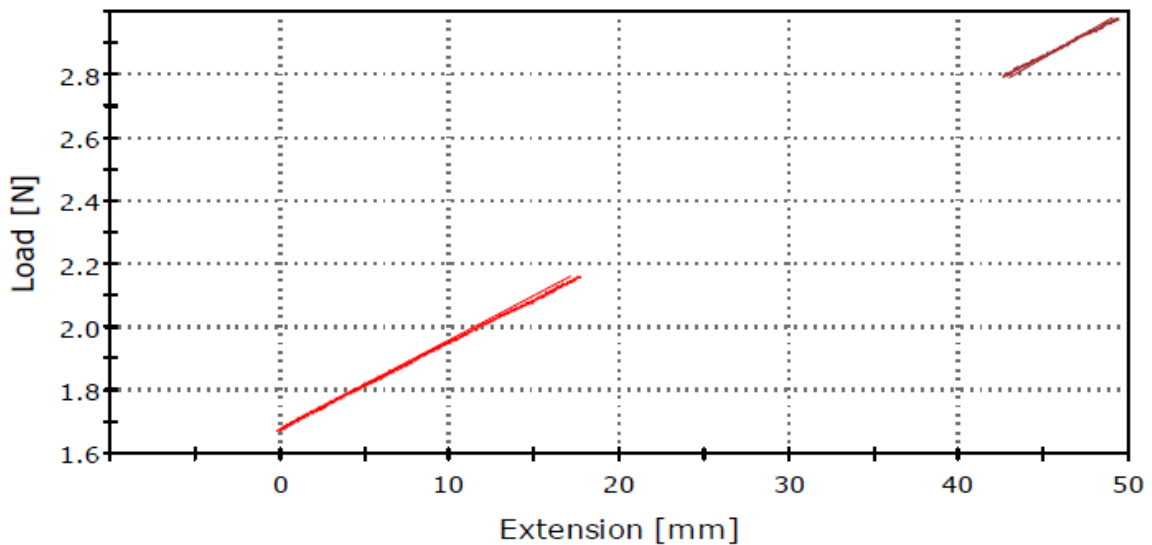


Figura 49: Ensaio de tração da mola de aço. Fonte própria.

## 6.2 Testes com carregamento constante

Para a análise dos resultados, foram considerados apenas os ciclos intermediários dos testes já que neles, há uma maior estabilidade do comportamento da mola. Além disso, pode-se dizer que não houve perda de corrente durante os testes pois, apenas uma mola foi utilizada, não sendo necessária a ligação de um circuito em paralelo para distribuição da mesma.

Vale ressaltar que a curva de força representa a força realizada pela mola medida através da célula de carga. E a curva de deslocamento representa a distância entre o sensor, que foi posicionado na extremidade superior da mola fixada na célula de carga, e o tampo da mesa, que foi posicionado na extremidade inferior da mola, ou seja, essa curva representa o comprimento da mola SMA. Assim, quanto maior a força aplicada, menor será o deslocamento (ou o comprimento da mola) apresentado já que a mola se contrai mais.

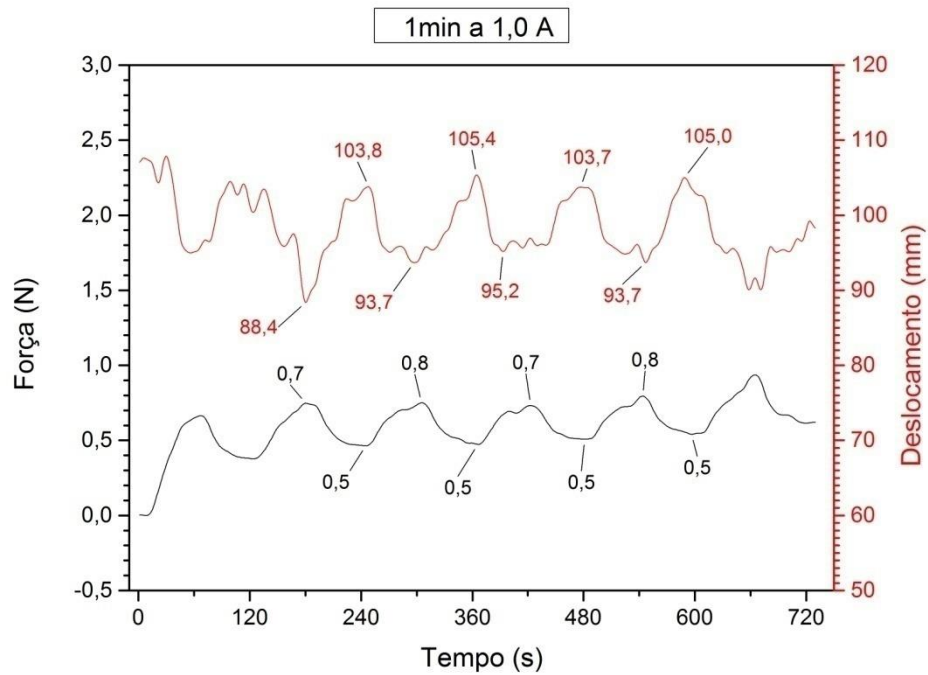


Os resultados podem ser analisados de duas formas distintas: observando-se a variação do deslocamento (comprimento da mola) ou observando-se os valores absolutos de máximos e mínimos por ciclo. Da primeira forma, pode-se determinar em qual ciclo de tempo há o maior deslocamento e da segunda, a corrente que fornece a maior (que é interessante para o trabalho) e a menor contração à mola. Uma análise em conjunto vai determinar a melhor forma de funcionamento da mola dentre os testes efetuados.

## **6.2.1 Teste 1min a 1,0 A**

### **6.2.1.1 Mola 1**

O gráfico representado na Figura 50 abaixo representa os resultados obtidos pelo teste realizado a 1,0 A com ciclos de 1 minuto para a Mola 1. Verifica-se que este tempo não é suficiente para aquecer e resfriar a mola, podendo gerar uma mistura das fases austenita, martensita maclada e martensita não maclada, tanto no final do resfriamento, quanto no final do aquecimento. O calor gerado pela corrente de 1,0 A durante 1 minuto não foi suficiente para atingir a temperatura  $A_f$ , assim como o tempo de resfriamento não foi suficiente para atingir a temperatura  $M_f$ . Esta pequena variação de temperatura gera uma força pequena que não é capaz de deslocar a mola por mais de 20 mm, conforme verificado na Figura 50 e na Tabela 3.



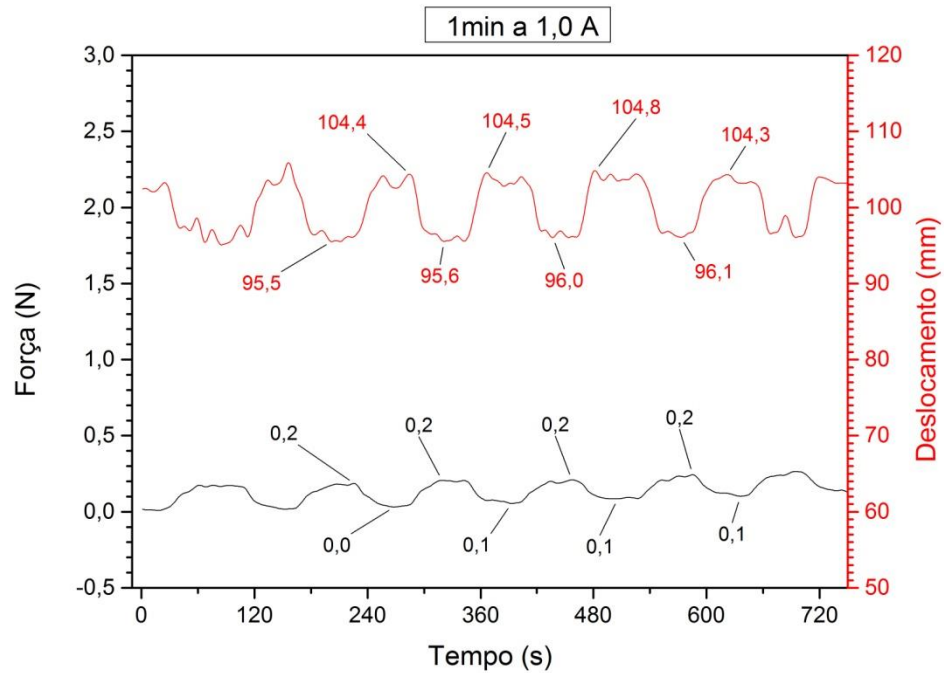
**Figura 50:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.

**Tabela 3:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 1min a 1,0 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	92,75
Contração da mola resfriada (mm)	104,47
Variação de deslocamento (mm)	11,72
Força da mola aquecida (N)	0,75
Força da mola resfriada (N)	0,50
Variação de força (N)	0,25

### 6.2.1.2 Mola 2

No mesmo teste realizado para a Mola 2, ilustrado na Figura 51, é possível fazer a mesma análise do teste anterior já que as forças são muito pequenas para causar uma grande variação de temperatura e, por conseguinte, uma grande variação de deslocamento. É possível perceber ainda que o deslocamento foi menor quando comparado com a outra mola (11,72 mm anteriormente contra 8,70 mm neste teste, conforme comparação entre as Tabelas 3 e 4). Isto acontece pelo fato desta mola ter o diâmetro de fio e massa maiores (Mola 1: 1,370 g e Mola 2: 1,442 g), e assim, precisar de uma quantidade maior de calor para transformar de fase.



**Figura 51:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 4:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 1min a 1,0 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	95,80
Contração da mola resfriada (mm)	104,50
Variação de deslocamento (mm)	8,70
Força da mola aquecida (N)	0,20
Força da mola resfriada (N)	0,10
Variação de força (N)	0,10

## 6.2.2 Teste 1min a 1,5 A

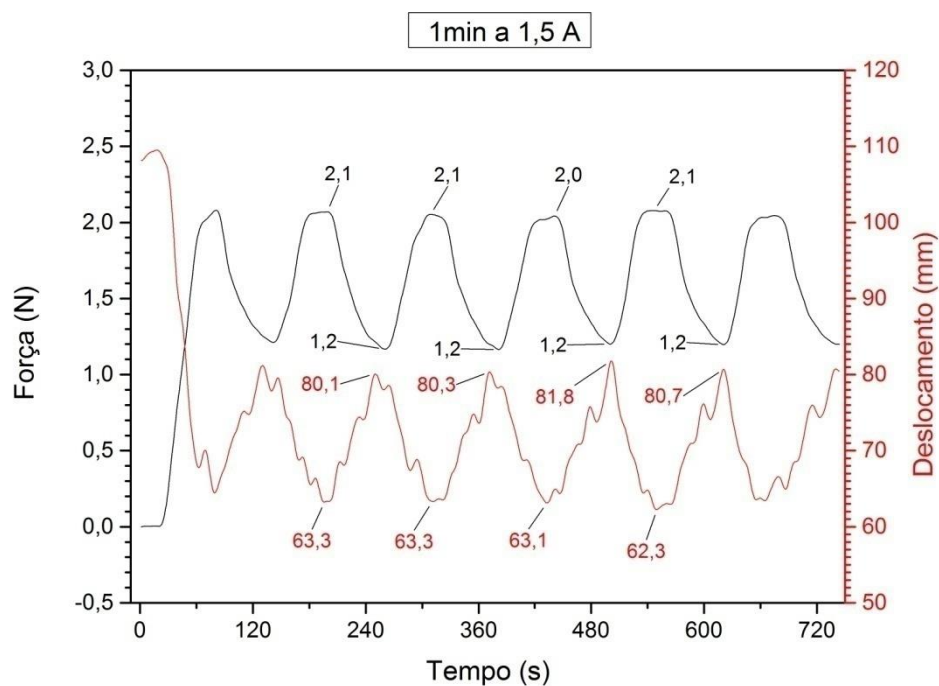
### 6.2.2.1 Mola 1

Neste teste, percebe-se que com uma corrente de 1,5 A, há uma maior quantidade de calor gerada, originando uma maior temperatura que é capaz de produzir uma quantidade maior de austenita no final do aquecimento. Com este aumento de austenita, a mola irá se

contrair mais, o que pode ser constatado com o valor aferido pelo sensor (63,00 mm) que foi menor do que o obtido no teste anterior para a mesma mola.

Com o valor aferido pelo sensor no resfriamento (80,72 mm), verifica-se que o tempo foi insuficiente para que a mola fosse totalmente transformada em uma mistura de martensita maclada e martensita não maclada. Em contrapartida, é possível notar também que a variação  $\Delta l = 17,72$  mm neste teste é maior que a variação com corrente de 1,0 A para a mesma mola.

Além disso, pode-se dizer que a corrente de 1,5 A produz uma força maior nas molas, conforme mostrado na Figura 52 e na Tabela 5.



**Figura 52:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.

**Tabela 5:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.

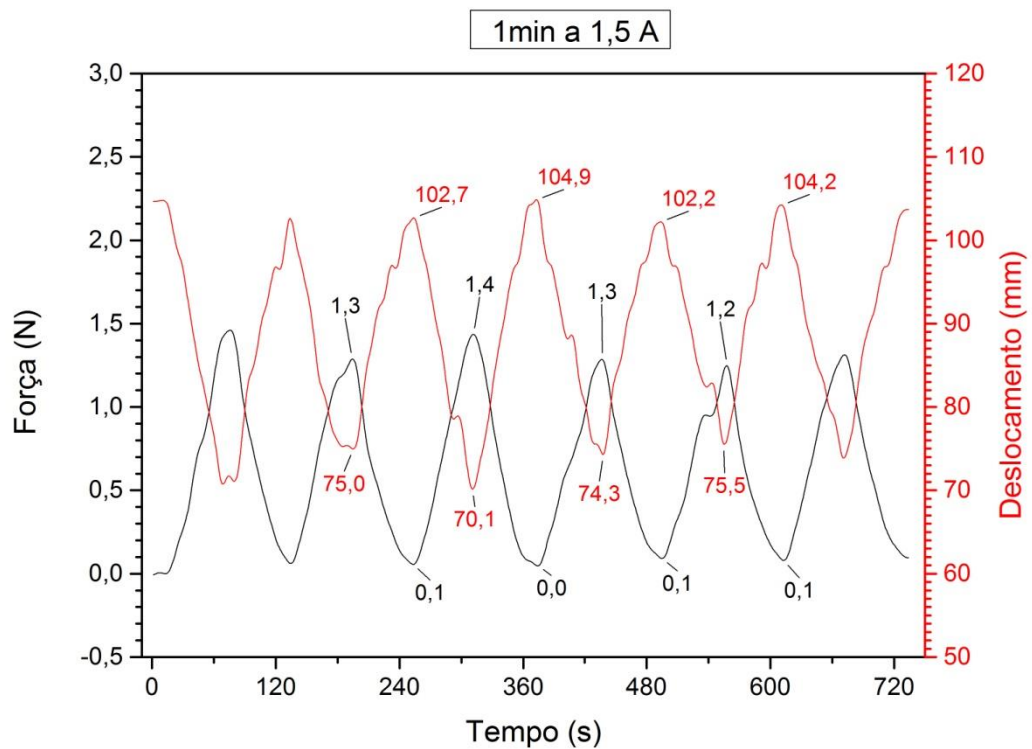
Ciclo de 1min a 1,5 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	63,00
Contração da mola resfriada (mm)	80,72
Variação de deslocamento (mm)	17,72
Força da mola aquecida (N)	2,07
Força da mola resfriada (N)	1,20
Variação de força (N)	0,87

### 6.2.2.2 Mola 2

A Mola 2, com diâmetro de fio maior, tem também uma massa maior do que a Mola 1, e por isso, há a necessidade de uma quantidade de calor maior para se chegar a uma mesma temperatura, o que justifica as menores magnitudes de força e contração por ciclo obtidas neste teste.

Por este motivo ainda, a corrente demora mais para induzir força e precisa de um tempo maior de aquecimento. A falta de tempo de aquecimento no ciclo de 1 minuto explica a forma mais alongada que o gráfico da Figura 53 assume, onde a mola ainda está esquentando ou esfriando ao fim de cada ciclo.

Apesar das forças e contrações da Mola 2 serem menores, a variação de deslocamento, que é o principal fator para o projeto, aumentou de 17,72 mm para 29,78 mm, como mostra a Tabela 6. Então, a Mola 2 mostrou-se mais aplicável para este teste



**Figura 53:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 6:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 1min a 1,5 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	73,72
Contração da mola resfriada (mm)	103,50
Variação de deslocamento (mm)	29,78
Força da mola aquecida (N)	1,30
Força da mola resfriada (N)	0,07
Variação de força (N)	1,23

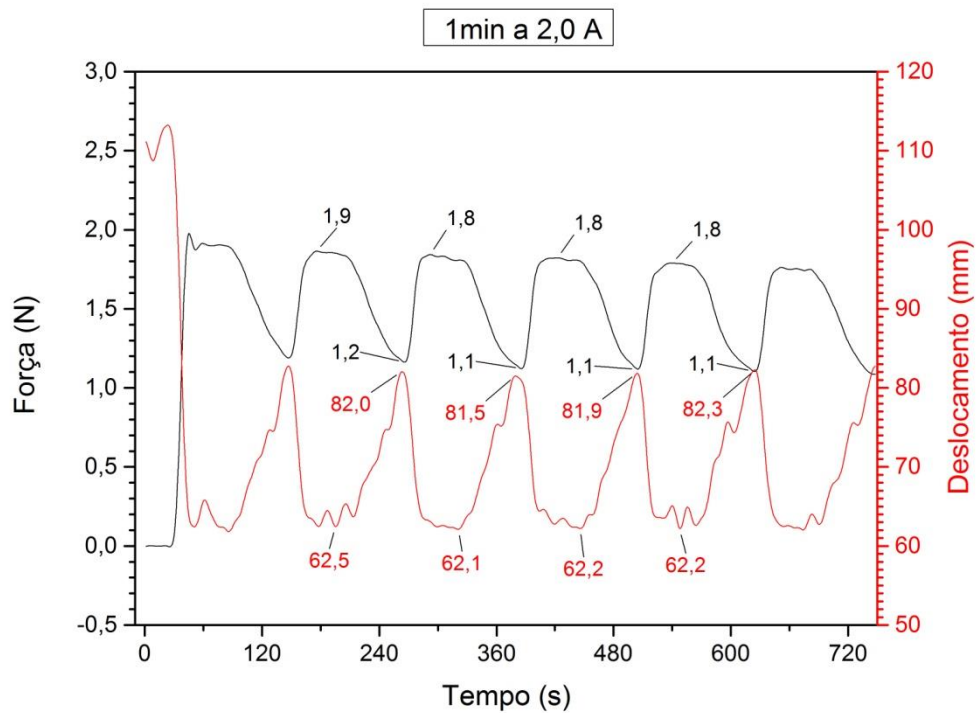
### 6.2.3 Teste 1min a 2,0 A

#### 6.2.3.1 Mola 1

Assim como no teste com ciclos de 1 minuto a 1,5 A, neste teste é possível verificar que com uma corrente maior (2,0 A), há uma maior quantidade de calor gerada, originando uma maior temperatura que é capaz de produzir uma quantidade maior de austenita no final do aquecimento. Com este aumento de austenita a mola irá se contrair mais, como mostrado novamente pelo valor aferido pelo sensor (62,25 mm) que foi menor do que no teste anterior para a Mola 1.

Conforme o valor aferido pelo sensor no resfriamento (81,92 mm), verifica-se mais uma vez que o tempo foi insuficiente para que a mola fosse totalmente transformada em uma mistura de martensita maclada e martensita não maclada. Mas pode-se notar também que a variação  $\Delta l = 19,67$  mm foi maior que a variação obtida com corrente de 1,5 A para a mesma mola.

Além disso, é possível dizer que a corrente de 2,0 A produz uma força menor na mola quando comparada à corrente de 1,5 A porém maior quando comparada à corrente de 1,0 A, como ilustrado pela Figura 54 e pela Tabela 7.



**Figura 54:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.

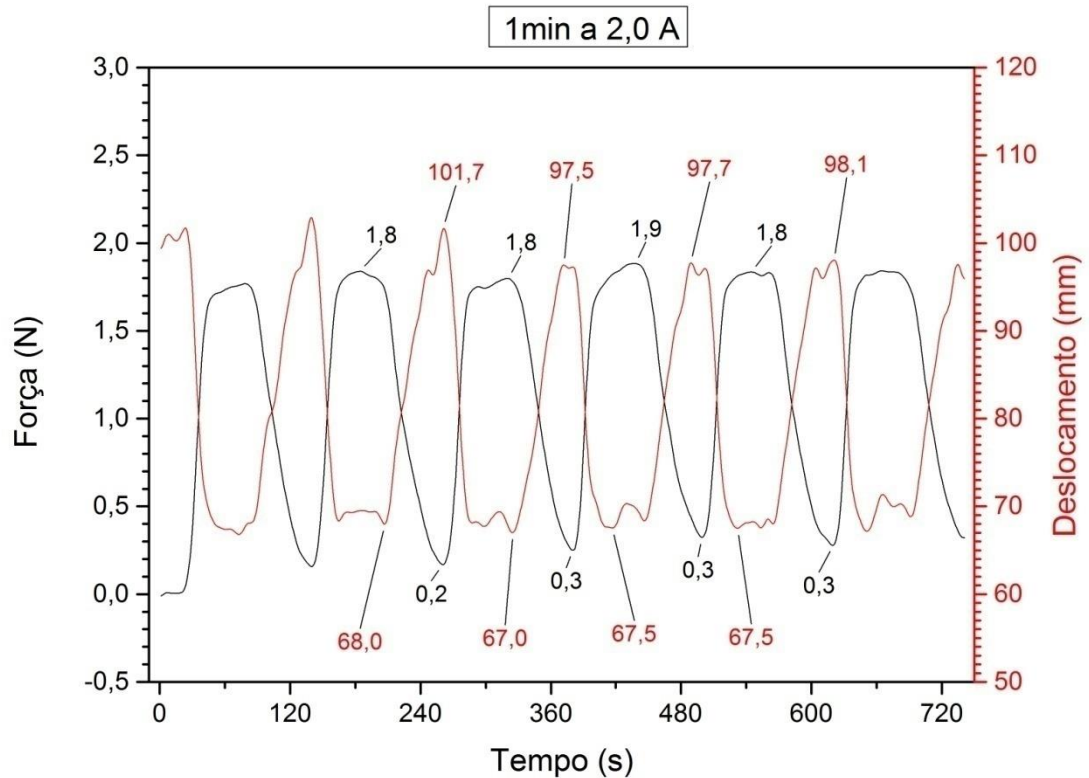
**Tabela 7:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 1min a 2,0 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	62,25
Contração da mola resfriada (mm)	81,92
Variação de deslocamento (mm)	19,67
Força da mola aquecida (N)	1,82
Força da mola resfriada (N)	1,12
Variação de força (N)	0,70

### 6.2.3.2 Mola 2

Tendo em vista que a aplicação de uma amperagem maior em um mesmo ciclo de tempo produz mais calor e com isso uma maior quantidade de austenita no final do aquecimento, pode-se fazer a mesma comparação entre este teste (Figura 55) e o teste anterior com corrente de 1,5 A para esta mola (Figura 53), onde é possível perceber que o deslocamento médio aumenta cerca de 1,50 mm neste teste e a mola se contrai mais tanto no aquecimento (67,50 mm) quanto no resfriamento (98,75 mm), conforme visto na Tabela 8.

Agora, comparando este teste com o mesmo teste realizado com a Mola 1 e levando em consideração o diâmetro de fio maior da Mola 2, pode-se notar que a teoria se confirma. As contrações médias são menores tanto no aquecimento, quanto no resfriamento mas a variação do deslocamento é maior (31,25 mm), o que mostra novamente que a Mola 2 é melhor para o projeto do que a Mola 1 nesta amperagem e ciclo de tempo.



**Figura 55:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 8:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 1min a 2,0 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	67,50
Contração da mola resfriada (mm)	98,75
Variação de deslocamento (mm)	31,25
Força da mola aquecida (N)	1,82
Força da mola resfriada (N)	0,27
Variação de força (N)	1,55

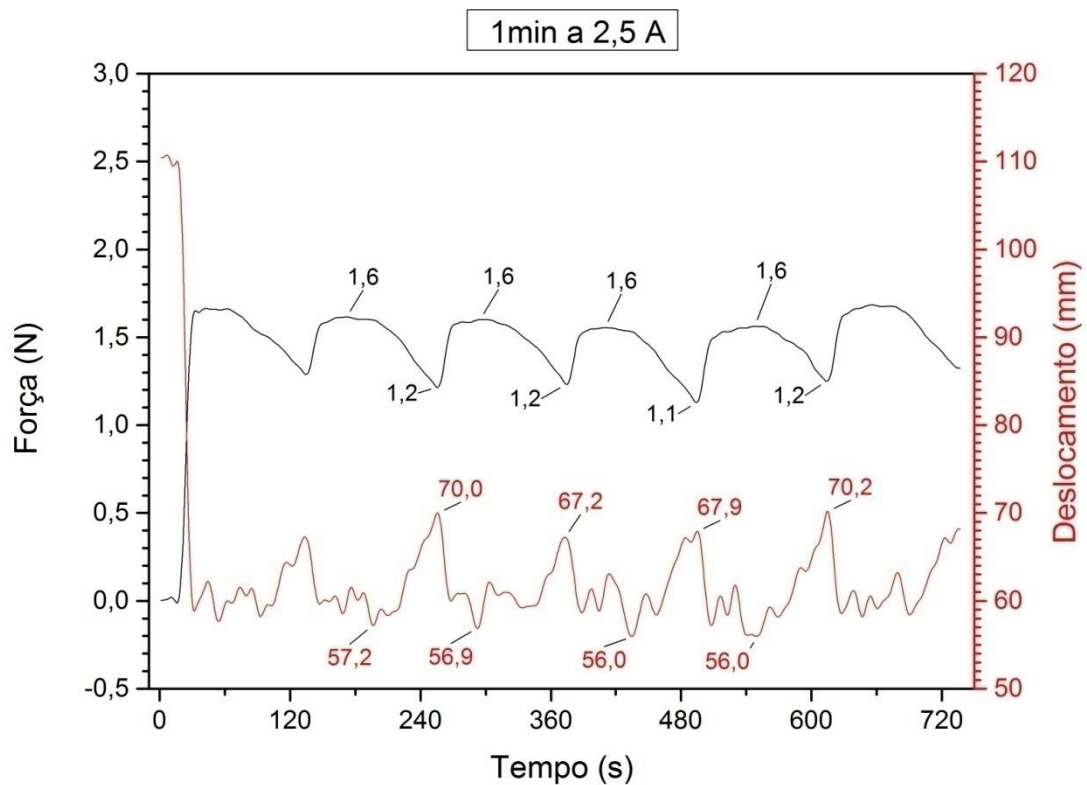


## 6.2.4 Teste 1min a 2,5 A

### 6.2.4.1 Mola 1

O teste com ciclo de tempo de 1 minuto a 2,5 A para a Mola 1 segue o comportamento esperado de que com uma corrente maior, há uma quantidade maior de calor gerada que, por sua vez, origina uma maior temperatura e produz uma quantidade maior de austenita ao final do aquecimento. Com este aumento, a mola se contrai, em média, 5,73 mm a mais do que no teste realizado com ciclos de tempo de 1 minuto a 2,0 A com a mesma mola, atingindo 56,52 mm conforme aferido, o que representa cerca de 10% a mais.

Porém, o deslocamento médio diminuiu 7,37 mm pois o tempo de 1 minuto não é suficiente para que haja o resfriamento completo da mola. Além disso, houve muitas variações por ciclo no comportamento da mola e é possível perceber que a corrente de 2,5 A produz uma força menor na mola do que a corrente de 2,0 A, como ilustrado pela Figura 56 e pela Tabela 9.



**Figura 56:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.

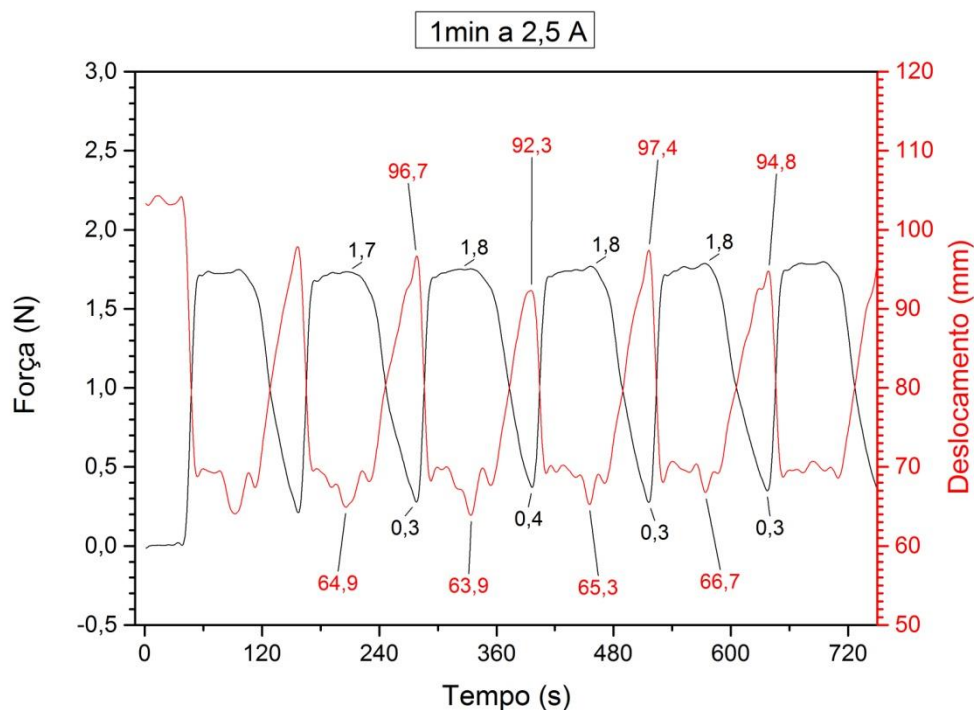
**Tabela 9:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 1min a 2,5 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	56,52
Contração da mola resfriada (mm)	68,82
Variação de deslocamento (mm)	12,30
Força da mola aquecida (N)	1,60
Força da mola resfriada (N)	1,17
Variação de força (N)	0,43

### 6.2.4.2 Mola 2

Neste teste, ilustrado na Figura 57, pode-se analisar os resultados da mesma forma do anterior. A Mola 2 mostrou um deslocamento médio 1,15 mm menor do que o deslocamento obtido com corrente de 2,0 A devido à falta de tempo para resfriar a mola, que alcançou uma temperatura maior no aquecimento, onde a mola se contrai cerca de 2,30 mm a mais do que no teste anterior (Tabelas 8 e 10).

Comparando com o mesmo teste realizado na Mola 1, percebe-se que o deslocamento é muito maior para esta mola (30,10 mm contra 12,30 mm) e a variação da força também, mostrando que quase não há força residual após o resfriamento de cada ciclo.

**Figura 57:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 1min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 10:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 1min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 1min a 2,5 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	65,20
Contração da mola resfriada (mm)	95,30
Variação de deslocamento (mm)	30,10
Força da mola aquecida (N)	1,77
Força da mola resfriada (N)	0,32
Variação de força (N)	1,45

## 6.2.5 Teste 2min a 1,0 A

### 6.2.5.1 Mola 1

Neste próximos casos a serem analisados, o tempo de aquecimento e de resfriamento serão maiores (2 minutos) que no casos anteriores (1 minuto), logo durante o processo, teoricamente, a temperatura final do aquecimento estará mais próxima de  $A_f$  e a temperatura final de resfriamento, deverá estar mais próxima de  $M_f$ .

Comparando as amperagens das correntes nestes casos com as amperagens realizadas nas análises anteriores, nos casos em que se utilizou 1 minuto para o aquecimento e para o resfriamento, pode-se concluir que os comportamentos, no geral, seguem o mesmo padrão, mas os valores registrados pelos sensores são diferentes.

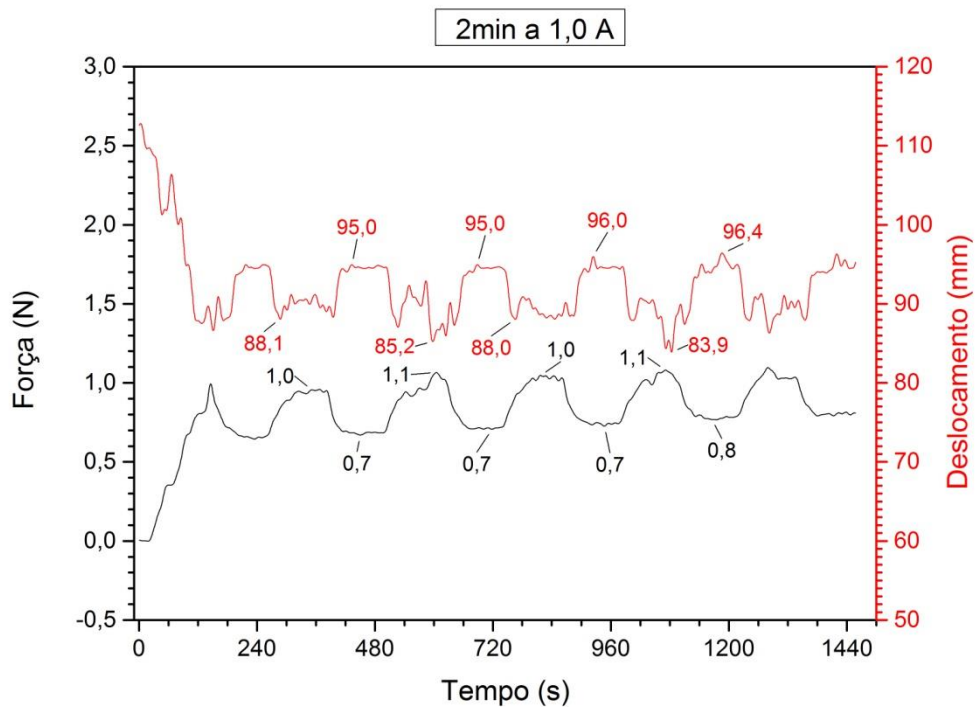
Agora, o que vai gerar uma contração maior da mola não será simplesmente a mudança de amperagem mas também, a mudança nos tempos de aquecimento e resfriamento, que serão maiores, como já citado.

Assim, espera-se que a mola se contraia mais no aquecimento, apresentando uma quantidade maior de austenita. E, no resfriamento, a mola se distenda mais, apresentando uma quantidade maior de martensita maclada e não maclada.

Analisando a Figura 58 em conjunto com a Tabela 11, verifica-se que neste caso o sensor aferiu um valor médio menor de contração da mola aquecida (86,30 mm) do que no caso com ciclos de tempo de 1 minuto com a mesma amperagem, o que representa uma contração maior da mola, que é explicada pelo maior tempo de aquecimento, que gera uma quantidade de calor maior e, por consequência, uma temperatura maior, produzindo maior quantidade de austenita.

Ainda nesta análise, durante o resfriamento, a contração mínima (95,60 mm) se caracteriza por ser menor que no caso do resfriamento de 1 minuto (104,47 mm). Como a temperatura de aquecimento foi maior que quando feito o aquecimento a 1 minuto, devido ao maior tempo de aquecimento, conclui-se que mesmo com um tempo de resfriamento de 2 minutos, este tempo não foi suficiente para se resfriar na mesma temperatura do resfriamento do tempo anterior.

A força média apresentada quando aplicada a corrente de 1,0 A com ciclos de 2 minutos foi maior do que a força apresentada com a mesma amperagem com ciclos de tempo de 1 minuto e por isso, o comportamento da mola nos ciclos fica mais definido, apesar de ainda ser instável.



**Figura 58:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.

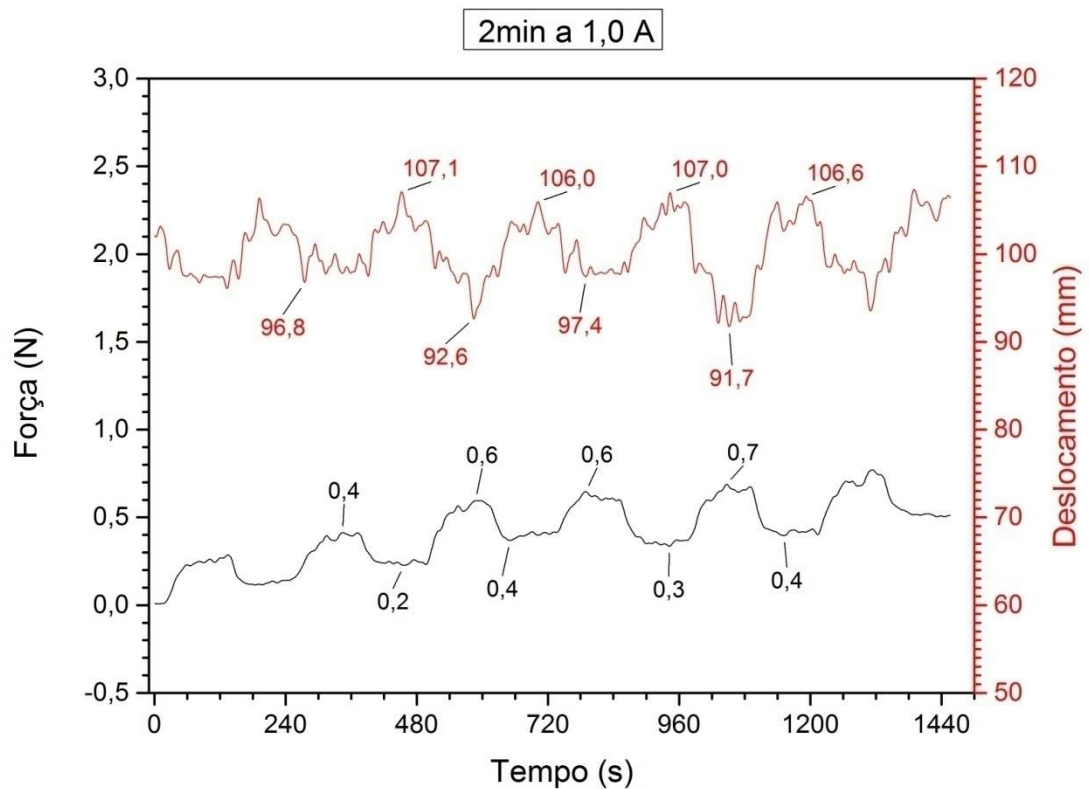
**Tabela 11:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 2min a 1,0 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	86,30
Contração da mola resfriada (mm)	95,60
Variação de deslocamento (mm)	9,30
Força da mola aquecida (N)	1,05
Força da mola resfriada (N)	0,72
Variação de força (N)	0,33

### 6.2.5.2 Mola 2

Para a Mola 2, o deslocamento apresentado por ciclo foi maior do que na Mola 1 (12,05 mm, em média) mas ainda assim, menor que os apresentados pelos ciclos anteriores de 1 minuto com maiores correntes e portanto, não aplicável.

A corrente de 1,0 A, que já havia induzido forças muito baixas na Mola 1, com diâmetro de fio menor, induziu forças menores ainda na Mola 2, como esperado. Este teste está ilustrado na Figura 59 e na Tabela 12.



**Figura 59:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 12:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 2min a 1,0 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	94,62
Contração da mola resfriada (mm)	106,67
Variação de deslocamento (mm)	12,05
Força da mola aquecida (N)	0,57
Força da mola resfriada (N)	0,32
Variação de força (N)	0,25

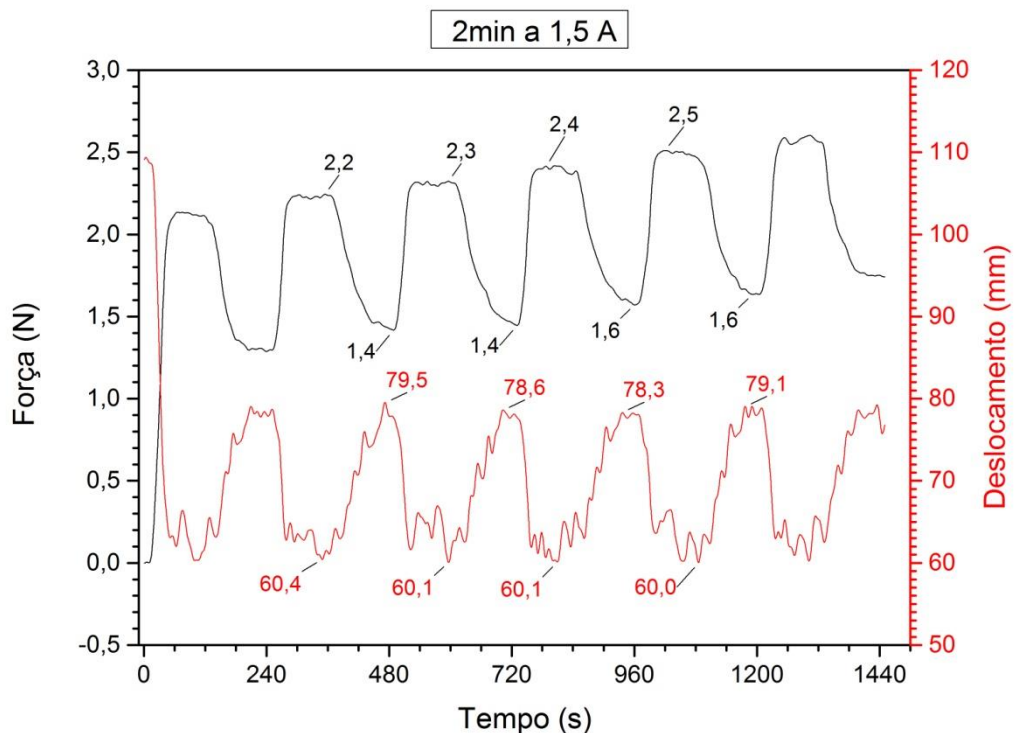
## 6.2.6 Teste 2min a 1,5 A

### 6.2.6.1 Mola 1

Quando comparado com o ciclo de tempo anterior (Figura 58), este teste (Figura 60) apresenta tempos de pico e vale de força maiores assim como a contração da mola, que aumenta cerca de 3,00 mm, como esperado já que há uma quantidade maior de calor gerada que proporciona uma quantidade maior de austenita no final do aquecimento, onde a mola estará a uma temperatura maior, mais próxima de  $A_f$ .

No resfriamento, o tempo maior ainda não é suficiente para resfriar a mola ao mesmo patamar que o ciclo de 1 minuto já que temperatura atingida durante o aquecimento é muito maior com 2 minutos. Logo, a mola se distende menos, 78,87 mm como registra o sensor. O valor de  $\Delta l = 18,72$  mm é bem maior que no caso da corrente de 1,0 A, conforme mostram a Figura 60 e a Tabela 13.

O problema é que a cada ciclo, fica uma força residual. Portanto, com o passar dos ciclos, para que haja o mesmo deslocamento, é necessária uma força maior.



**Figura 60:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.

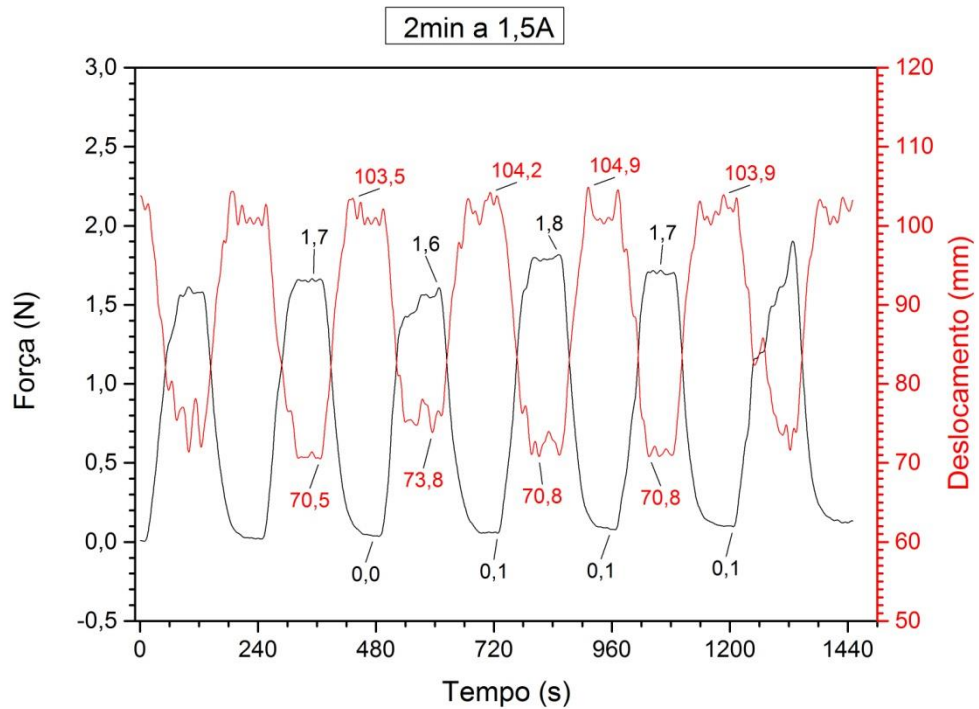
**Tabela 13:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 2min a 1,5 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	60,15
Contração da mola resfriada (mm)	78,87
Variação de deslocamento (mm)	18,72
Força da mola aquecida (N)	2,35
Força da mola resfriada (N)	1,50
Variação de força (N)	0,85

### 6.2.6.2 Mola 2

Este teste, mostrado na Figura 61, apresenta deslocamento médio maior de 2,87 mm quando comparado ao teste com ciclo de tempo de 1 minuto. Além disso, uma característica que irá se repetir ao longo dos testes com ciclos de 2 minutos, são tempos maiores de estabilidade da força tanto quando aplicada, quanto quando removida.

Comparando este com o mesmo teste aplicado na Mola 1, pode-se dizer que a Mola 2 é mais aplicável já que mostra novamente uma variação de deslocamento maior (32,65 mm), como exposto na Tabela 14. Além disso, a teoria se comprova mais uma vez pelas forças e contrações absolutas obtidas sendo menores do que as obtidas na Mola 1. Isto acontece pela massa maior da Mola 2.



**Figura 61:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 14:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 2min a 1,5 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	71,47
Contração da mola resfriada (mm)	104,12
Variação de deslocamento (mm)	32,65
Força da mola aquecida (N)	1,70
Força da mola resfriada (N)	0,07
Variação de força (N)	1,63

## 6.2.7 Teste 2min a 2,0 A

### 6.2.7.1 Mola 1

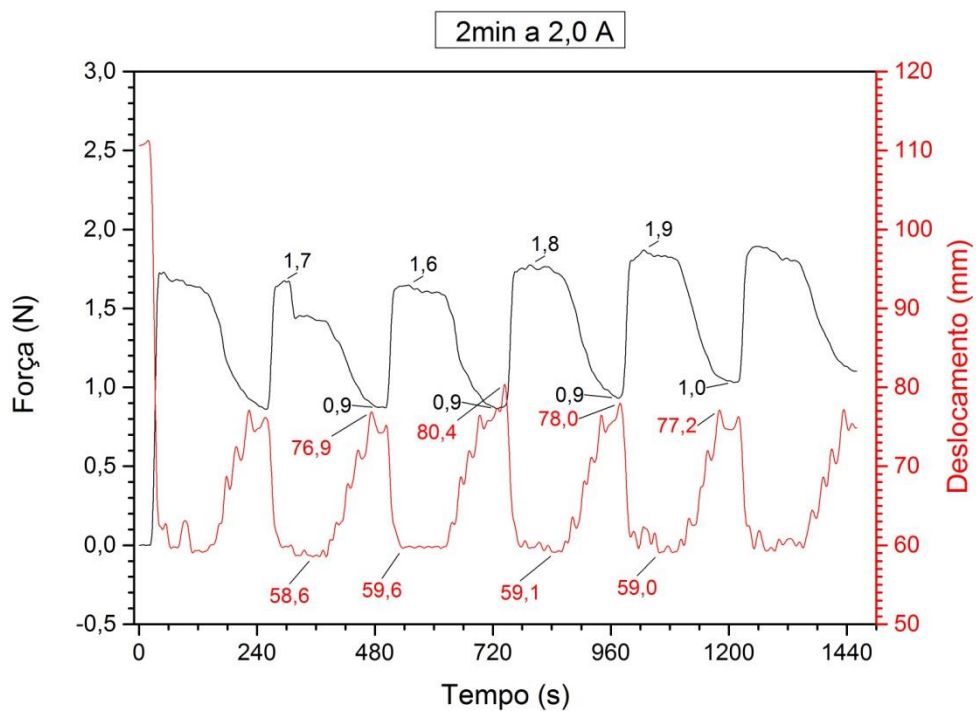
A corrente de 2,0 A para esta mola causa um aumento de cerca de 2% tanto na contração absoluta da mola aquecida, quanto no deslocamento por ciclo, conforme comparação das Figuras 62 e 60 e das Tabelas 15 e 13.



Mais uma vez, a quantidade de calor gerada será maior, produzindo uma quantidade maior de austenita e elevando a temperatura mais próxima de  $A_f$ , o que faz a mola se contrair mais (59,07 mm), conforme aferido pelo sensor.

De novo, no resfriamento, o tempo maior não é suficiente para completar a transformação reversa mas, a mola se distende quase que no mesmo patamar do ciclo de tempo anterior (78,87 mm contra 78,12 mm). O valor de  $\Delta l = 19,05$  mm é então bem próximo do alcançado no teste anterior.

Os ciclos apresentam um comportamento mais estável neste teste e as forças apresentadas são menores que as forças obtidas no teste anterior e, a força residual continua aparecendo com o passar dos ciclos.



**Figura 62:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.

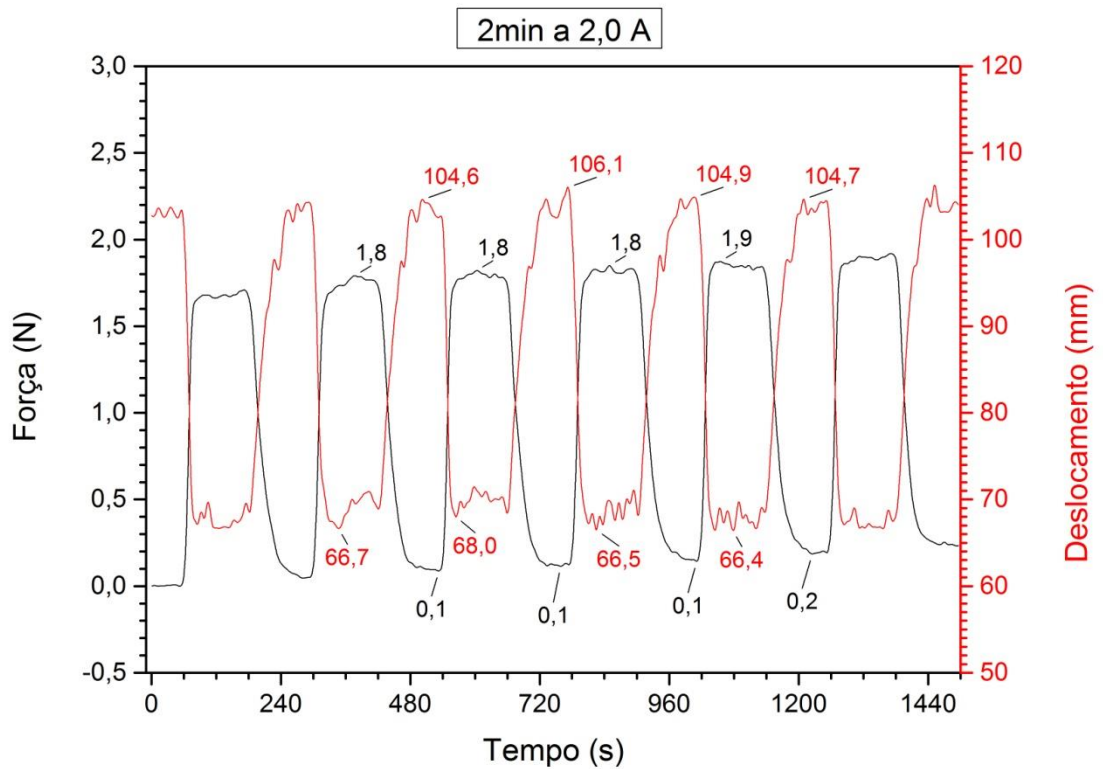
**Tabela 15:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 2min a 2,0 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	59,07
Contração da mola resfriada (mm)	78,12
Variação de deslocamento (mm)	19,05
Força da mola aquecida (N)	1,75
Força da mola resfriada (N)	0,92
Variação de força (N)	0,83

### 6.2.7.2 Mola 2

Comparando este teste, exposto na Figura 63, com o mesmo teste feito para a Mola 1, a tendência é confirmada quanto às contrações absolutas no aquecimento e no resfriamento já que a Mola 2 se contraiu menos, como visto na Tabela 16.

Agora, quando comparado ao teste realizado com ciclos de tempo de 1 minuto a 2,0 A para esta mesma mola, é possível perceber que a força no resfriamento é muito menor (0,12 N) neste teste. Isto se deve ao maior tempo de resfriamento que possibilita a obtenção de menores temperaturas e, como consequência, forças induzidas muito menores.



**Figura 63:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 16:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 2min a 2,0 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	66,90
Contração da mola resfriada (mm)	105,07
Variação de deslocamento (mm)	38,17
Força da mola aquecida (N)	1,82
Força da mola resfriada (N)	0,12
Variação de força (N)	1,70

## 6.2.8 Teste 2min a 2,5 A

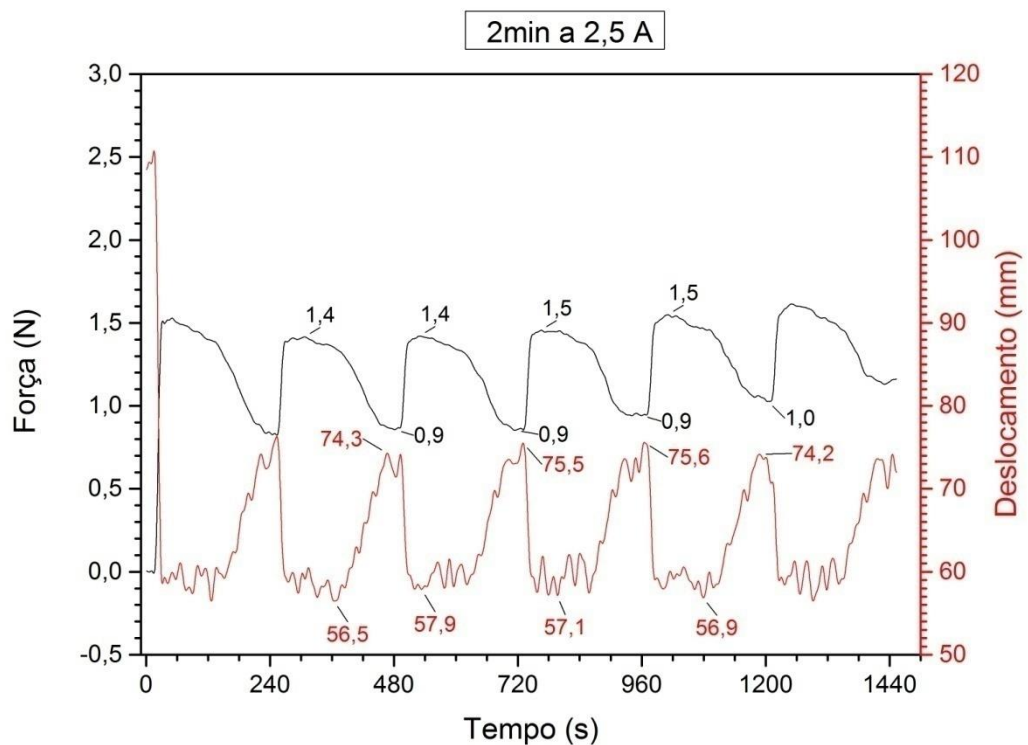
### 6.2.8.1 Mola 1

Isso é mostrado na forma dos picos de deslocamento do gráfico da Figura 64, onde a curva vermelha cresce até um valor máximo e logo em seguida cai bruscamente.

Neste teste, com uma corrente maior de 2,5 A, a contração maior acontece durante o aquecimento (57,10 mm) conforme esperado e prova mais uma vez a maior quantidade de austenita gerada pela maior quantidade de calor.

No resfriamento, a tendência também se confirma e a mola se distende menos (74,90 mm) que no caso anterior com 1,5 A como aferido pelo sensor. Apesar do comportamento da mola ser o mesmo dos testes anteriores quando analisados os valores absolutos de contração da mola aquecida e resfriada, a variação  $\Delta l = 17,80$  mm é menor que no caso da corrente de 2,0 A, conforme a Tabela 17.

As forças apresentadas foram menores do que no caso anterior assim como a força residual apresentada com o passar dos ciclos.



**Figura 64:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.

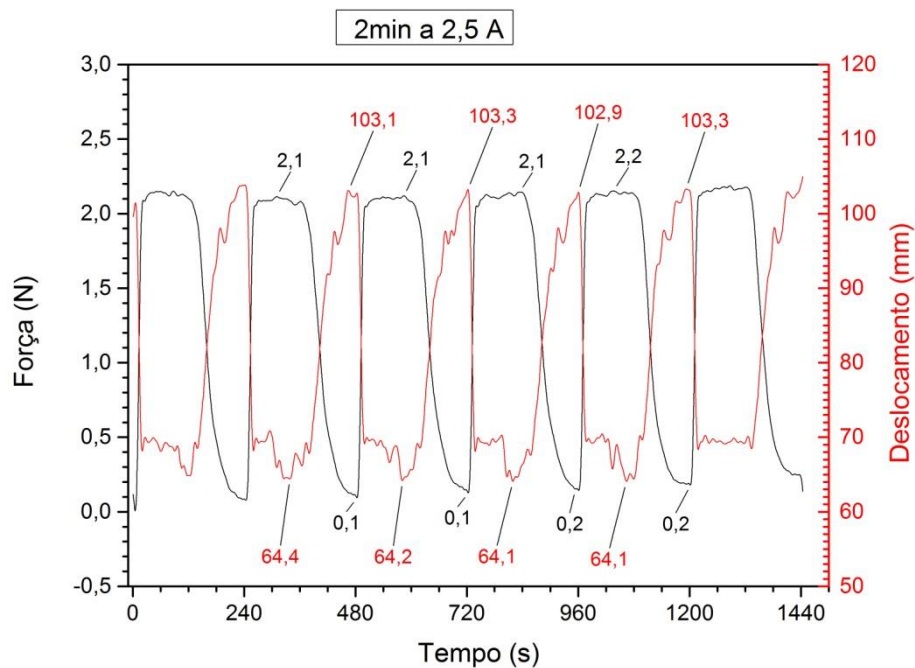
**Tabela 17:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 2min a 2,5 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	57,10
Contração da mola resfriada (mm)	74,90
Variação de deslocamento (mm)	17,80
Força da mola aquecida (N)	1,45
Força da mola resfriada (N)	0,92
Variação de força (N)	0,53

### 6.2.8.2 Mola 2

Este teste, exposto na Figura 65, seguiu a tendência e apresentou contrações no aquecimento (64,20 mm) e no resfriamento (103,15 mm) menores que no mesmo teste realizado com a Mola 1, o que ocorre pela necessidade de uma quantidade de calor maior para alcançar o mesmo patamar de temperatura já que a Mola 2 possui massa maior que a Mola 1.

Além disso, este teste apresentou variação de deslocamento maior (38,95 mm) do que o teste aplicado com ciclos de 1 minuto a 2,5 A para a mesma mola. Isto pode ser explicado pelo maior tempo de resfriamento que proporciona uma retirada maior das forças residuais impostas pela corrente com o passar dos ciclos. Os valores de força e deslocamento estão na Tabela 18 abaixo.

**Figura 65:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 2min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 18:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 2min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 2min a 2,5 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	64,20
Contração da mola resfriada (mm)	103,15
Variação de deslocamento (mm)	38,95
Força da mola aquecida (N)	2,12
Força da mola resfriada (N)	0,15
Variação de força (N)	1,97

## 6.2.9 Teste 3min a 1,0 A

### 6.2.9.1 Mola 1

Neste próximos casos a serem analisados, o tempo de aquecimento e de resfriamento serão maiores (3 minutos) que no casos anteriores (1 e 2 minutos), logo durante o processo pode-se fazer a mesma análise onde, teoricamente, a temperatura final do aquecimento estará mais próxima de  $A_f$  e a temperatura final de resfriamento, deverá estar mais próxima de  $M_f$ .

Comparando as amperagens das correntes nestes casos com as amperagens realizadas nas análises anteriores, nos casos em que se utilizou ciclos de tempo menores para o aquecimento e para o resfriamento, pode-se concluir que os comportamentos, no geral, seguem o mesmo padrão, porém há algumas exceções.

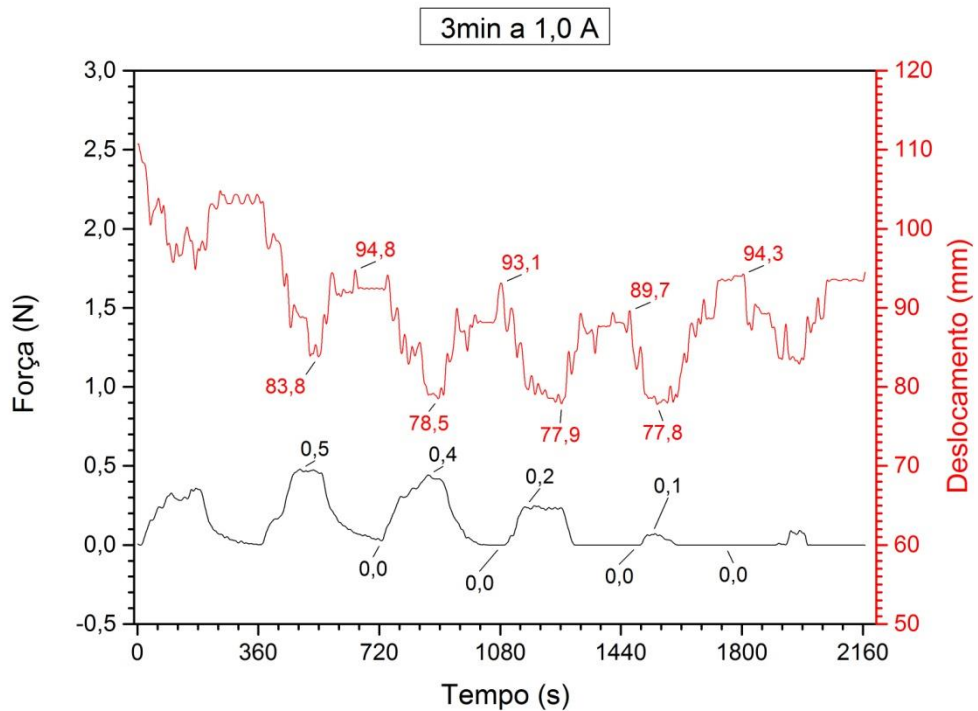
Como já explicado anteriormente, agora, o que vai gerar uma contração maior da mola não será simplesmente a mudança de amperagem mas também, a mudança nos tempos de aquecimento e resfriamento, que serão maiores.

Assim, como já citado, espera-se que a mola se contraia mais no aquecimento, apresentando uma quantidade maior de austenita. E, no resfriamento, a mola se distenda mais, apresentando uma quantidade maior de martensita maclada e não maclada, mas se o tempo de resfriamento não for suficiente, a temperatura mais baixa e próxima de  $M_f$  não será alcançada.

Analisando a Figura 66 em conjunto com a Tabela 19, verifica-se que neste caso o sensor aferiu um valor médio menor de contração da mola aquecida (79,50 mm) do que no caso com ciclos de tempo de 1 e 2 minutos com a mesma amperagem, o que representa uma contração maior da mola, que é explicada pelo maior tempo de aquecimento, que gera uma quantidade de calor maior e, por consequência, uma temperatura maior, produzindo maior quantidade de austenita.

Ainda nesta análise, durante o resfriamento, a contração mínima (92,97 mm) se caracteriza por ser menor que nos casos de resfriamento de 1 minuto (104,47 mm) e de 2 minutos (95,60 mm). Como a temperatura de aquecimento foi maior que quando feito o aquecimento a 1 e 2 minutos, conclui-se que mesmo com um tempo de resfriamento de 3 minutos, este tempo não foi suficiente para se resfriar na mesma temperatura do resfriamento do tempo anterior.

A força média apresentada quando aplicada a corrente de 1,0 A com ciclos de 3 minutos foi menor do que a força apresentada com a mesma amperagem com ciclos de tempo de 2 minutos, o que pode ser explicado pela queda brusca apresentada no último ciclo analisado.



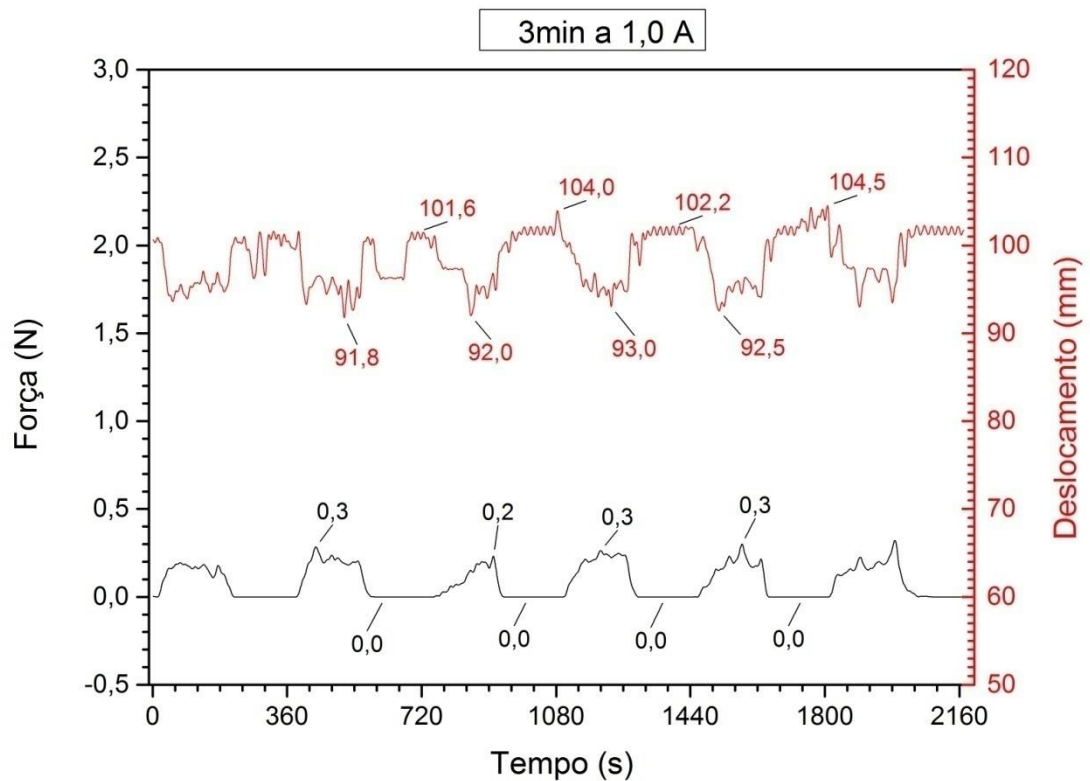
**Figura 66:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.

**Tabela 19:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 1,0 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 3min a 1,0 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	79,50
Contração da mola resfriada (mm)	92,97
Variação de deslocamento (mm)	13,47
Força da mola aquecida (N)	0,30
Força da mola resfriada (N)	0,00
Variação de força (N)	0,30

### 6.2.9.2 Mola 2

Neste caso, mostrado na Figura 67, os 3 minutos foram mais do que suficientes para que a força voltasse a zero porém o deslocamento foi muito baixo para cada ciclo. Além disso, o teste seguiu a tendência e apresentou valores de contração absoluta menores do que os apresentados pela Mola 1, como mostrado na Tabela 20.



**Figura 67:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 20:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 1,0 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 3min a 1,0 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	92,32
Contração da mola resfriada (mm)	103,07
Variação de deslocamento (mm)	10,75
Força da mola aquecida (N)	0,27
Força da mola resfriada (N)	0,00
Variação de força (N)	0,27

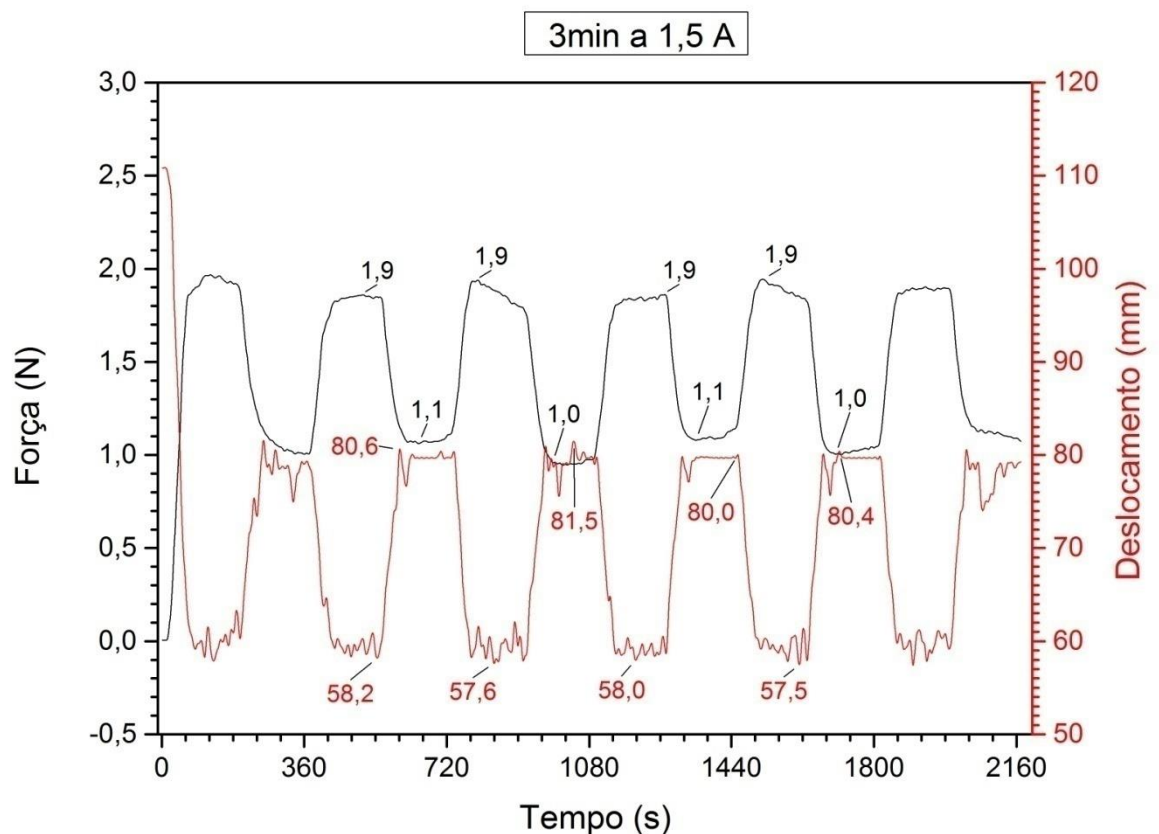
## 6.2.10 Teste 3min a 1,5 A

### 6.2.10.1 Mola 1

A mola apresentou um comportamento satisfatório neste teste, conforme Figura 68. Os ciclos foram estáveis com deslocamento médio de 22,80 mm e contração absoluta de 57,82 mm, em média, durante o aquecimento.

No resfriamento, a mola se distendeu mais (80,62 mm) do que no teste com ciclo de tempo de 2 minutos para a mesma amperagem (78,87 mm), o que significa que o ciclo de 3 minutos de resfriamento é mais favorável para a transformação reversa do que o anterior.

Por isso, o valor de  $\Delta l = 22,80$  mm é bem maior que no caso com ciclo de tempo de 3 minutos a 1,0 A, assim como no caso do teste de 2 minutos a 1,5 A, conforme a Tabela 21.



**Figura 68:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.



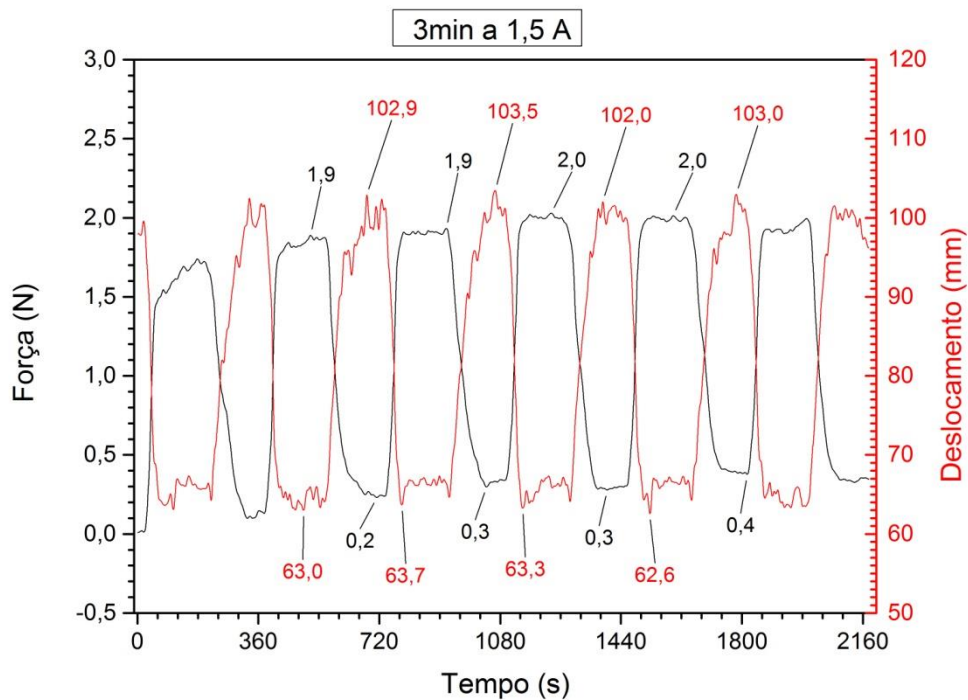
**Tabela 21:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 1,5 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 3min a 1,5 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	57,82
Contração da mola resfriada (mm)	80,62
Variação de deslocamento (mm)	22,80
Força da mola aquecida (N)	1,90
Força da mola resfriada (N)	1,05
Variação de força (N)	0,85

### 6.2.10.2 Mola 2

A Mola 2 se contrai menos do que a Mola 1 no teste com ciclos de aquecimento e resfriamento de 3 minutos a 1,5 A, o que se explica pela massa da Mola 2, que é maior.

Este teste, ilustrado na Figura 69, ainda mostra que o deslocamento com 3 minutos (39,70 mm, mostrado na Tabela 22) foi maior do que o apresentado com 2 minutos com a mesma amperagem, isto ocorre porque os 3 minutos representam um tempo maior de resfriamento que tem forças menores como consequência.

**Figura 69:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 22:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 1,5 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 3min a 1,5 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	63,15
Contração da mola resfriada (mm)	102,85
Variação de deslocamento (mm)	39,70
Força da mola aquecida (N)	1,95
Força da mola resfriada (N)	0,32
Variação de força (N)	1,63

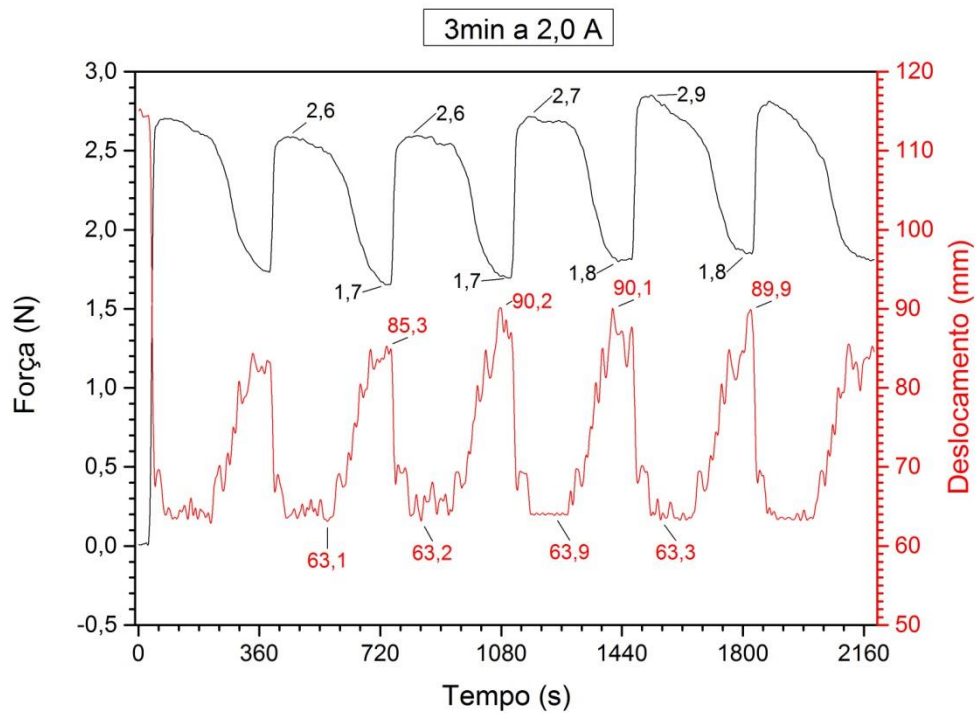
## 6.2.11 Teste 3min a 2,0 A

### 6.2.11.1 Mola 1

O teste com ciclo de tempo de 3 minutos e corrente de 2,0 A (Figura 70) saiu da tendência dos outros e apresentou o maior deslocamento médio dos testes com o mesmo ciclo de tempo, porém a menor contração média máxima da mola, 25,50 mm e 63,37 mm, respectivamente.

No resfriamento, a mola se distendeu mais (88,87 mm) do que no teste com ciclo de tempo de 2 minutos para a mesma amperagem (78,12 mm), o que significa que o ciclo de 3 minutos de resfriamento é mais favorável para a transformação reversa do que o anterior.

Por isso, o valor de  $\Delta l = 25,50$  mm é maior que no caso com ciclo de tempo de 3 minutos a 1,0 A, assim como no caso do teste de 2 minutos a 1,5 A, conforme a Tabela 23.



**Figura 70:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.

**Tabela 23:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 2,0 A da Mola 1. Fonte própria.

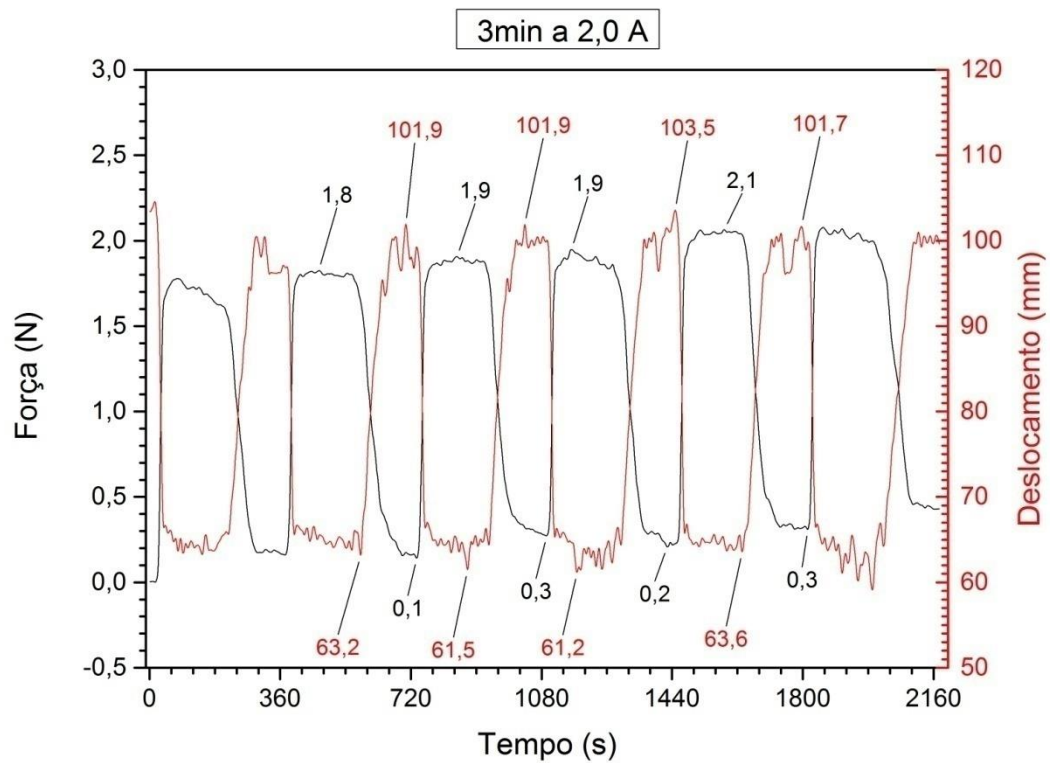
Ciclo de 3min a 2,0 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	63,37
Contração da mola resfriada (mm)	88,87
Variação de deslocamento (mm)	25,50
<hr/>	
Força da mola aquecida (N)	2,70
Força da mola resfriada (N)	1,75
Variação de força (N)	0,95

### 6.2.11.2 Mola 2

Já o mesmo teste com a Mola 2 (Figura 71) continuou seguindo a tendência de quanto maior a massa da mola, menores as forças induzidas pela corrente, como mostra a Tabela 24.

Ainda é possível perceber que o ciclo de 3 minutos proporciona um deslocamento maior (39,88 mm) do que o ciclo de 2 minutos porém, o teste não segue a tendência no que

diz respeito à força no final do resfriamento, que mesmo com um tempo maior de resfriamento, permanece maior do que a anterior.



**Figura 71:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.

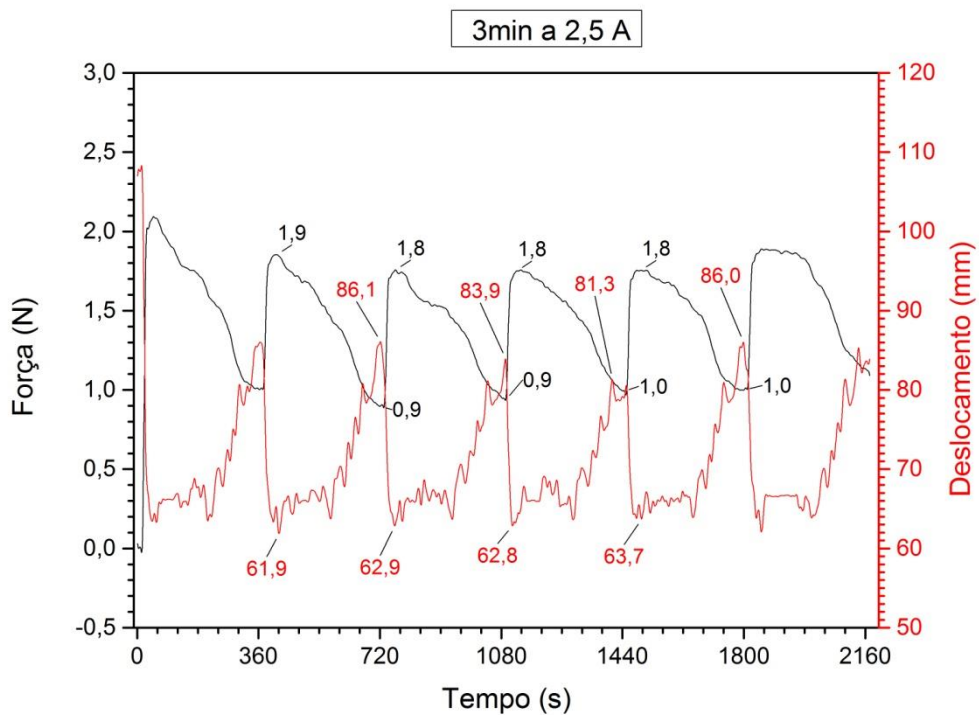
**Tabela 24:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 2,0 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 3min a 2,0 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	62,37
Contração da mola resfriada (mm)	102,25
Variação de deslocamento (mm)	39,88
Força da mola aquecida (N)	1,92
Força da mola resfriada (N)	0,22
Variação de força (N)	1,70

## 6.2.12 Teste 3min a 2,5 A

### 6.2.12.1 Mola 1

A corrente de 2,5 A foi capaz de contrair mais a mola do que a corrente de 2,0 A, mesmo que minimamente, uma diferença de 0,55 mm. Porém, este teste (Figura 72) se diferenciou da tendência dos outros pois o deslocamento médio foi menor do que o apresentado no teste anterior, 21,50 mm a 2,5 A contra 25,50 mm a 2,0 A.



**Figura 72:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.

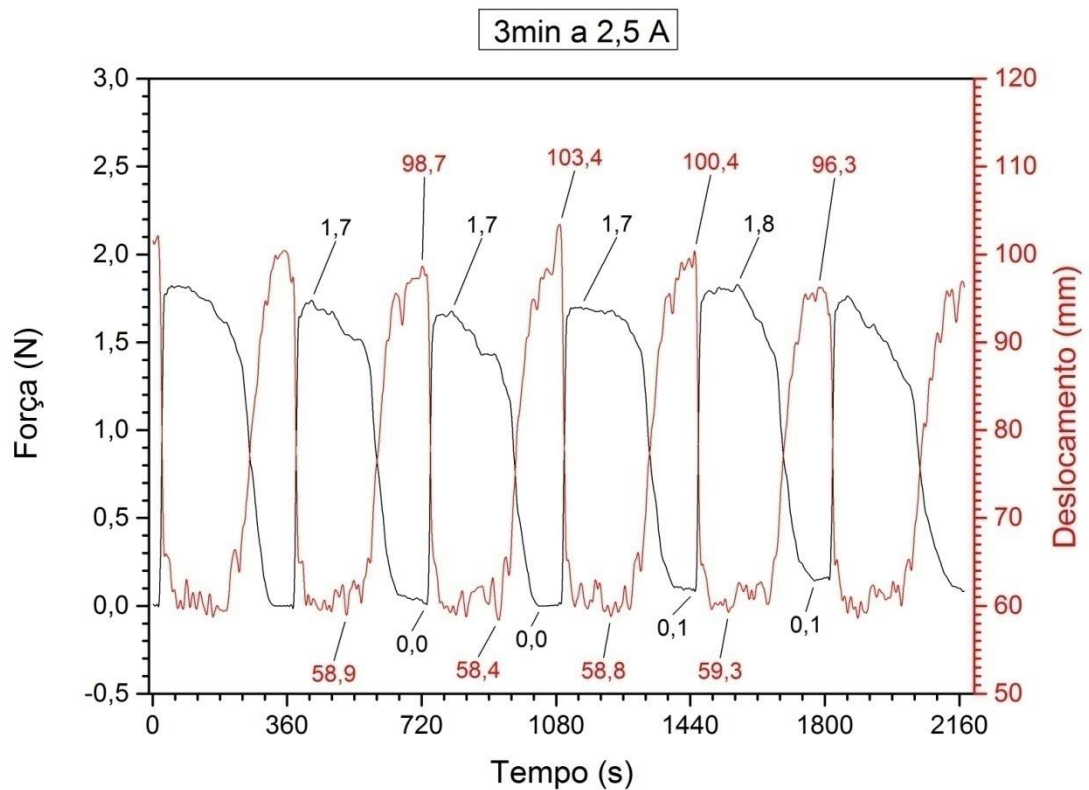
**Tabela 25:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 2,5 A da Mola 1. Fonte própria.

Ciclo de 3min a 2,5 A - Mola 1	
Contração da mola aquecida (mm)	62,82
Contração da mola resfriada (mm)	84,32
Variação de deslocamento (mm)	21,50
Força da mola aquecida (N)	1,82
Força da mola resfriada (N)	0,95
Variação de força (N)	0,87

### 6.2.12.2 Mola 2

Este teste teve um comportamento particular já que, quando comparado com o mesmo teste realizado com a Mola 1, obteve uma contração média maior no aquecimento mesmo com forças menores.

Quando comparado com o ciclo de 2 minutos, o teste apresentou um deslocamento maior (40,85 mm) e força no resfriamento menor (0,05 N), conforme visto na Tabela 26.



**Figura 73:** Gráfico da força e do deslocamento para o teste com ciclo de tempo de 3min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.

**Tabela 26:** Valores médios de força e deslocamento obtidos no teste de 3min a 2,5 A da Mola 2. Fonte própria.

Ciclo de 3min a 2,5 A - Mola 2	
Contração da mola aquecida (mm)	58,85
Contração da mola resfriada (mm)	99,70
Variação de deslocamento (mm)	40,85
Força da mola aquecida (N)	1,72
Força da mola resfriada (N)	0,05
Variação de força (N)	1,67

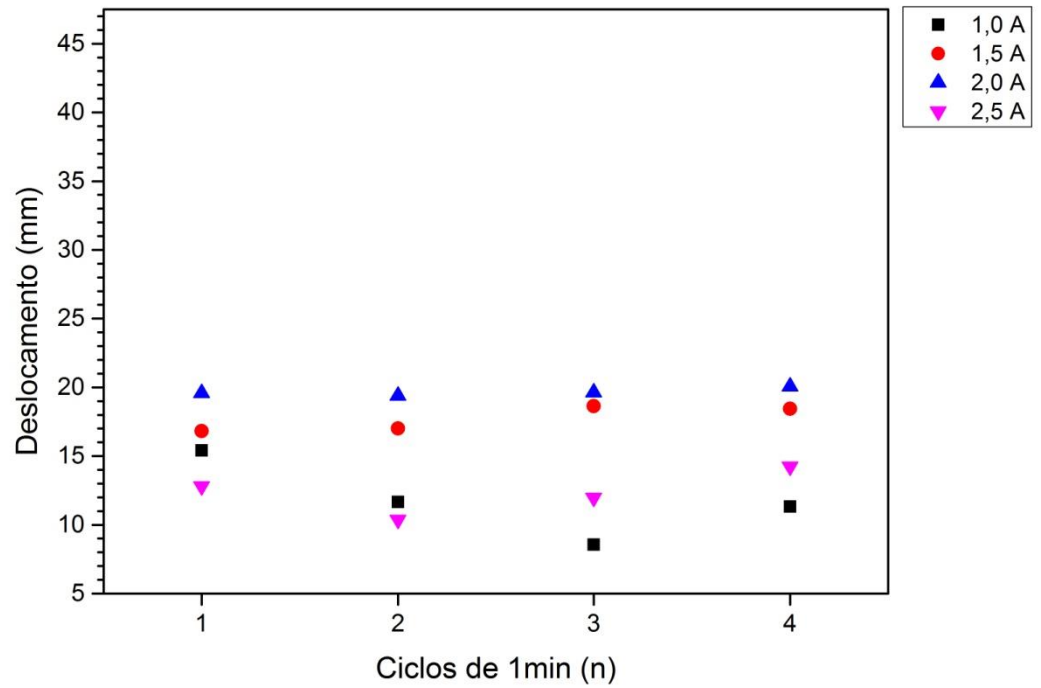
## **6.2.13 Resultados comparativos**

### **6.2.13.1 Testes com 1min**

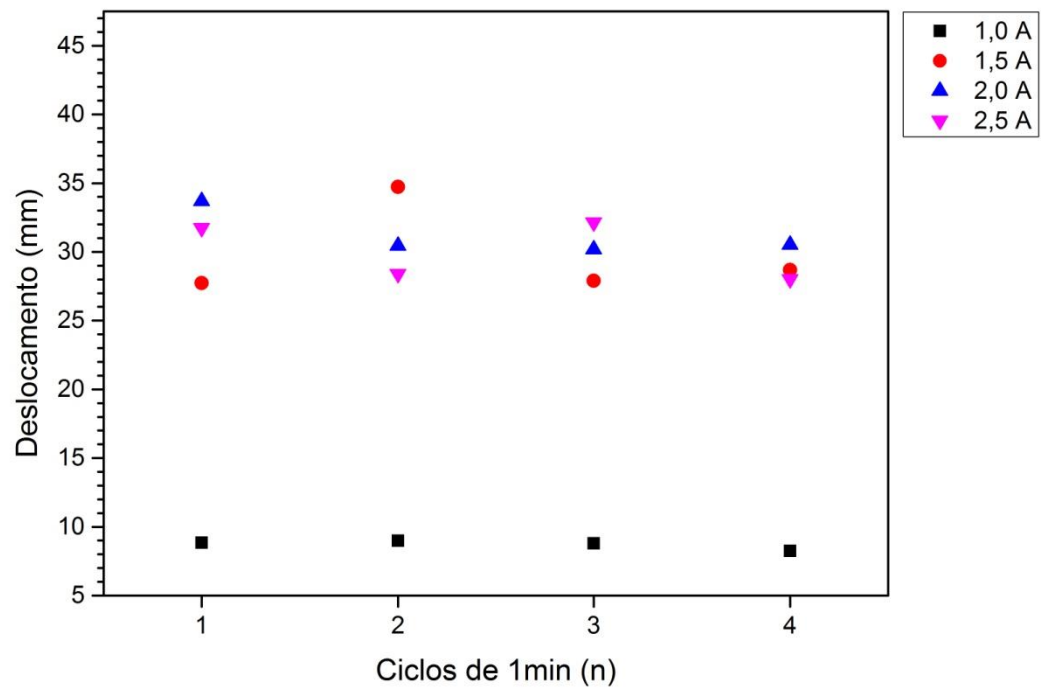
As Figuras 74 e 75 a seguir, mostram os deslocamentos por ciclo obtidos nos testes com ciclos de tempo de 1 minuto para as duas molas utilizadas. Nelas, são mostrados somente quatro resultados por amperagem pois o primeiro e o último ciclo de cada teste foram excluídos.

Comparando os dois gráficos entre si, é possível perceber que mesmo com a aplicação de 1,5 A, a Mola 2 mostra um deslocamento maior do que a Mola 1 com 2,5 A. Isso favorece o uso Mola 2 com este ciclo de tempo já que esta mola apresenta um deslocamento maior com menos energia.

Agora, analisando somente a Figura 75 do teste com a Mola 2, pode-se perceber que as correntes de 2,0 A e 2,5 A são as correntes que propiciam os maiores deslocamentos por ciclo (31,25 mm e 30,10 mm, em média, respectivamente) no teste proposto. Somente no segundo ciclo é que a corrente de 1,5 A causa um deslocamento maior do que as demais. Analisando ainda os resultados em conjunto com as Figuras 55 e 57, pode-se definir que a melhor amperagem a ser aplicada é 2,0 A pois é com esta amperagem que a mola apresenta deslocamentos maiores e se comporta de forma mais constante ao longo dos ciclos.



**Figura 74:** Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 1min para a Mola 1. Fonte própria.



**Figura 75:** Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 1min para a Mola 2. Fonte própria.

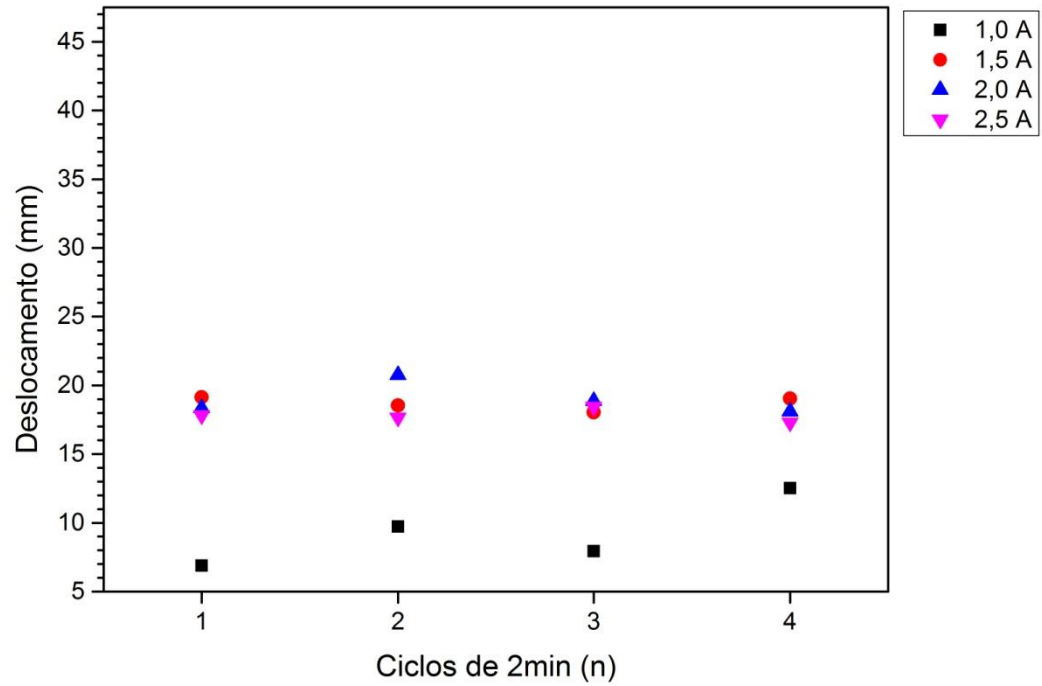


### 6.2.13.2 Testes com 2min

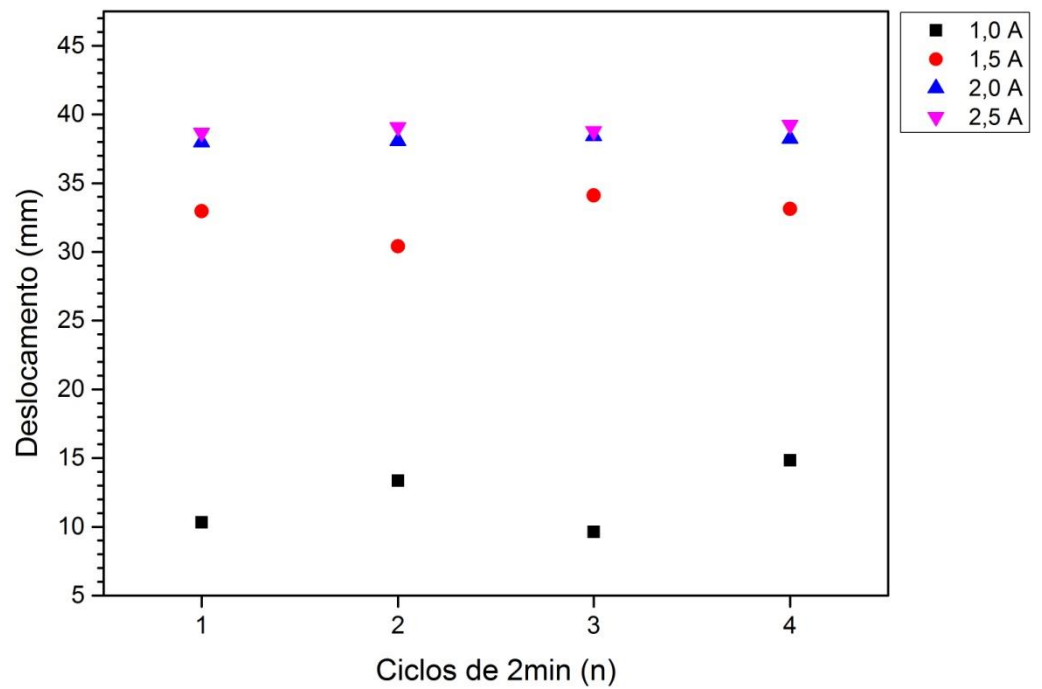
As Figuras 76 e 77 a seguir, mostram os deslocamentos por ciclo obtidos nos testes com ciclos de tempo de 2 minutos para as duas molas utilizadas. Assim como no teste anterior, estas figuras mostram somente quatro resultados por amperagem pois o primeiro e o último ciclo de cada teste foram excluídos.

Quando comparados os dois gráficos, é possível perceber que o maior deslocamento obtido pela Mola 1 acontece no segundo ciclo com 2,0 A e é igual a 20,75 mm, que é cerca de 10 mm menor do que o deslocamento obtido em qualquer ciclo pela Mola 2 com 1,5 A (média de 32,65 mm). Igualmente ao resultado dos testes com 1 minuto de ciclo de tempo, isso prova que a Mola 2 é mais aplicável.

Então, analisando somente a Figura 77, pode-se perceber que os deslocamentos por ciclo das correntes de 2,0 A e 2,5 A se equivalem, tendo apenas 0,77 mm de diferença na média, o que representa uma variação de aproximadamente 2% ao longo do teste. Enquanto isso, à corrente de 1,5 A, a mola se mostra um pouco mais instável. Por isso, a corrente de 2,0 A se torna mais aplicável. Com esta corrente, a mola apresenta comportamento igualmente constante e deslocamento médio ligeiramente menor com um gasto de energia menor do que com a corrente de 2,5 A.



**Figura 76:** Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 2min para a Mola 1. Fonte própria.



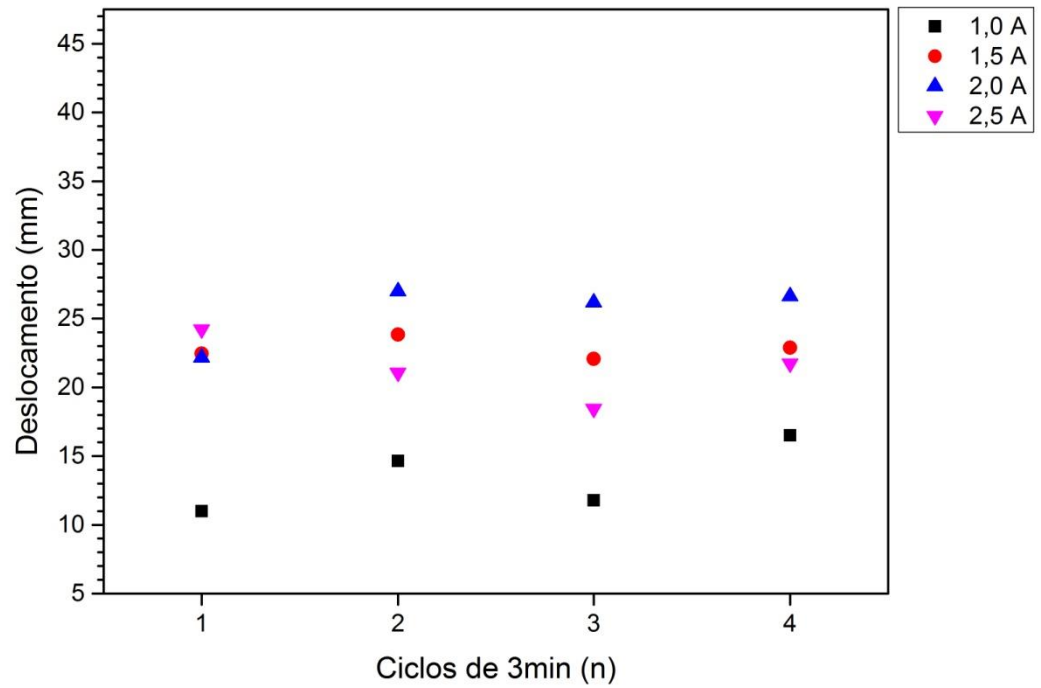
**Figura 77:** Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 2min para a Mola 2. Fonte própria.

### 6.2.13.3 Testes com 3min

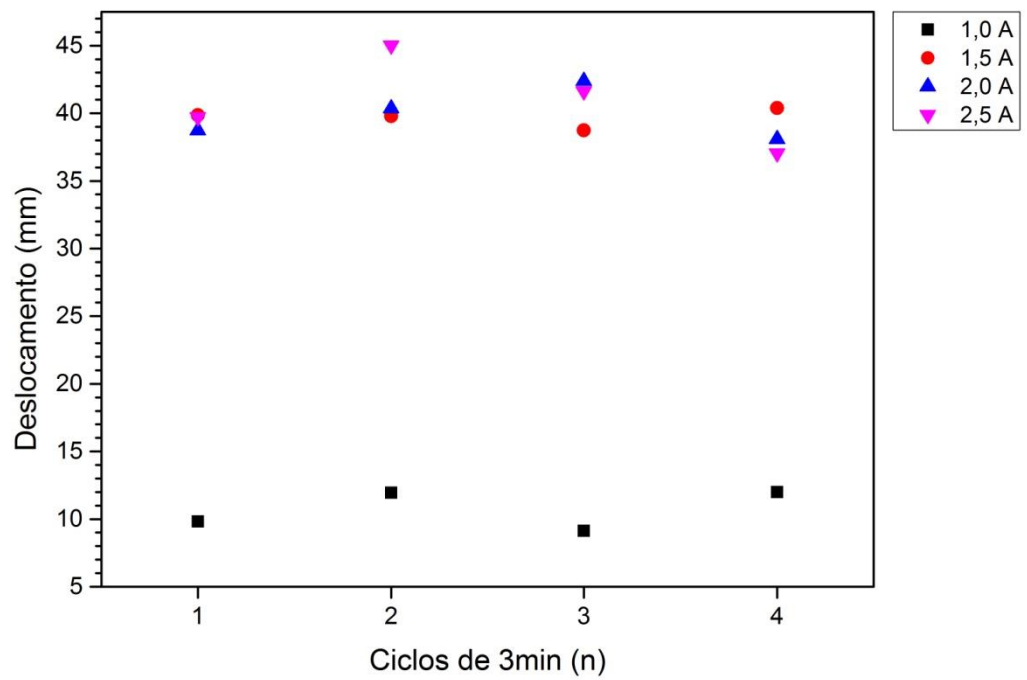
As Figuras 78 e 79 abaixo, mostram os deslocamentos por ciclo obtidos nos testes com ciclos de tempo de 3 minutos para as duas molas utilizadas. Assim como nos testes anteriores, estas figuras mostram somente quatro resultados por amperagem pois o primeiro e o último ciclo de cada teste foram excluídos.

Mais uma vez, comparando os dois gráficos entre si, tem-se que o maior deslocamento apresentado em um ciclo pela Mola 1 ocorreu com 2,0 A no segundo ciclo e foi igual a 26,99 mm. Este deslocamento foi superado em pelo menos 10 mm pela Mola 2 mesmo com aplicação de uma corrente de 1,5 A. Isso prova que a Mola 2 se mostrou mais aplicável novamente.

Analisando a Figura 79 que mostra os resultados para o seu teste, é possível perceber que o maior deslocamento foi obtido pela corrente de 2,5 A no segundo ciclo. Porém, o deslocamento variou muito por ciclo, de 37,03 mm a 45,01 mm, e a corrente não deve ser aplicada. Já a aplicação das correntes de 1,5 A e 2,0 A, mostrou que a mola se comportou de forma bem mais constante, variando de 38,73 mm a 40,38 mm e de 38,09 mm a 42,39 mm, respectivamente. Comparando ainda as médias de deslocamento por ciclo, tem-se uma variação de apenas 0,21 mm entre estas duas correntes. Portanto, a corrente que determina um comportamento constante e deslocamentos por ciclo suficientemente altos com menos gasto de energia e se mostra mais aplicável é a de 1,5 A.



**Figura 78:** Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 3min para a Mola 1. Fonte própria.



**Figura 79:** Gráfico comparativo do deslocamento por ciclo com diferentes correntes no ciclo de tempo de 3min para a Mola 2. Fonte própria.

## Capítulo 7

### Conclusões

#### 7.1 - Sobre o procedimento experimental

Com base nas aplicações estudadas na revisão bibliográfica, este projeto buscou desenvolver um protótipo de uma mesa inteligente atuado por molas de SMA, à princípio. Como alguns recursos eram limitados, a ideia seguinte foi desenvolver uma estrutura onde seria possível desenvolver um estudo para fazer uma comparação entre métodos de utilização de diferentes molas de SMA em uma mesa pantográfica.

O ensaio de tração deu um panorama inicial da rigidez necessária pelo sistema em que as molas poderiam atuar.

Pela teoria, sabe-se que quanto maior é a massa da mola, maior é a corrente necessária para aquecer esta mola a um mesmo patamar de temperatura de uma outra com massa menor. Assim, esperava-se uma transformação, no mínimo, "mais completa" na Mola 2 à temperatura ambiente (porcentagem maior de martensita) e portanto, uma resposta melhor de deslocamento.

Os testes com carregamento constante mostraram que a quantidade de calor devido a aplicação da corrente causa um acréscimo de temperatura ocasionando uma maior formação de austenita na formação cristalina da liga. A transformação da martensita maclada e não maclada em austenita depende da temperatura provocada pelo efeito Joule, podendo chegar a temperatura  $A_f$ , acima da qual só há austenita na estrutura cristalina.

Outro fato observado nestes testes foi o tempo de resfriamento no processo. Em algumas situações a temperatura foi tão alta que o tempo imposto para ocorrer o resfriamento, e portanto a transformação reversa (austenita  $\rightarrow$  martensita), não foi suficiente. Assim, logo no início do próximo ciclo, pode-se encontrar uma mistura contendo as fases austenítica, martensítica maclada e martensítica não maclada, sendo esta última induzida pela força de carregamento oriunda da mola de tração. Devido a estes fatos, verifica-se que a variação do deslocamento pode ocorrer de maneiras distintas dentro de uma formação cristalina onde se tenha as fases austenítica, martensítica maclada e martensítica não maclada em porcentagens diferentes, de acordo com a temperatura mínima atingida no resfriamento.

O aparato experimental mostrou que havia a possibilidade de utilização de ambas as molas testadas. Porém, segundo os resultados comparativos apresentados, a Mola 2 foi capaz de deslocar muito mais o tampo utilizado. Para efeito de comparação, a Mola 1 apresentou o máximo de 25,50 mm de deslocamento médio no teste com ciclo de 3 minutos a 2,0 A, enquanto que a Mola 2 apresentou o máximo de 40,85 cm no teste com ciclo de 3 minutos a 2,5 A, uma diferença de 37,6%. Assim, a Mola 2 mostra-se mais viável para aplicação no protótipo que seria construído com 4 molas de SMA.

## **7.2 - Sugestões futuras**

As molas de SMA apresentadas neste projeto permitiriam a construção de um protótipo com pequenas dimensões para um estudo inicial. Mas, para que a ideia de inovação e substituição dos sistemas mais utilizados atualmente (mecânico e pneumático) seja alcançada, se faz necessária a aplicação desta família de materiais em proporções industriais. Por isso, a sugestão que fica para futuros trabalhos é refazer os mesmos testes com molas mais robustas que possam produzir mais força e deslocar cargas mais pesadas.

Além disso, seria interessante adicionar peso no aparato e verificar como isto iria influenciar no deslocamento do tampo da mesa. Também se sugere a realização de um monitoramento das temperaturas das molas de SMA durante a aplicação das correntes para fazer a relação com as temperaturas de transformação e suas respectivas porcentagens de fases presentes na estrutura cristalina. E ainda um estudo numérico sobre o atuador que ajudaria de forma melhor a determinação da mola a ser utilizada através de parâmetros de interesse em futuros projetos como, por exemplo: carga a ser suportada ou altura de deslocamento requisitado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AQUINO, A. S. De. "*Controle de vibração de um sistema sob desbalanceamento rotativo utilizando atuador de liga com memória de forma*". 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil, 2011.
- [2] ATLI, K. C.; FRANCO, B. E.; KARAMAN, I.; GAYDOSH, D.; NOEBE R. D. "*Influence of crystallographic compatibility on residual strain of TiNi based shape memory alloys during thermo-mechanical cycling*". *Materials Science and Engineering: A*. v.574, pp. 9-16, 2013.
- [3] COURA, A. N. C.; *Estudo da Aplicação da Liga NiTi com Efeito Memória de Forma em Atuadores de Aeronaves*, Dissertação de M. Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2016.
- [4] CHOPRA, I. Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems. *AIAA Journal*, Nov. de 2002. n. 11, v. 40. p. 2145–2187.
- [5] CZECHOWICZ, A.; LANGBEIN, S.; *Shape Memory Alloy Valves: Basics, Potentials, Design*, eBook, Springer, 2015.
- [6] HARTL, D. J.; LAGOUDAS, D. C.; CALKINS, F. T.; MABE, J. H. "*Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application: I. Thermomechanical characterization*". *Smart Materials and Structures*, v. 19 no. 1. pp. 015020, 2010.
- [7] HUANG, W. "*On the selection of shape memory alloys for actuators*". *Materials & Design* 23, 2002.
- [8] HUMBEECK J. "Non-medical applications of shape memory alloys". *Materials Science and Engineering A*, v. 273-275 pp. 134-148, 1999.
- [9] KURDJUMOV, G. V; KHANDROS, L. G. "*First reports of the thermoelastic behaviour of the martensitic phase of Au-Cd alloys*", *Doklady Akademii Nauk SSSR* 66, pp. 211–213, 1949.
- [10] LAGOUDAS, D.C. *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*. Nova Iorque: Springer Science, 2008.
- [11] MAESTA, M. F. *Controle Nebuloso Aplicado em Asas Adaptativas Utilizando Ligas de Memória de Forma*, Ago. 2012. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.
- [12] MITWALLY, M. E.; FARAG, M.; "*Effect of cold work and annealing on the structure and characteristics of NiTi alloy*". *Materials Science and Engineering: A*, v. 519, pp 155-166, 2009.
- [13] MOHD, J.J., LEARY, M.S.A, GIBSON, M.A., 2014." A review of shape memory alloy research, applications and opportunities", *Materials & Design* 56.

- [14] MONTEIRO, P. C. C. "Experimental investigation of the influence of the heating rate in an SMA actuator performance". *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 199, pp. 254-259, 2013.
- [15] NESPOLI, A; BESSEGHINI, S; PITTACCIO, S; VILLA, E; VISCUSO, S. "The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators". *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 158, pp 149-160, 2010.
- [16] OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. *Shape Memory Materials*. Cambridge: Cambridge University, pp. 149-183, 1998.
- [17] PAIVA, A. *et al*; "A constitutive model for shape memory alloys considering tensile-compressive asymmetry and plasticity". *International Journal of Solids and Structures* 42, 3439-3457, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, dezembro de 2004.
- [18] PAIVA, T. "Análise numérica de diferentes configurações de atuadores com memória de forma". Dissertação de M.Sc., DIPPG CEFET-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.
- [19] PULNEV, S.; VAHMI, I.; PRIADKO, A.; ROGOV, A. "Miniature linear actuators based on Cu-Al-Ni shape memory single crystals". *Proceedings on SMST*, 2004.
- [20] ROMANO, R.; TANNURI, E. A. "Modelagem e validação experimental de um atuador baseado em liga de memória de forma". *Revista Controle & Automação*, v.19 no.1, pp. 30-42, 2008.
- [21] URBINA, C; FERRANDO, F; DE LA FLOR, S. "Effect of mechanical cycling on stabilizing the transformation behaviour of NiTi shape memory alloys". *Journal of Alloys and Compounds*, v.469, pp. 343-349, 2009.
- [22] VAN HUMBEECK, J. "Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys". *Journal of Alloys and Compounds*, v. 355, p. 58-64, 2003.