CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA

Adriel Morgado de Moraes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Coorientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Rio de Janeiro

Dezembro/2019

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título em Mestre em Ciências da Engenharia Mecânica.

Adriel Morgado de Moraes

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professora Dra. Luciana Loureiro da Silva Monteiro (CEFET/RJ) (Orientadora)

_____

Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ) (Coorientador)

_____

Professor Dr. Alberto Paiva (UFF)

_____

Professor Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ)

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M827 Moraes, Adriel Morgado de
Estudo experimental de atuadores com memória de forma / Adriel Morgado de Moraes.—2019.
100f.: il., grafs., tabs., enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2019.
Bibliografia : f. 85-100
Orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro
Coorientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

1. Engenharia mecânica e de materiais. 2. Materiais inteligentes. 3. Ligas com memória de forma. 4. Atuadores lineares. I. Pacheco, Lívia Júlio (Orient.). II. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Co-Orient.). III. Título.

CDD 620.1

Elaborada pela bibliotecária Teresa Cristina Gaio Mattos – CRB/7 nº 4610

AGRADECIMENTOS

Ao CEFET/RJ, por dispor da estrutura necessária para a pesquisa, do apoio financeiro e do qualificado corpo docente. Ao grupo do MECANON, por colocar à disposição o equipamento necessário e ajudar quando preciso.

Aos meus orientadores, Luciana Loureiro e Ricardo Amar, pois sem eles não existiria pesquisa. Pela orientação e conhecimento passado ao longo de toda a minha formação acadêmica.

Aos técnicos do CEFET/RJ, que sem eles não seria capaz de solucionar os diversos desafios experimentais, principalmente, ao Yuri e Victor da elétrica e ao Brenno da mecânica.

À minha família, por toda paciência e apoio nessa jornada. Ao meu primo que me auxilia sempre que possível. À minha namorada que me amparou durante todo o percurso.

Ao grupo do LASEI, por formar um ótimo ambiente de trabalhar e se ajudar sempre que necessário. Ao graduado pelo CEFET/RJ, Humberto Terço, que durante sua iniciação científica deu início ao aparato empregado.

Resumo

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA

Adriel Morgado de Moraes

Orientadores:

Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Ceslo Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

O uso das chamadas ligas com memória de forma (do inglês *shape memory alloys,* SMAs) tem se tornado cada vez mais frequente em diversas áreas da ciência devido a sua capacidade em memorizar formas através de carregamentos termomecânicos. Pelo fato desses atuadores possuírem uma boa potência específica, este trabalho busca estudar experimentalmente diferentes configurações de atuadores lineares utilizando fios de SMA acoplados a molas de aço, de forma a explorar o efeito de memória de forma com tensão assistida. Para isto, é desenvolvido um aparato experimental e é explorado diversos parâmetros relevantes na atuação destes dispositivos, como diferentes taxas e amplitudes de aquecimento, condições iniciais de pré-carregamento mecânico e molas com diferentes valores de rigidez. Através dos ensaios e análises, é possível desenvolver uma metodologia de estudo destes atuadores, que pode ser utilizada como estratégia para determinar as melhores configurações de um atuador dependendo da aplicação desejada.

Palavras-chave: Materiais Inteligentes, Ligas com memória de forma, Atuadores.

Abstract

NUMERICAL-EXPERIMENTAL STUDY OF INTELLIGENT ACTUATORS

Adriel Morgado de Moraes

Advisors:

Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Abstract of Dissertation presented to PPEMM-CEFET/RJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

The use of Shape Memory Alloys (SMAs) has become increasingly common in many areas of science because of their ability to memorize shapes through thermomechanical loading. In behalf of these actuators have a good specific power, this work seeks to experimentally study different configurations of linear actuators using steel spring-coupled SMA wires in order to explore the effect of Shape-Assisted Memory. To this end, an experimental apparatus is developed and several relevant parameters in the performance of these devices are explored, such as different heating rates and amplitudes, initial mechanical preloading conditions and springs with different stiffness values. Through testing and analysis, it is possible to develop a study methodology for these memory actuators, hence it can be used as a strategy to determine the best actuator configurations depending on the desired application.

Keywords: Intelligent Materials, Shape memory alloys, Actuators.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama de Tensão de atuação e deformação de atuação (LAGOUDAS, 2008).....5
Figura 2.1 – Diagrama de Tensão de atuação e deformação de atuação (LAGOUDAS, 2008).....6
Figura 2.3 -Diagrama Potência/massa x massa de diferentes atuadores (IKUTA, 1990).....7
Figura 2.4 Modelos básicos de atuadores SMA (MOHDI JANI et al., 2016).....10
Figura 2.5. Atuador SMA com bias-force baseado em Butera et al.(2007) (a) bias spring (b) peso-morto (Adaptado de MOHDI JANI et al., 2016).....12
Figura 2.6 – Aparato experimental (MONTEIRO et al., 2013).....13
Figura 2.7 – Esquema do teste experimental (Adaptado de Monteiro et al, 2013).....13
Figura 2.8 – Configuração Experimental (Adaptado de MOHDI JANI et al., 2015).....14
Figura 2.9 – Aparato experimental (DHAKAL, B. et al, 2016).....16
Figura 2.10 – Modelo experimental da bola na viga (LAMBERT et al., 2017).....17
Figura 3.1 – Fenômeno da transformação de fase devido à temperatura (PAIVA, 2004).....20
Figura 3.2 – DSC para NiTi (SHAW & KYRIAKIDES, 1995).....21
Figura 3.3 – Efeito pseudoelástico (Adaptado de LAGOUDAS, 2008).....22
Figura 3.4 – Efeito memória de forma (SME) e sua curva tensão-deformação (PAIVA & SAVI, 2006).....23
Figura 3.5: Modelos básicos de atuadores SMA (Adaptado de MOHDI JANI et al., 2016).....25
Figura 4.1 – Ensaio DSC feito no MECANON.....27
Figura 4.2 – Ensaio de Tração (a) Força x Deslocamento (b) Deformação x Tensão.....28
Figura 4.3 – Ensaio de tração: Força versus deslocamento para cada mola de aço.....29
Figura 4.4 – Aparato Experimental.....31

Figura 4.5 – Aparato Experimental.....31
Figura 4.6 – Ponte de Wheatstone.....32
Figura 4.7 – Transdutor Linear de Posição (a) Esquema elétrico (Modificado do manual do fabricante) (b) Representação (Manual).....33
Figura 4.8 – Circuito Esquemático.....34
Figura 4.9 – Queda Ôhmica (Adaptado Ma, 2010).....36
Figura 4.10 – Procedimento de Soldagem (Adaptado Ma, 2010).....37
Figura 4.11 – Calibração do termopar.....38
Figura 4.12 – Comportamento da temperatura (a) Com Adesivo (b) Sem Adesivo.....39
Figura 4.13 – Fio SMA com o termopar acoplado.....40
Figura 4.14 – Pulse Shut-Off Method (Adaptado Ma, 2010)……...40
Figura 4.15 – Verificação da influência da corrente elétrica no termopar.....41
Figura 4.16 – Comparação Câmera Termográfica e Termopar.....42
Figura 4.17 – Comparativo da temperatura medida para duas correntes opostas.....43
Figura 4.18 - Diagrama esquemático do atuador bias-spring (DE PAIVA, 2017).....44
Figura 4.19 – Onda de Corrente Elétrica.....45
Figura 5.1 – Corrente elétrica e temperatura com taxas de aquecimento 0s a 50s.....49
Figura 5.2 Corrente elétrica e temperatura com taxas de aquecimento 180s a 300s.....51
Figura 5.3 – Corrente e Temperatura com controle de corrente no Resfriamento.....52
Figura 5.4 – Tensão x Deformação Ensaio de Aquecimento: (a) 0s, (b) 30s, (c) 30sR, (d) 60s, (e) 90s, (f) 90sR, (g) 150s, (h) 150sR e (i) 300s.....53
Figura 5.5 – Densidade de Energia do Ensaio de Aquecimento.....54
Figura 5.6 – Variação de Tensão do Ensaio de Aquecimento.....56
Figura 5.7 – Tensão, Deformação e Temperatura x Tempo Aquecimento 30sR.....57

Figura 5.8 – Variação de Deformação do Ensaio de com diferentes taxas de aquecimento.....58
Figura 5.9 – Deformação x Temperatura Ensaio de Taxa de Aquecimento (a) 0s, (b) 10s, (c) 20s, (d) 30s, (e) 30sR e (f) 210s.....59
Figura 5.10 Ciclos Térmicos para cada mola e pré-carga de 20N (a) Mola 1, (b) Mola 2, (c) Mola 3, (d) Mola 4, (e) Mola 5 e (f) Mola 6.....61
Figura 5.11 – Força x Tempo para cada mola.....62
Figura 5.12 – Deslocamento x Tempo para cada mola.....62
Figura 5.13 – Força x Deslocamento por Rigidez.....64
Figura 5.14 – Deslocamento x Temperatura: Mola 1, 3 e 6.....65
Figura 5.15 – Deslocamento x Temperatura: Mola 2, 4 e 5.....66
Figura 5.16 – Deformação x Tempo para cada mola.....67
Figura 5.17 – Estudo da Pré-Carga: Deslocamento (a) Mola 1 (b) Mola 2 (c) Mola 3 (d) Mola 4 (e) Mola 5 (f) Mola 6.....69
Figura 5.18 – Pré-Carga: Força (a) Mola 1 (b) Mola 2 (c) Mola 3 (d) Mola 4 (e) Mola 5 (f) Mola 6.....70
Figura 5.19 – Pré-Carga: Deslocamento x Temperatura (a) Mola 1 (b) Mola 2 (c) Mola 3 (d) Mola 4 (e) Mola 5 (f) Mola 6.....72
Figura 5.20 - Resultados da Pré-Carga: (a) Força x Pré-Carga (b) Deslocamento x Pré-Carga.....73
Figura 5.21 – Ensaio de Corrente Elétrica – Força, Deslocamento e Temperatura no Tempo: (a) Mola 2; (b) Mola 3 e (c) Mola 6.....74
Figura 5.22 – Ensaio para diferentes valores de Corrente elétrica para a Mola 2: (a) Deslocamento x Tempo; (b) Força x Tempo (c) Deformação x Tempo.....70
Figura 5.23 – Ensaio para diferentes valores de Corrente elétrica para a Mola 3: (a) Deslocamento x Tempo; (b) Força x Tempo; (c) Deformação x Tempo.....77
Figura 5.24 – Ensaio para diferentes valores de Corrente elétrica para a Mola 6: (a) Deslocamento x Tempo; (b) Força x Tempo; (c) Deformação x Tempo.....78
Figura 5.25 – Ensaio para diferentes valores de Corrente Elétrica (a) Deslocamento x Temperatura: Mola 2; (b) Temperatura x Deformação: Mola 2; (c) Deslocamento x Temperatura: Mola 3; (d) Temperatura x Deformação: Mola

3; (e) Deslocamento x Temperatura: Mola 6 e (f) Temperatura x Deformação: Mola 6.....80
Figura 5.26 – Resultado em função da corrente (a) Força x Corrente (b) Deslocamento x Corrente.....81

Lista de Tabela

Tabela 2.1 – Comparação entre atuação e performance de diferentes tipos de atuadores (Adaptado de Mohd Jani et al., 2014).....8

Tabela 4.1 – Rigidez para as molas de aço.....29

Tabela 4.2 – Tempos referentes aos carregamentos elétricos.....46

Tabela 4.3 – Nomenclatura para valores de pré-carga em função da corrente elétrica.....46

Tabela 4.4 – Condições ensaiadas por mola.....47

Tabela 5.1 – Diferença relativa entre os casos de somente aquecimento controlado e de aquecimento e resfriamento controlado.....55

Tabela 5.2 – Variação da Força e Deslocamento.....63

Tabela 5.3 – Energia por Rigidez.....65

Sumário

1.Introdução 1

2.Revisão Bibliográfica 3

2.1 Atuadores Lineares Convencionais 3

2.2 Atuadores de Liga com Memória de Forma 4

2.3 Geometrias básicas de atuadores SMA 9

3.Fundamentação Teórica 19

3.1 Transformação de fase devido à temperatura 20

3.2 Efeito Pseudoelástico 22

3.4 Efeito de memória de forma reversível através de treinamentos Termomecânicos 23

3.5 Efeito de memória de forma com Tensão Assistida 24

4.Metodologia Experimental 26

4.1 Fio de Liga com Memória de Forma 26

4.2 Molas Lineares 28

4.3 Aparato experimental 30

4.4 Instrumentação Científica 32

4.4.1 Temperatura 35

4.5 Metodologia Experimental 43

5. Resultados 48

5.1 Taxa de aquecimento 48

5.2 Efeito da rigidez da mola 59

5.3 Efeito da pré-carga 68

5.4 Efeito da Corrente Elétrica 74

6.Conclusão 83

7.Referências Bibliográficas 85

1.Introdução

Com o objetivo de cada vez mais aumentar a produtividade, é importante buscar soluções que visem maior rendimento mecânico, utilizem menos espaço para rendimentos similares, apresentem maior potência específica e menor consumo energético, dentre outras características pertinentes a melhorias de projetos de sistemas mecânico.

Do ponto de vista da automação, sensores e atuadores são componentes cada vez mais importantes e essenciais para o desenvolvimento de diferentes áreas da engenharia. Com o aumento da demanda, o estudo e emprego de atuadores inteligentes vêm crescendo nos últimos anos. Os materiais inteligentes possuem características adaptativas e modificam suas propriedades físicas quando há um estímulo adequado. Dentre os chamados materiais inteligentes destacam-se as ligas com memória de forma (SMAs – do inglês *Shape Memory Alloys*). Essas ligas podem sofrer grandes deformações reversíveis, da ordem de 8%, ou produzir grandes forças quando, mediante carregamento termomecânico, se restringe o seu deslocamento. Deste modo, o uso destes materiais se torna extremamente atraente para diferentes aplicações, substituindo elementos convencionais de atuação.

A motivação deste trabalho vem das propriedades únicas das SMAs. Assim, atuadores com ligas de memória de forma representam uma solução para simplificar sistemas existentes, pois possuem uma ótima relação entre potência e peso, justificando seu uso em áreas onde é importante esta relação, a exemplo temos a indústria aeroespacial (LAGOUDAS, 2008).

Este trabalho pretende caracterizar o comportamento de um atuador SMA do tipo linear *bias-spring* através do estudo da influência de diferentes parâmetros como a taxa de aquecimento, a deformação inicial do fio com memória de forma, os valores de corrente elétrica para aquecimento e os valores de rigidez mecânica das molas convencionais acopladas. Para este fim, é confeccionado um aparato experimental assim como a instrumentação

necessária para obtenção das grandezas físicas fundamentais para a caracterização.

Diversos trabalhos na área mostram a viabilidade do emprego desses atuadores com tensão assistida como em MONTEIRO et al. (2017), que estudaram numericamente diferentes configurações de atuadores se apoiando em um modelo constitutivo para SMAs com restrições internas desenvolvido por SAVI *et al*. (PAIVA *et al.,* 2005; SAVI *et al.*, 2005; BAÊTA-NEVES *et al.,* 2004; MONTEIRO *et al.,* 2009) e implementado como uma sub-rotina UMAT (*User Material Routine*) no software comercial ABAQUS por BANDEIRA *et al*. (2006). Este trabalho tem como objetivo uma continuação do trabalho numérico desenvolvido por MONTEIRO et al. (2017), comprovando que os resultados experimentais aqui encontrados possuem um bom acordo qualitativo.

Este trabalho é divido em capítulos, onde o capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica e o 3 apresenta a fundamentação teórica. O capítulo 4 aborda a metodologia experimental. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e o capítulo 6 discorre as conclusões e trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Nesta seção são descritos aspectos importantes referentes aos atuadores lineares – objeto de estudo do presente trabalho – começando com um breve comentário a respeito dos atuadores lineares convencionais e, em seguida, abordando as configurações mais adotadas de atuadores inteligentes com ligas SMA.

2.1 Atuadores Lineares Convencionais

Atuadores são partes móveis que conferem movimento aos sistemas mecânicos, semelhantes aos músculos no corpo humano. Do ponto de vista da engenharia, são empregados diferentes tipos de atuadores como fonte de movimento e força. Nesse escopo, os atuadores hidráulicos, elétricos e pneumáticos são denominados convencionais, pois são empregados pela maioria dos sistemas tanto robóticos como para mecânicos automáticos. Isto posto, atuadores elétricos utilizam motor elétrico para converter energia elétrica em mecânica, já os atuadores hidráulicos e pneumáticos usam fluidos para conferir movimento mecânico (MAVROIDIS, 1999).

Os atuadores hidráulicos funcionam por mudança de pressão, podendo ser usados tanto para movimentos lineares como rotacionais. Este tipo de atuador é muito vantajoso do ponto de vista da potência transmitida – já que são capazes de transmitir forças em ordens de grandeza elevadas, em comparação aos outros – e tempo de resposta baixo, isto quer dizer que, por exemplo, um robô usando este atuador pode executar movimentos rápidos e com grande força. Dessarte, esse tipo de sistema é empregado em situações onde se preza a transmissão de força ou de torque com pouca vibração. Algumas desvantagens podem ser citadas, dentre elas: uma possível contaminação do fluido de trabalho, que pode gerar queda de pressão; sua manutenção possui elevado custo quando comparado às suas alternativas; e mudança da viscosidade do fluido de trabalho com a variação da temperatura, motivo pelo qual altera a

transmissão de força, tendo em vista que a força é transmitida através do equilíbrio de pressão em dois pontos distintos, ou seja, quando há uma mudança de viscosidade e, por consequência, alteração na deformação alcançada durante a atuação, há mais perda da energia transmitida em relação à temperatura mais baixa. (JELALI E SCHWARZ, 1995; MAVROIDIS, PFEIFFER E MOSLEY, 1999; SENTHILKUMAR *et al.,* 2013).

Atuadores pneumáticos são descendentes diretos dos hidráulicos, se diferem pelo fluido de trabalho empregado, já que neste o fluido utilizado para a transmissão de energia são gases compressíveis – como o ar, por exemplo. Por este fator, a relação de transmissão de força é menor em relação aos hidráulicos, pois há mais perda de energia por deformação do fluido de trabalho diminuindo o rendimento da pressão transmitida. Além disso, há limitação oriunda da resposta não-linear desses atuadores e atritos maiores, o segundo é um resultado do fluido não prover a mesma autolubrificação dos fluidos empregados nos atuadores hidráulicos. Outra diferença entre os dois é que o atuador pneumático não possui linha de retorno para o fluido de trabalho, este é simplesmente exaustado. Esse atuador, em relação ao supracitado, é utilizado quando se requer um sistema mais leve e com dimensões menores. Outrossim, os fluidos usados são limpos e não-inflamáveis (MAVROIDIS, PFEIFFER & MOSLEY, 1999; RAHMAT *et al*., 2011; RICHER & HURMUZULU, 2001).

Por fim, atuadores elétricos são os que possuem a maior gama de equipamentos e, quando comparados aos citados anteriormente, ocupam menos espaço e possuem bom controle de posição e força, porém geram pouco torque comparado a seu tamanho (MAVROIDIS, PFEIFFER & MOSLEY, 1999).

2.2 Atuadores de Liga com Memória de Forma

Materiais inteligentes são materiais capazes de acoplar grandezas mecânicas e não mecânicas, conferindo um comportamento especial para o material. Por este motivo, inúmeras aplicações podem ser idealizadas devido ao

acoplamento de campos que normalmente não estão vinculados (DE ALMEIDA OLIVEIRA, 2013).

A viabilidade de um material para ser utilizado como atuador depende de diversos fatores, porém dois fatores são fundamentais: a densidade de energia (trabalho disponível por unidade de volume) e a frequência de atuação do material. Idealmente, se busca valores maiores para a primeira propriedade e a segunda é escolhida levando-se em conta a aplicação. A figura 2.1 expõe a densidade de energia para alguns materiais (LAGOUDAS, 2008).

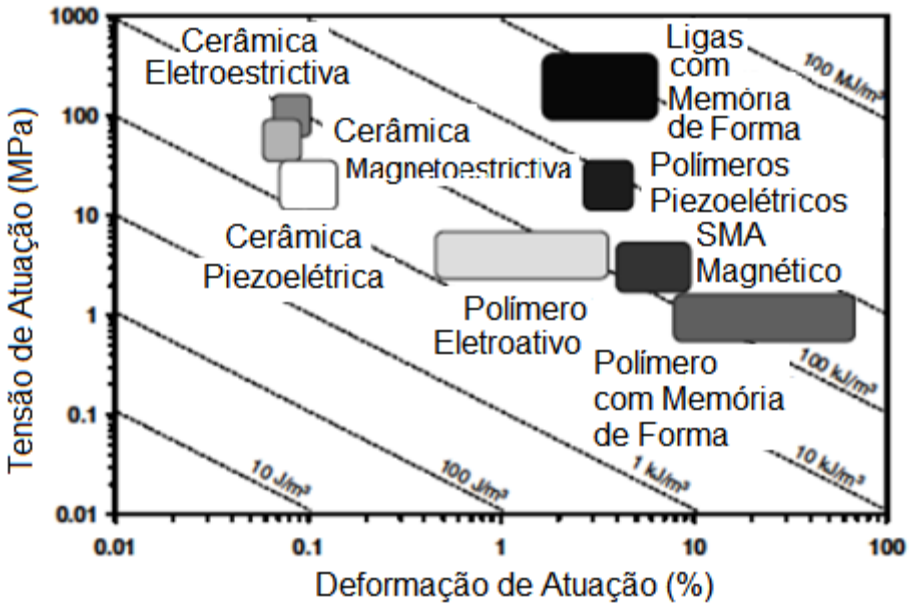


Figura 2.1 – Diagrama de Tensão de atuação e deformação de atuação (Adaptado de LAGOUDAS, 2008)

A frequência de atuação do material é exibida na figura 2.2, na qual se pode notar que para aplicações com baixas frequências de atuação, as ligas com memória de forma se tornam atrativas, uma vez que são capazes de imprimir mais energia específica quando comparada com outros materiais inteligentes. Por outro lado, para frequências com valores acima de 10 Hz as ligas com memória de forma não são capazes de fornecer atuação, porém outros materiais inteligentes conseguem trabalhar, já que necessitam de ciclos térmicos de

aquecimento e resfriamento para atuação e suas respostas são lentas, pois dependem da troca de calor com o meio.

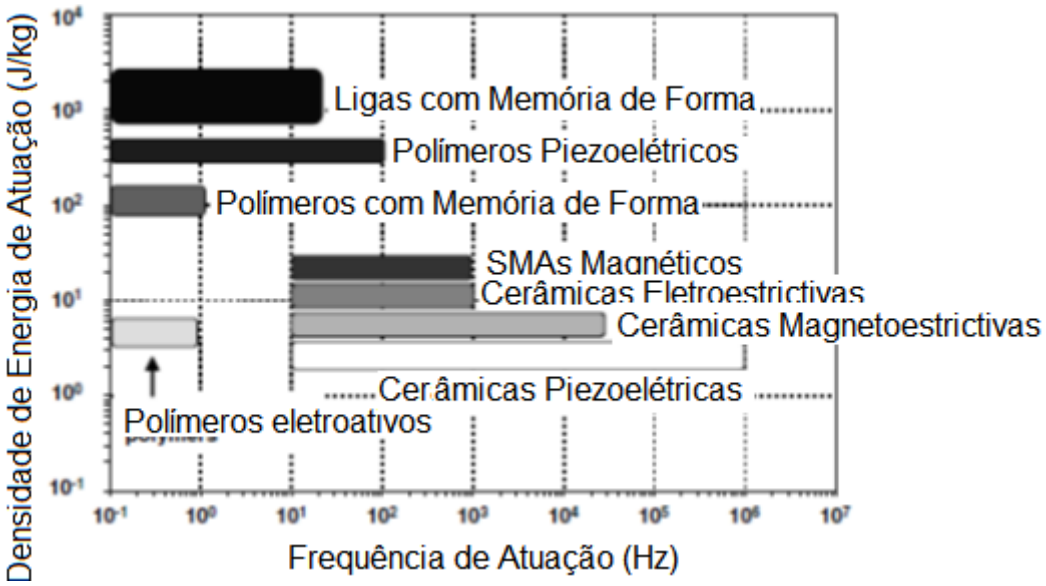


Figura 2.2 – Frequência de atuação (Adaptado de LAGOUDAS, 2008)

Do ponto de vista da miniaturização, um dos desafios da engenharia consiste em desenvolver mecanismos cada vez menores e mais leves. Nesse aspecto se torna importante desenvolver dispositivos que sejam cada vez mais capazes de imprimir uma relação melhor entre a potência desenvolvida e a massa, ou seja, mais potência para menor massa. A figura 2.3 associa a potência específica – energia desenvolvida dividida pela massa do atuador – à massa total do atuador, para atuadores convencionais e atuadores com ligas de memória de forma. Nesse paralelo, conclui-se que para atuadores com menor massa (com menos de 100 g), a liga com memória de forma é o material mais interessante a ser utilizado (IKUTA, 1990).

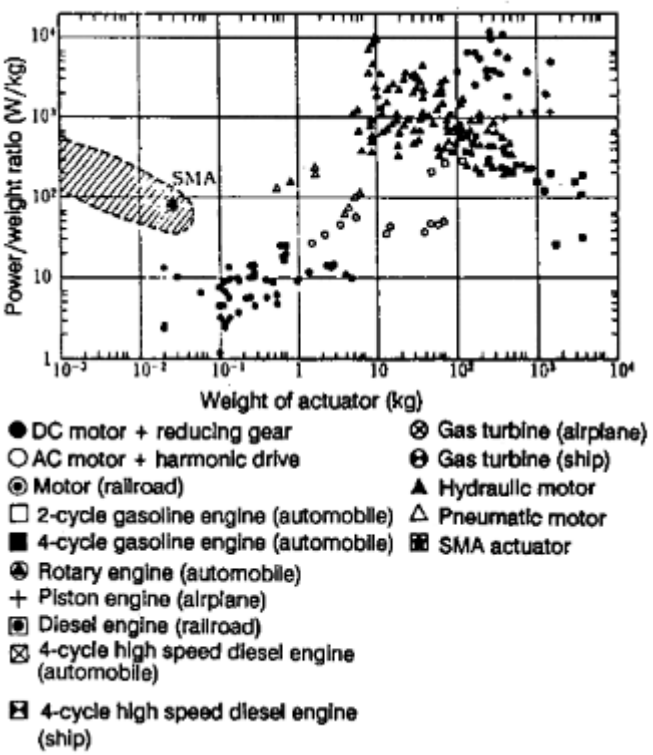


Figura 2.3 -Diagrama Potência/massa x massa de diferentes atuadores (IKUTA, 1990)

Atuadores SMA são vantajosos, pois além dos benefícios apresentados, são silenciosos, de fácil ativação e com pouco custo de energia para ativar, além de seu material ser biocompatível (ANDRIANESIS et al, 2010).

A tabela 2.1 relaciona algumas propriedades de atuadores SMA em relação a outros tipos de atuadores. Conforme exposto, é possível notar que a tensão mecânica produzida por esse tipo de atuador é muito alta em comparação aos outros, inclusive ao hidráulico, perdendo apenas para o músculo humano. Além disso, o trabalho específico é duas vezes maior que o segundo maior da tabela, o hidráulico, o que destaca outra vantagem do atuador. Uma desvantagem é o baixo valor de eficiência, porém o custo energético é pequeno, pois a energia necessária para aquecer até temperatura de austenitização é pequena, uma vez que é normal esses dispositivos possuírem massa com ordem de grandeza inferior a 1 quilograma.

Tabela 2.1 – Comparação entre atuação e performance de diferentes tipos de atuadores (Adaptado de Mohd Jani *et al*., 2014)

Tipo de Atuador	Tensão (Mpa)	Deformação (%)	Eficiência (%)	Frequência de atuação (Hz)	Trabalho por volume ($\frac{J}{cm^3}$)	Potência por Volume ($\frac{W}{cm^3}$)
NiTi SMA	200	10	50	3	10	30
Piezocerâmico	35	0,2	90	5000	0,035	175
Piezoelétrico	300	1,7	35	5800	2,55	15
Musculo Humano	0,007-0,8	1-100	90	2-173	0,035	0,35
Hidráulico	20	50	80	4	5	20
Pneumático	0,7	50	90	20	0,175	3,5

Apesar de apresentar um tempo de resposta baixo durante o aquecimento, é importante constatar uma grande limitação desse material para uso em atuadores: o resfriamento de forma adequada. Algumas soluções (i.e., convecção forçada e placa Peltier) são usadas para melhorar este tempo de resposta e, por consequência, diminuir essa desvantagem.

Ligas com memória de forma ferrosas e de cobre – como Mn-Si, Cu-Zn e Cu-Al-Ni – são mais baratas e disponíveis comercialmente, porém estas não são tão recomendadas, já que tais ligas apresentam características desvantajosas como menor repetitividade e baixa performance termomecânica. Portanto, ligas de NiTi são muito mais empregadas já que, além de boas propriedades mecânicas, possuem biocompatibilidade (MOHD JANI *et al*., 2014).

2.3 Geometrias básicas de atuadores SMA

A geometria dos atuadores SMA influencia no comportamento mecânico desse tipo de dispositivo. Desse modo, conforme se aumenta a razão entra a área de superfície e o volume do componente de memória de forma, maior é a frequência de resposta. Isso quer dizer que a razão citada é diretamente proporcional à frequência. Este comportamento é consequência da troca de calor, pois quanto menor a massa menor é a energia térmica necessária para variar a temperatura, assim como, quanto maior a área de superfície maior é a taxa de transferência de calor por convecção. Por este motivo, os materiais SMA, de uma forma geral, são mais empregados na forma de fios, vigas, molas ou tubos, em diferentes condições de carregamento (RAO, SRINIVASA & REDDY, 2015).

Em seguida estão representados na figura 2.4 os três modelos básicos de atuadores SMA. A figura 2.4 (a) mostra um atuador de uma direção para aplicações de uso único ou de baixos ciclos. Esses dispositivos podem ser empregados para desenvolvimentos de diferentes atuadores, como válvulas, dispositivos *self-healing*, dentre outros (DUERIG, 1990). Na Figura 2.4(a), vemos o dispositivo de memória convencional. O elemento com memória de forma na fase martensítica é submetido a um carregamento mecânico suficiente para que ocorra a conversão de martensita maclada para não maclada, resultando em uma deformação residual. Ao retirar o carregamento mecânico completamente, o elemento SMA tem uma pequena recuperação elástica, porém continua deformado devido à reorientação da fração volumétrica de martensita. Ao se aquecer até a temperatura suficiente (detalhes maiores na próxima seção) para que o material sofra uma transformação de fase para austenita, é possível recuperar deformação. Para que um novo ciclo de atuação aconteça, é necessário realizar um novo carregamento mecânico. (MOHD JANI *et al.,* 2014).

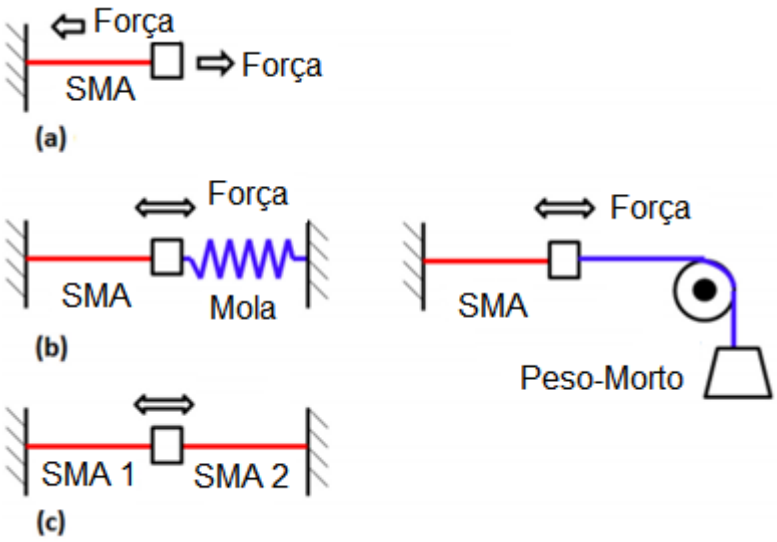


Figura 2.4 Modelos básicos de atuadores SMA (MOHDI JANI *et al*., 2016)

O modelo da figura 2.4 (b) é chamado de atuador *bias-force* e usa uma mola ou um peso morto para gerar uma força restauradora. Este atuador é usado quando se necessita de operações com mais de um ciclo (HUANG, 2002). Para se ter atuação em um elemento com memória de forma é necessário que este esteja deformado e seja aquecido até temperaturas de austenitização, dessa forma o material gera força para retornar a sua forma memorizada conferida durante o tratamento térmico. Porém, esse movimento só é efetuado em um sentido e, para que haja mais de um ciclo, se faz necessário o uso de uma força restauradora no sentido oposto. Essa força se faz presente durante todo o tempo, mas, quando dimensionado corretamente, só é suficiente para gerar movimento em temperaturas abaixo da de transformação para austenita. Para que isso ocorra é necessário fazer estudos, como o presente, que definam qual é a força ótima para cada aplicação.

O efeito descrito no parágrafo anterior é conhecido como Memória de Forma com Tensão Assistida (do inglês, *Stress Assisted Two Way Memory Effect* – SATWME) e se caracteriza por trabalhar com ciclos de aquecimento e resfriamento, sob uma tensão constante ou variável. Neste efeito temos, por

exemplo, um fio de memória de forma em seu estado de martensítico com variante não-maclada (deformado). Ao aquecê-lo a uma temperatura necessária e suficiente é possível transformá-lo para a fase austenítica e o mesmo recupera sua deformação. Nesta etapa, o fio de SMA puxa a mola ou o peso morto, a qual desenvolve uma força de resistência. No resfriamento, esta energia é liberada e atua como força restituidora no atuador, deformando assim o fio de SMA retornando à variante não-maclada, por ainda estar sofrendo um carregamento mecânico.

A Figura 2.4(c) mostra o mesmo princípio de funcionamento, mas agora, ao invés de uma mola ou peso morto como força restituidora, temos um elemento de SMA conectado ao outro trabalhando de modo antagônico. Nesse atuador, os dois fios atuam de forma alternada: enquanto se esquenta um, o outro é resfriado. Esse tipo de configuração é particularmente vantajoso por se manter o controle por temperatura nas duas direções de atuação (MOHDI JANI *et al.,* 2016).

A figura 2.5 (a) e (b) mostra a curva tensão versus deformação de atuador *bias-force* por mola e por peso, respectivamente. A linha vermelha mostra relação entre a tensão e a deformação para a fase austenítica, a linha azul demonstra essa mesma relação para a fase martensítica. Como pode ser visto, o elemento com memória de forma é deformado de X_1 até a posição X_2, durante a fase martensítica. Em seguida é aquecido até a temperatura final de transformação austenítica, assim, recuperando a deformação inicial empregada. Posteriormente ocorre o resfriamento e nessa etapa o atuador retorna à sua posição inicial, X_1, por ação da força restituidora. A diferença entre os dois casos é que, no atuador com mola, a tensão aplicada varia linearmente (Lei de Hooke) conforme a deformação e, no caso, com peso, a tensão exercida pelo peso se mantém constante durante todo o processo. A força máxima de atuação disponível corresponde ao estresse máximo atingido durante a fase austenítica e, apesar de haver variação da tensão durante a atuação no caso *bias-spring*, ele é preferido por ser mais compacto e mais leve que a configuração por peso (MOHDI JANI *et al*, 2016).

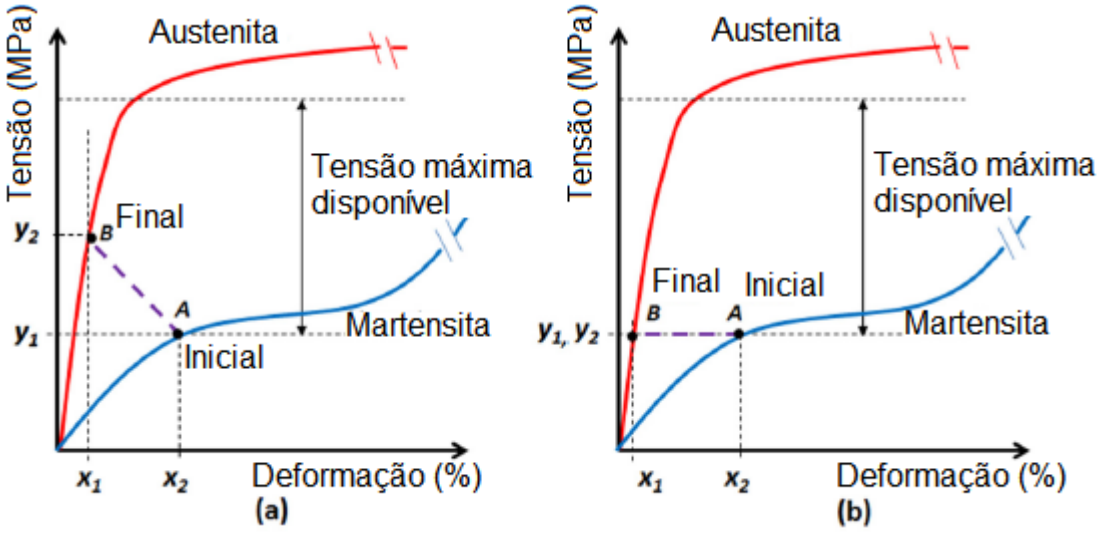


Figura 2.5. Atuador SMA com bias-force baseado em Butera *et al.*(2007) (a) *bias spring* (b) peso-morto (Adaptado de MOHDI JANI *et al*., 2016)

Atuadores de memória de forma possuem um grande potencial para aplicações tecnológicas. Dessa forma, o número de pesquisas referentes ao aludido material tem crescido nos últimos anos. A seguir serão apresentadas pesquisas que são pertinentes a esta dissertação, com o intuito de justificar e situar o atual desenvolvimento destas durante a confecção deste trabalho.

Monteiro et al. (2013) tiveram por objetivo verificar a influência da taxa de aquecimento em atuador SMA *bias*-spring. Para isto foi usado um modelo experimental que conecta uma mola linear a um fio de SMA (o aparato experimental é ilustrado na figura 2.6). O deslocamento é aferido através de um relógio comparador, a temperatura através de uma câmera termográfica e a força com uma célula de carga. O esquema de atuação térmica é representado na figura 2.7.

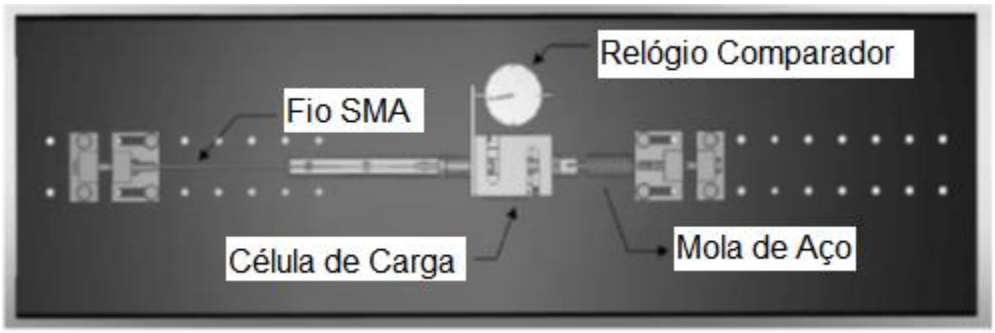


Figura 2.6 – Aparato experimental (MONTEIRO *et al*., 2013)

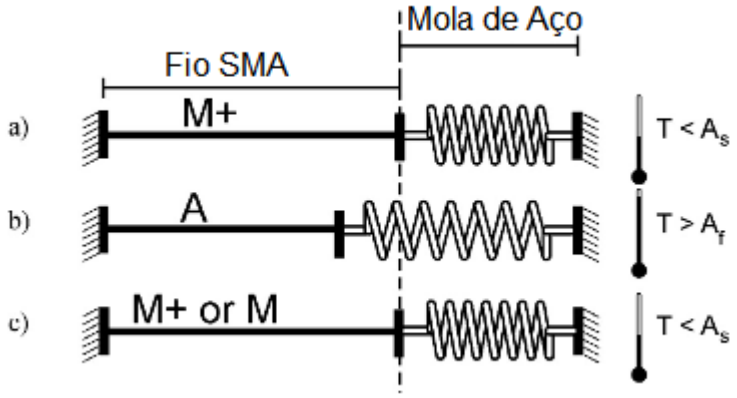


Figura 2.7 – Esquema do teste experimental (Adaptado de Monteiro *et al*, 2013)

Nessa pesquisa foram executados testes com seis taxas de aquecimento, com conclusões relevantes aferidas. Foi observado, por exemplo, que o atuador possui uma taxa de aquecimento ótima – a qual maximiza o deslocamento do atuador, porém perdendo um pouco da força de atuação – de 65ºC/min. Isso configura um valor intermediário entre as taxas de aquecimento utilizadas (2,9ºC/min, 34,9ºC/min, 83.5ºC/min,157,3ºC/min, 278,1ºC/min e 383,1ºC/min). Para taxas de aquecimento maiores que 100ºC/min observou-se um aumento da força de atuação e perda de deslocamento.

Jani *et al. (*2015) estudaram um atuador linear com o objetivo de desenvolver um modelo numérico para prever o comportamento termomecânico

de atuadores SMA lineares. Portanto, foi feita uma análise experimental que é usada para calibrar um modelo numérico baseado no modelo constitutivo de Liang e Rogers. Além disso é são levadas em consideração as energias correspondentes à transferência de calor e às energias referentes aos carregamentos mecânicos para desenvolver o modelo de transferência de calor que prevê os tempos de ativação e desativação desses atuadores.

O aparato experimental constitui um de sistema de aquisição de dados com célula de carga, cabo *Bowden* para atuar o fio, forno para o aquecimento, termopar, *cooler* (para convecção forçada e resfriar mais rápido) e fio SMA. A figura 2.8 apresenta este aparato.

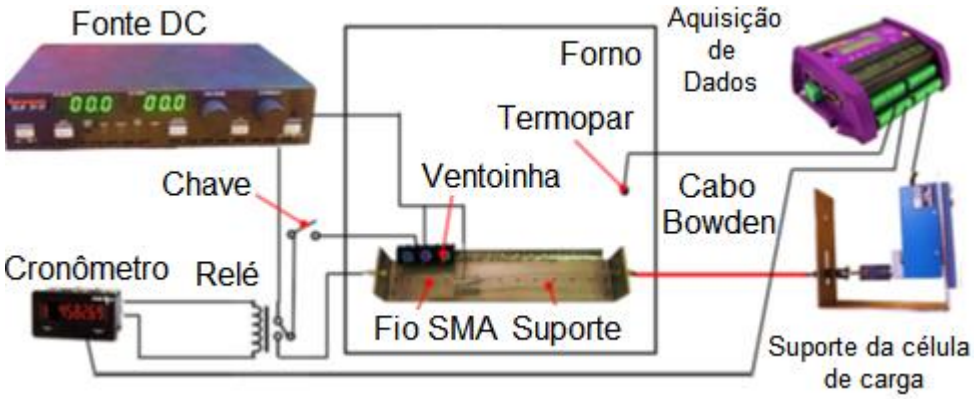


Figura 2.8 – Configuração Experimental (Adaptado de MOHDI JANI et al., 2015)

Foram feitos dois experimentos distintos, primeiro empregaram-se três pré-tensões diferentes, com o aquecimento feito dentro do forno, onde a temperatura inicial foi de 20ºC e, em seguida, aquecido até 100ºC para cada uma das pré-tensões diferentes.

O segundo experimento estudou três pré-tensões diferentes, com aquecimento por efeito Joule. Nesse caso o fim do aquecimento não foi controlado pela temperatura, mas sim pela contração, ou seja, o aquecimento foi encerrado quando a deformação se estabilizava. O resfriamento foi realizado por

convecção forçada até o equilíbrio termodinâmico entre os componentes do aparato.

A pesquisa obteve resultados compatíveis entre as análises numéricas empregadas e o experimento montado para este modelo de atuador linear. Isto posto, o modelo de transferência de calor de uma dimensão sugerido no estudo foi considerado capaz de uma estimar o tempo de ativação dos atuadores estudados. Também foi concluído que para melhor performance e durabilidade, é necessário levar em conta a pré-tensão e os efeitos do calor de transformação de fase para prevenir danos (superaquecimento).

Dhakal *et al.* (2016) objetivaram validar, através de um aparato experimental, o modelo numérico tridimensional desenvolvido por Saleb *et al*. (2011). Este modelo numérico visa descrever, numericamente, diversos comportamentos de ligas com memória de forma descritos na literatura. Para isto, são usados diferentes mecanismos inelásticos que organizam a troca de energia entre a armazenada e a dissipada durante a deformação. Os modelos matemáticos empregados são descritos em Saleb et al. (2011). Deste modo, foi implementado no ABAQUS uma rotina UMAT para simular este modelo.

O aparato experimental é exposto na figura 2.9 e os ensaios experimentais se deram em dois casos diferentes. O primeiro por uma mola SMA ligada a uma célula de torque para medi-lo durante a atuação quando a mola SMA tem seu movimento restringido. No segundo caso, uma mola foi montada a um *encoder* rotativo para medir o grau de rotação produzido por esta quando a mesma se encontrava livre para girar.

O comportamento encontrado no modelo experimental foi bem próximo ao previsto pelo modelo numérico, apesar de alguns desvios observados a partir de dez ciclos.

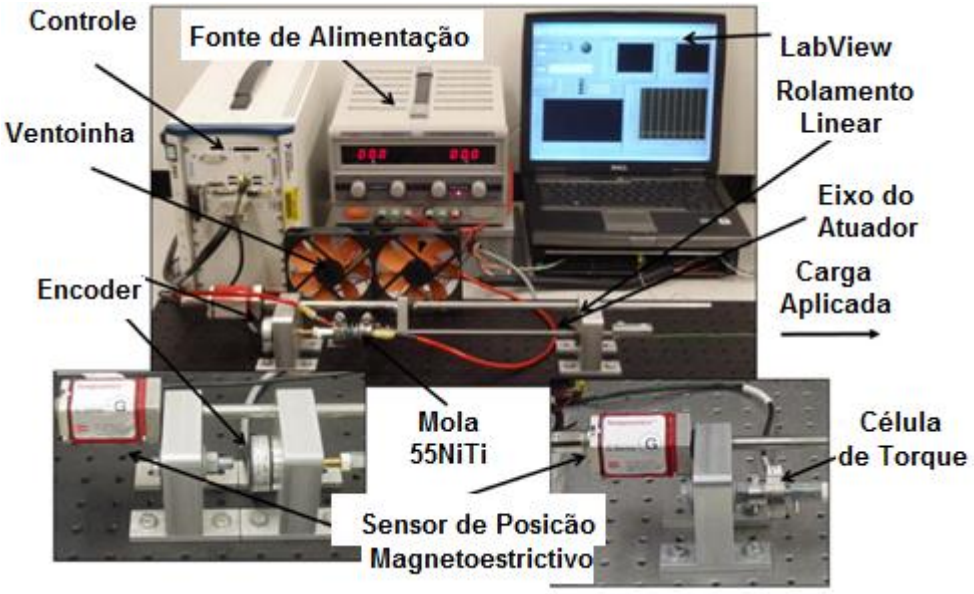


Figura 2.9 – Aparato experimental (Adaptado de DHAKAL, B. *et al*, 2016)

Lambert *et al.* (2017) estudaram o comportamento de um atuador linear SMA com sistema de controle em sistemas mecânicos complexos para verificar os benefícios e limitações deste tipo de atuador. O controle de posição é feito passando uma corrente elétrica e um sensor de posição na esfera ligado a um sistema de controle desenvolvido no trabalho. Assim, foi montado o aparato experimental apresentado na figura 2.10. Os dados obtidos pelo experimento foram confrontados com simulações numéricas que, por sua vez, levaram em consideração análises dinâmicas aliadas a um modelo constitutivo desenvolvido no artigo.

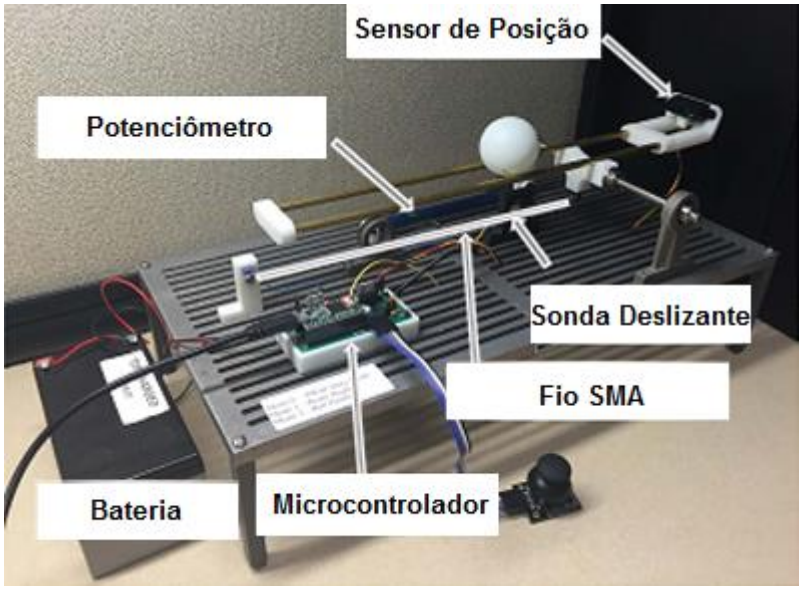


Figura 2.10 – Modelo experimental da bola na viga (Adaptado de LAMBERT *et al.*, 2017)

O modelo numérico apresentou respostas compatíveis com os casos experimentais quando a esfera começa a entrar em equilíbrio e mostra que fios SMA podem ser usados para criar sistemas de controle bastante precisos para frequências na faixa de 0,2 Hz a 10 Hz.

Em Monteiro et al. (2017) e De Paiva (2017) estudou numericamente, através da análise de elementos finitos, diferentes configurações de atuadores SMA. Para isto, foi implementada uma sub-rotina UMAT (do inglês, *User Material Routine*) dentro do programa ABAQUS.

Dessarte, os parâmetros referentes às propriedades do material usado foram determinados por Monteiro (2013). As configurações estudadas foram: fio de SMA; fio de SMA conectado a uma mola elástica linear; duas molas elásticas lineares conectadas a um fio de SMA; e dois fios de SMA conectados a uma mola elástica linear.

Oliveira *et al.* (2018) produziram um artigo sobre um projeto de atuador com liga de memória de forma onde o foco foi estudar um dispositivo de medição para a caracterização de uma mola de SMA em conjunto com o controlador fuzzy

para posição e força. Este dispositivo torna possível desenvolver um mecanismo para aplicações robóticas com velocidade de atuação lenta como, por exemplo, imitar um dedo robótico.

Leal *et al.* (2018) investigaram três mecanismos com SMA para gerar torque que poderiam ser usados em *flap* de avião. Os dispositivos consistem em um fio de SMA com uma mola linear em três configurações: concorrente, colinear e em paralelo ligados a uma polia. Nesse artigo, as três configurações são modeladas, otimizadas e verificadas experimentalmente. Além disso, foi empregado um modelo constitutivo com descrição termomecânica do material.

Resumidamente, conclui-se que todas as configurações são capazes de obter significativas deflexões, porém a concorrente foi a que atingiu maiores deflexões com maior eficiência energética. No entanto, para deflexões pequenas, tanto a concorrente como a colinear possuem custo de energia semelhante.

As pesquisas expostas servem para evidenciar o esforço feito para caracterizar de forma o comportamento termomecânico dos diferentes tipos de atuadores com ligas de memória de forma.

3. Fundamentação Teórica

Após uma breve revisão a respeito dos atuadores lineares convencionais e dos com ligas de memória de forma, será abordado neste capítulo a fundamentação teórica dos materiais com memória de forma.

Muitas ligas metálicas diferentes possuem o fenômeno da memória de forma, como as de cobre-alumínio-níquel, cobre-zinco-alumínio e ferro-manganês-silício (BORDEN, 1991). Porém, a liga de memória de forma mais empregada comercialmente é a conhecida como Nitinol, que abrevia “Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory”, e foi descoberta em 1961 por Willian J. Buehler. Desde então, as pesquisas relacionadas a esta liga aumentaram muito, buscando investigar os efeitos de sua composição e de sua microestrutura, difundindo seu uso em diversos campos da ciência, engenharia e indústria (RIAGUSOFF, 2012).

As ligas com memória de forma pertencem um grupo de materiais que podem retornar à sua forma inicial, geometria ou tamanho. Isso acontece quando a liga é submetida a um processo de memorização entre suas duas fases (martensítica e austenítica). Este processo é dependente de uma variação de temperatura ou do campo magnético (MOHD JANI *et al*., 2014). A fase martensítica apresenta duas variantes, a martensita maclada e a não-maclada. A primeira variante se apresenta no estado livre de tensões e temperatura abaixo de A_S, já a segunda variante é induzida por tensão, esta tensão depende da temperatura que é maior conforme aumenta-se a temperatura.

Nesse contexto, a mudança de fases é o fator responsável por essa propriedade especial de tais ligas. São transformações adifusionais de fases sólidas que ocorrem em velocidades muito altas. Essas transformações possuem diferenças na sua estrutura cristalina, isso é explicado pela diferença entre a energia livre das duas estruturas constituintes (PAIVA *et al*., 2003).

3.1 Transformação de fase devido à temperatura

Ligas com memória de forma, como mencionado anteriormente, podem mudar de fase quando submetidas a um carregamento térmico. A Figura 11 mostra o gráfico deformação *versus* temperatura no estado livre de tensões. O gráfico apresenta três regiões distintas: duas lineares, que representam a expansão térmica das fases austeníticas e martensíticas (B-C e D-A) e uma região compreendia entre as curvas, o laço de histerese, que está relacionada à mudança de fase. A área do laço de histerese representa a energia dissipada no ciclo.

O processo é explicado da seguinte forma: em altas temperaturas (acima de A_F), a liga SMA possui estrutura austenítica. Quando se reduz a temperatura, a liga se transforma para a estrutura martensítica, onde começa a se transformar em M_S até M_F. Conforme há o aumento da temperatura, o processo inverso ocorre, ou seja, se transforma de martensita para austenita, começando em A_S e terminando em A_F (PAIVA, 2004). Esse fenômeno é ilustrado na Figura 3.1.

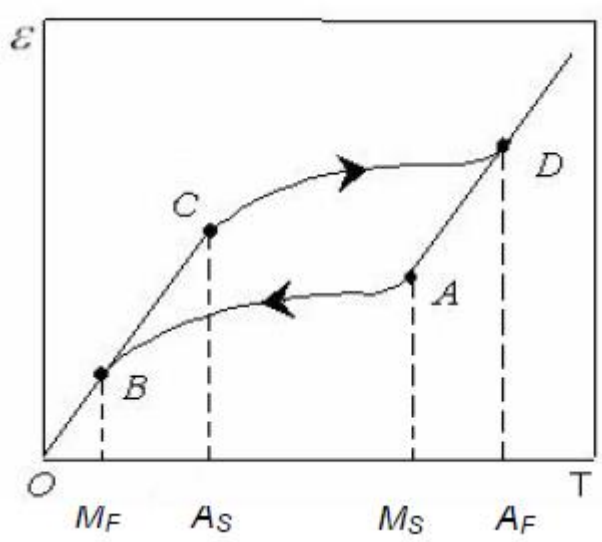


Figura 3.1 – Fenômeno da transformação de fase devido à temperatura (PAIVA, 2004)

As temperaturas de transformação de fase podem ser monitoradas através de ensaio DSC. A figura 3.2 mostra o resultado de um ensaio DSC de amostra SMA analisada por Shaw & Kyriakides (1995). Trata-se de um gráfico de taxa de calor fornecido *versus* temperatura da amostra, onde o material é aquecido de 70°C negativos até 100°C positivos, nele A_S ocorre em 29,5 °C e A_F em 62 ºC. O pico de energia representa uma transição endotérmica para a fase austenítica, a área abaixo desse pico representa o calor latente da transformação martensítica. A análise inversa pode ser feita para o calor latente durante o resfriamento, ou seja, a transformação martensita em austenita por temperatura, assim, Ms verifica-se em -1 °C e Mf em -70°C. O gráfico da figura 3.2 ainda apresenta a transformação para uma fase intermediária R que, assim como a martensítica, é endotérmica e transcorre de 54ºC até 32ºC (SHAW & KYRIAKIDES, 1995).

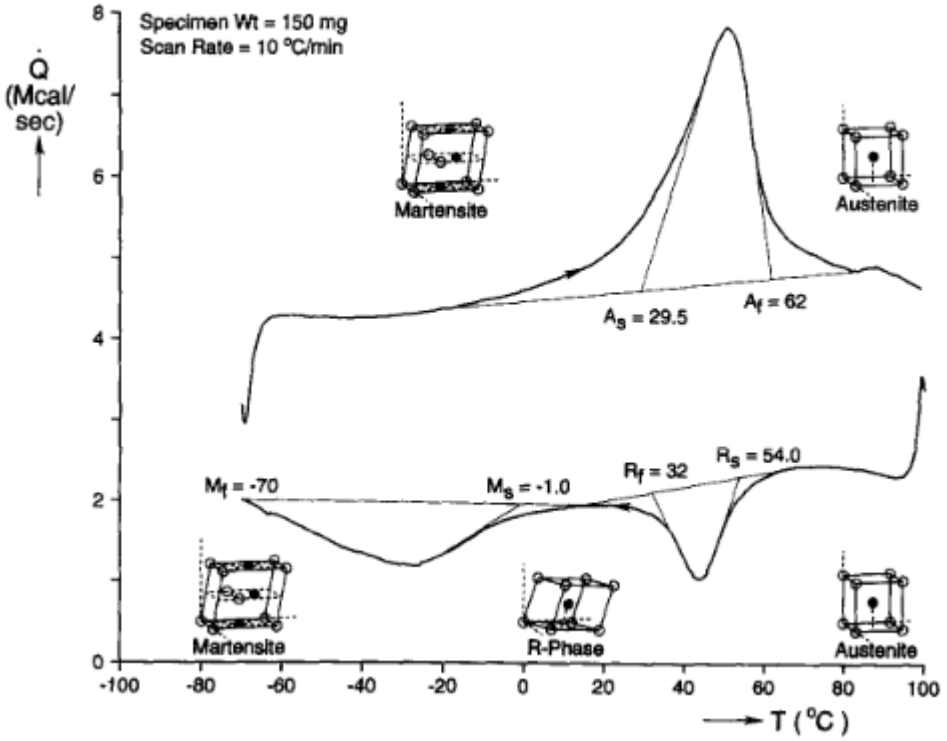


Figura 3.2 – DSC para NiTi (SHAW & KYRIAKIDES, 1995)

3.2 Efeito Pseudoelástico

Esse efeito ocorre quando o material está acima da temperatura A_F, onde, nesse caso, a liga está austenitizada. No efeito pseudoelástico, para temperatura constante e acima de A_F, a aplicação de um carregamento mecânico gera um comportamento elástico até uma tensão crítica. A partir desse ponto começa a transformação de fase induzida por tensão. Desse modo, a austenita se transforma em martensita com variante não-maclada. Ao descarregar, há novamente transformação de fase, dessa vez da martensita não-maclada para austenita e, assim, recupera a deformação submetida ao material (PAIVA, 2004). Todo processo é representado no gráfico da figura 3.3.

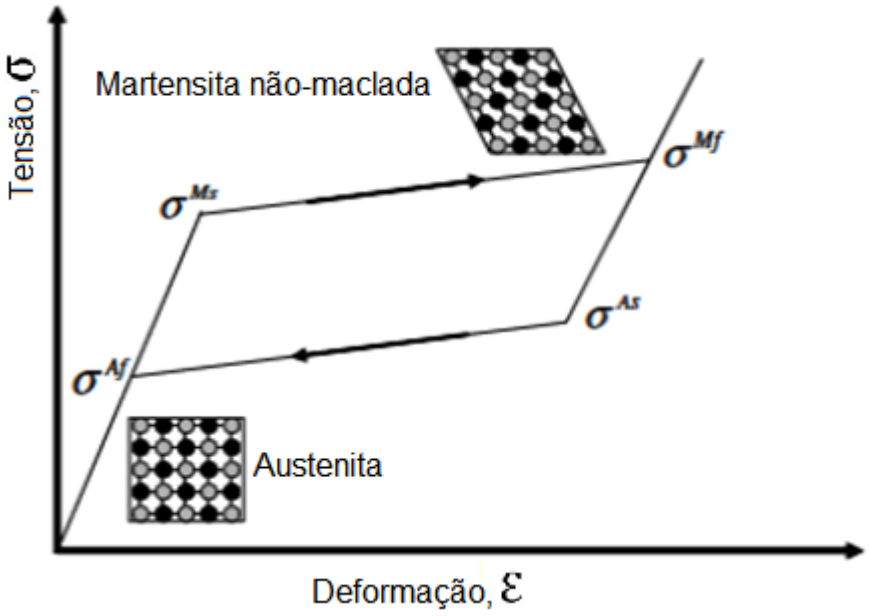


Figura 3.3 – Efeito pseudoelástico (Adaptado de LAGOUDAS, 2008)

3.3 Efeito de memória de forma

Ao carregar mecanicamente uma amostra em temperatura abaixo da M_F, tem-se, primeiramente, uma resposta elástica até uma tensão crítica. A partir desta, inicia-se uma reorientação da martensita. A variante presente até então

era a maclada (induzida por temperatura) e, após o carregamento, é obtido a variante não-maclada. Durante a reorientação, a tensão não varia muito em relação à deformação. Após essa nova reorientação, a liga volta a apresentar um comportamento elástico (PAIVA, 2004).

Desse modo, para voltar à forma original, é necessário que seja feito o descarregamento da amostra seguida de aquecimento até a temperatura de austenitização. Quando resfriada, o material muda de fase, retornando, assim, à fase martensítica induzida por temperatura – maclada (BANDEIRA, 2005).

A figura 3.4 demonstra esse comportamento. Do ponto A ao B há a representação da linha onde há formação da martensita induzida por tensão, já o ponto B sinaliza o fim da transformação dessa variante. Do ponto B ao ponto C tem-se a representação do descarregamento e pequena recuperação da deformação, já do ponto C até o ponto O ocorre o aquecimento e subsequente recuperação da forma inicial.

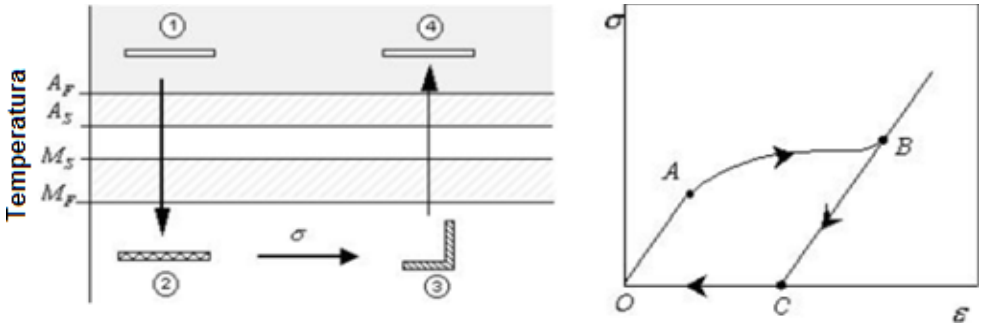


Figura 3.4 – Efeito memória de forma (SME) e sua curva tensão-deformação (PAIVA & SAVI, 2006)

3.4 Efeito de memória de forma reversível através de treinamentos Termomecânicos

Quando o efeito memória de forma se manifesta apenas durante o aquecimento, dizemos tratar-se de memória de forma não reversível SME (*One-Way Shape Memory Effect*) – o efeito demonstrado na seção anterior a esta. Não

obstante, se este mesmo efeito se manifestar também durante o resfriamento, o mesmo passa a chamar-se efeito de memória de forma reversível (*Two-Way Shape Memory Effect*) (LAGOUDAS, 2008).

Esse efeito é obtido através de um treinamento prévio que permite associar a cada fase uma forma diferente. Esta característica pode ser obtida de duas maneiras diferentes, pelo denominado ciclos de SME *(Shape Memory Effect Cycling*) e pelo treinamento através de ciclos pseudoelásticos (*Stress-Induced Martensite Training*) (PAIVA, 2004).

A principal vantagem em usar o TWSME é que, por lembrar a forma tanto em baixas quanto em altas temperaturas, não é necessário o emprego de uma força restauradora, pois, ao resfriar, o elemento com memória de forma gera movimento ou força de atuação para retornar a forma memorizada durante a fase de baixa temperatura, similar à temperatura acima de A_F. A explicação mais aceita em relação a este fenômeno é que a preferência de orientação das variantes martensíticas são criadas pela existência de campo de tensão internas ou da existência de martensitas retidas acima de A_F (WADA & LIU, 2008).

Similar a esse efeito, há o efeito de memória de forma com tensão assistida. Assim como o anterior, é ativado por aquecimento e resfriamento, porém sob a influência de uma força restituidora que é responsável pela nucleação e crescimento da martensita durante o resfriamento (WADA &LIU, 2008). Esse efeito é explorado experimentalmente por Wada e Liu (2008; 2005).

3.5 Efeito de memória de forma com Tensão Assistida

Uma forma interessante de se obter o efeito de atuação somente através de carregamentos térmicos pode ser alcançada através do efeito de memória de forma com tensão assistida. Este método não necessita da realização de complexos treinamentos termomecânicos mencionados na seção 3.4 (LAGOUDAS, 2008). A Figura 3.5 apresenta diagramas esquemáticos de atuadores com tensão assistida. Esses dispositivos podem ser montados

utilizando um elemento SMA que pode ser acoplado a uma mola de material convencional (atuador *bias-force*), a um peso morto ou com atuação antagônica, acoplado a outro elemento SMA. Para estas configurações, o elemento SMA já pré-deformado (na fase martensítica com variante não maclada) ao sofrer um aquecimento, volta a fase austenítica e recupera a deformação inicial (dependendo das condições de temperatura e tensão), porém agora com presença de tensão mecânica no sistema. No resfriamento, esta energia mecânica é liberada e atua como força restituidora no atuador, que promove o retorno para a fase martensítica com variante não maclada, resultando na deformação do elemento SMA novamente (DUERIG, 1990, HUANG, 2002; MOHD JANI *et al.,* 2014).

Dentre estas formas de atuadores com tensão assistida, a mais usual combina elementos SMA e molas convencionais. A constante elástica da mola é fundamental no processo de atuação e, portanto, determinante na performance do mesmo. Os detalhes de carregamentos termomecânicos com diferentes constantes elásticas de mola convencional serão abordados neste trabalho.

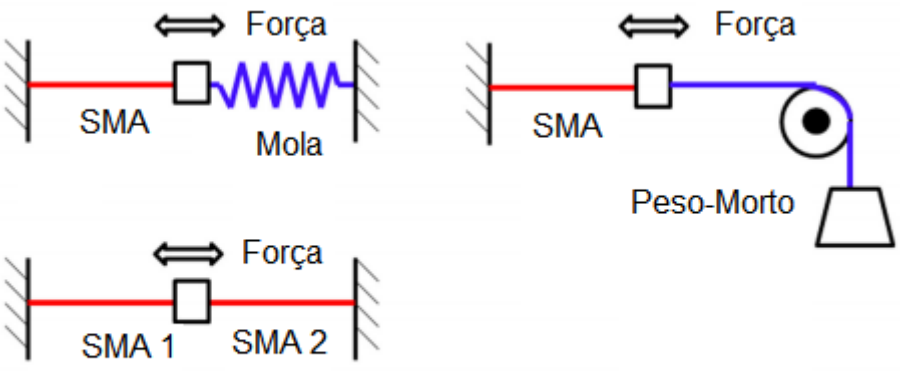


Figura 3.5: Modelos básicos de atuadores SMA (Adaptado de MOHDI JANI *et al*., 2016)

4. Metodologia Experimental

Com o objetivo de se estudar experimentalmente o comportamento termomecânico de atuadores lineares SMA *bias-spring,* um aparato experimental é desenvolvido e diversos ensaios de atuação foram realizados, além disso é feita a caracterização do elemento SMA utilizado. Desta maneira, este capítulo se destina a descrever os materiais utilizados, os ensaios de caracterização termomecânica, o aparato experimental para o atuador SMA *bias-spring*, a instrumentação científica e a metodologia empregada neste trabalho e tipos de análises realizadas, de modo que os resultados obtidos possam servir como guia para futuro dimensionamento dessa classe de arranjo.

4.1 Fio de Liga com Memória de Forma

O fio SMA empregado para os arranjos experimentais é o FLEXINOL® *Actuator Wire*, fabricado por DYNALLOY, inc. O fio possui diâmetro de 0,015'' ou 0,381 mm. Do site do fabricante podem ser retirados alguns dados importantes (http://www.dynalloy.com/), entre eles o coeficiente de Poisson de 0,33, a resistividade elétrica 80 μΩ*cm para a martensita e 100 μΩ*cm para a austenita. De acordo com o fabricante, a composição química deste fio é de 50% de Nickel e 50% de Titânio.

A transformação de martensita para austenita é endotérmica e a inversa exotérmica. Assim, é possível determinar as temperaturas de transformação de fase livre tensão com o auxílio de um equipamento que detecte as temperaturas onde há absorção ou liberação deste calor latente (LAGOUDAS, 2008). Deste modo, para caracterizar essas temperaturas, é empregado um calorímetro de varredura (DSC, Differential Scanning Calorimeter) presente no laboratório MECANON da UFRJ. O resultado é apresentado na Figura 4.1.

Pelo ensaio DSC do fio (Figura 4.1), é identificado que a temperatura de início da transformação austenítica ocorre em 65,52 ºC e é finalizada em 85,32ºC. Já a transformação martensítica realiza-se de 42,9 ºC a 21,02 ºC.

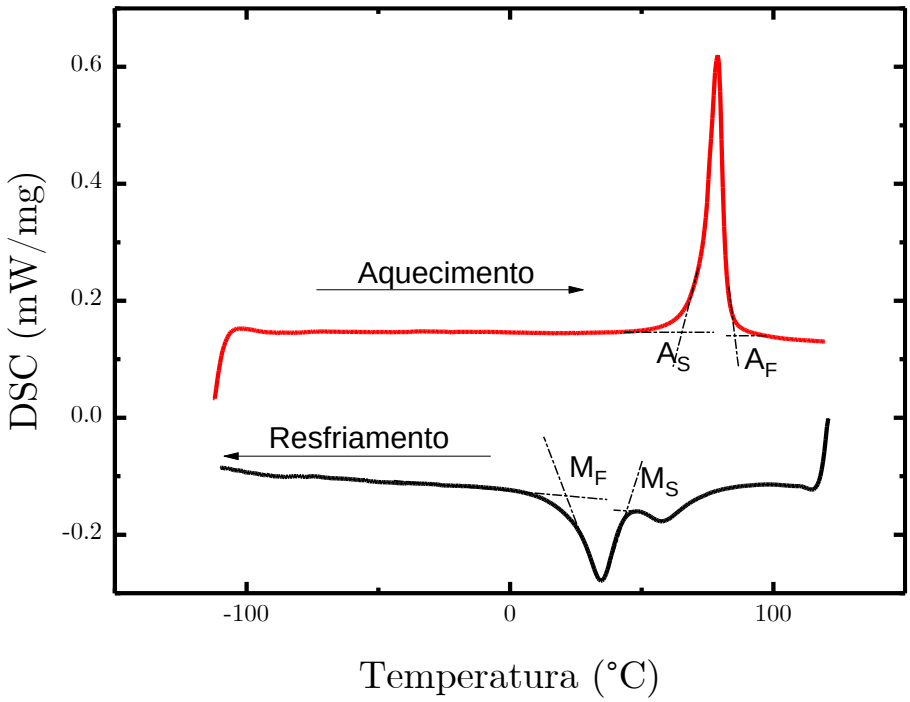
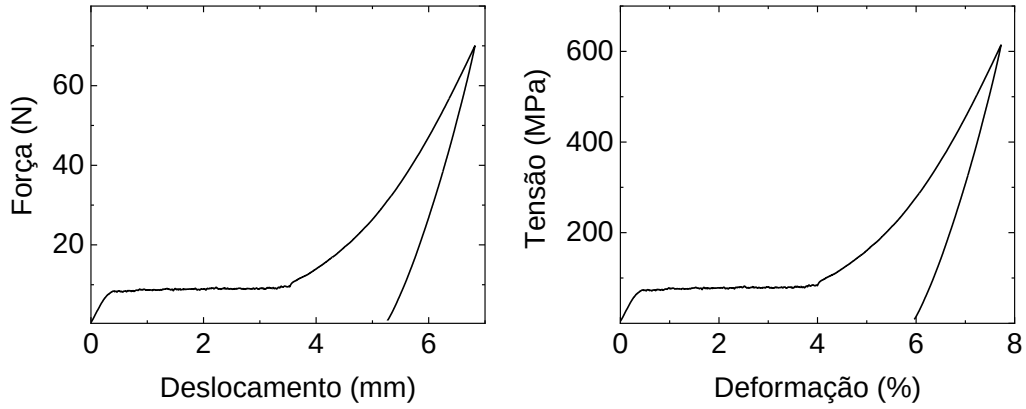


Figura 4.1 – Ensaio DSC feito no MECANON

A caracterização mecânica do fio é feita através de uma máquina universal de ensaio do fabricante Instron e modelo 5966. Assim, o ensaio de tração é realizado com uma amostra de SMA com 88,5 mm na temperatura ambiente de 22°C, taxa de deformação de 1%/min. A Figura 4.2 (a) mostra os resultados força versus deslocamento e a Figura 4.2 (b) mostra os resultados tensão versus deformação.

Pode-se ver que há um patamar de transformação definido de forma clara: se encerra 82 MPa ou 9,5 N para uma deformação de 4% e se inicia por volta de 73 MPa ou 8,4N com 0,45% de deformação.



(a) (b)

Figura 4.2 – Ensaio de Tração (a) Força x Deslocamento (b) Deformação x Tensão

4.2 Molas Lineares

Para os testes são usadas seis molas de aço com diferentes valores de rigidez. Os ensaios para caracterizar as constantes elásticas das molas foram executados na Instron (MODELO), no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES). Os resultados dos ensaios de tração são apresentados na Figura 4.3 e seus valores de rigidez são extraídos desse gráfico e registrados na Tabela 4.1.

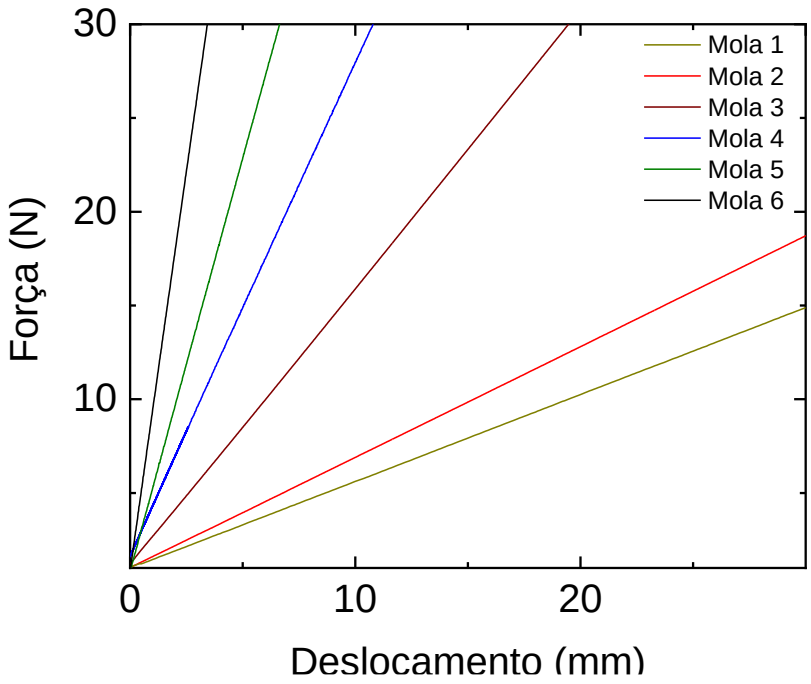


Figura 4.3 – Ensaio de tração: Força *versus* deslocamento para cada mola de aço.

Tabela 4.1 – Rigidez para as molas de aço.

Mola	Rigidez (N/m)
1	591
2	928
3	1496
4	2560
5	4430
6	8670

4.3 Aparato experimental

Os ensaios são realizados no Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes (LASEI), localizado no CEFET/RJ. Uma bancada de ensaios experimentais é elaborada, onde é possível realizar a montagem de um sistema de atuação *bias spring*. Essa bancada permite que a deformação do fio SMA seja feita de forma gradual e controlada a fim de não ultrapassar os limites de escoamento do fio de SMA. Além disso, é possível a utilização de molas com diferentes valores de rigidez, comprimentos e diâmetros variados, possibilitando o estudo de diferentes configurações fio-mola. A Figura 4.4 apresenta o diagrama esquemático em 3D, feito no software SolidWorks 2016. A bancada real, utilizada em laboratório pode ser vista na Figura 4.5.

Na Figura 4.4 pode-se ver um suporte que desliza com atrito desprezível em cima de um trilho. Neste mesmo suporte coloca-se uma célula de carga e um transdutor para medir deslocamentos lineares, além disso, o suporte acopla o fio SMA com a mola de aço. A mola encontra-se acoplada a um anteparo fixo e o fio SMA a outro anteparo. O anteparo do elemento com memória de forma é fixado a um fuso que é empregado para controlar a pré-deformação de cada ensaio.

O aquecimento do elemento de SMA é efetuado através de uma fonte geradora de corrente elétrica, do modelo TOE 8951. A tensão mecânica pode ser gerada por uma força restituidora (mola), por peso livre, por outro elemento com memória de forma (atuador antagônico) etc.

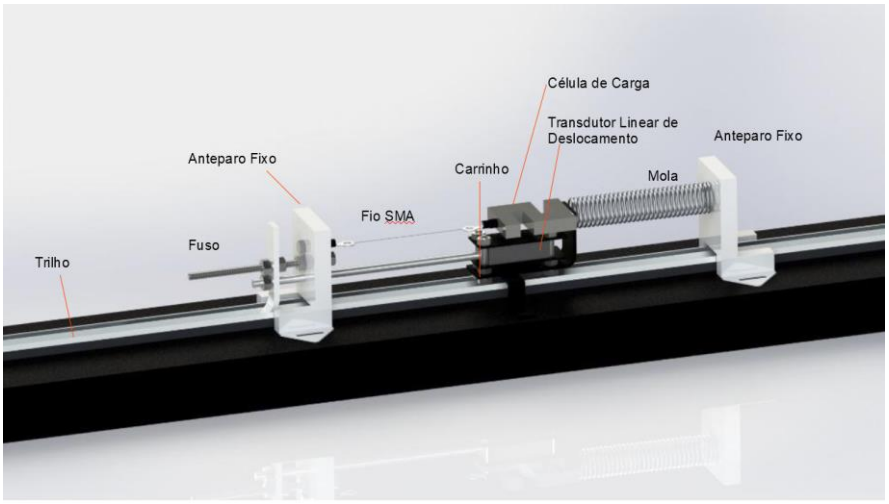


Figura 4.4 – Aparato Experimental.

A figura 4.5 exibe uma montagem padrão de um ensaio com o atuador SMA. Os equipamentos apresentados nesta imagem são descritos em seguida. Fixado ao TIP31C há um dissipador de calor, empregado para que este não queime, já que esse transistor gera muita energia térmica durante sua operação.

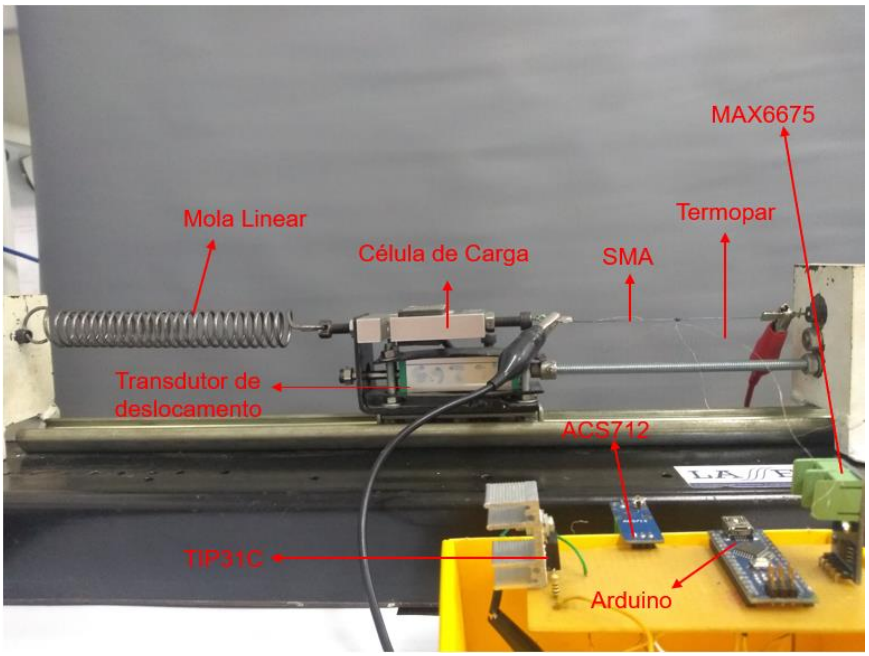


Figura 4.5 – Aparato Experimental

4.4 Instrumentação Científica

Dois sistemas de aquisição de dados foram adotados nesta pesquisa, o primeiro é o HMB-Spider 8 e é encarregado de aquisitar os dados referentes à força e ao deslocamento. Porém, este equipamento não é suficiente para realizar a medição da corrente elétrica empregada para aquecer o elemento SMA via efeito Joule, pois há risco de dano elétrico, já que para mensurar corretamente a corrente elétrica, o sensor e o elemento com memória de forma devem estar ligados em série no circuito elétrico. Esse mesmo risco existe para aferir a temperatura.

O segundo equipamento selecionado é o microcontrolador Arduino. Pois possui um módulo para leitura da corrente elétrica que não oferece risco ao *chip* e um módulo de leitura para termopar com junta fria e impedância elétrica altíssima, de forma a impedir a passagem de corrente elétrica para o *chip*.

A leitura da força é feita na célula de carga do fabricante Alfa instrumentos, modelo SV-20 e capacidade de 20 kgf, que é um transdutor responsável por transformar força em um sinal elétrico proporcional. Isto é feito através de *strain gage,* um sensor que varia a resistência elétrica proporcionalmente à deformação. Normalmente são empregados quatro *strain gages* entre si conforme a ponte de Wheatstone (Figura 4.6). A ponte de Wheatstone é um esquema de montagem de elementos elétricos que permite a medição do valor de uma resistência elétrica desconhecida e, através dessa medição, se obtém o valor da força aplicada.

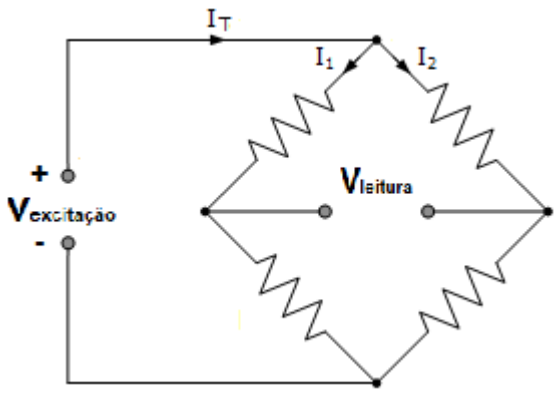


Figura 4.6 – Ponte de Wheatstone

Para medir o deslocamento do fio é utilizado um sensor de deslocamento fixado ao carrinho que liga o fio de SMA à mola linear. Assim como a célula de carga, o transdutor linear de posição converte uma grandeza física em sinal elétrico, nesse caso, o deslocamento.

O transdutor linear empregado é semelhante a um potenciômetro linear. Neste caso, aplica-se um diferencial elétrico conhecido (5V) e constante no sensor. O circuito interno é fechado em um ponto diferente conforme a haste do transdutor se move. Deste jeito, a resistência elétrica varia linearmente com o deslocamento, alterando a queda de potencial aferida. A Figura 4.7 (a) apresenta a esquematização do circuito, já a Figura 4.7 (b) exibe o sensor. Assim como na célula de carga, é feita uma calibração digital para converter os valores de voltagem em deslocamento, desta vez usando o paquímetro como referência para as medidas. O modelo a ser utilizado é o PY-1-F-025-S01M, da fabricante GEFRAN, com fundo de escala limitado pelo sistema de aquisição de dados.

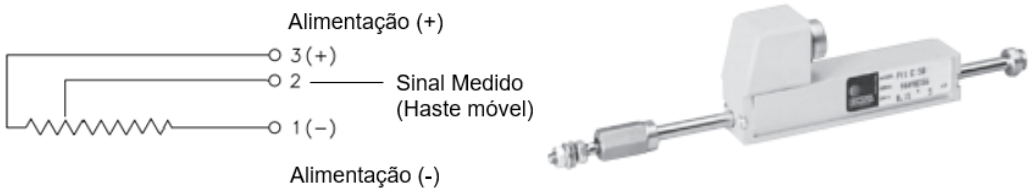


Figura 4.7 – Transdutor Linear de Posição (a) Esquema elétrico (Modificado do manual do fabricante) (b) Representação (Manual).

Para medir corretamente a corrente elétrica que passa pelo fio com memória de forma é necessário que o sensor esteja ligado em série com o fio e não interfira na corrente elétrica do circuito após sua medida. No caso desse aparato foi escolhido o sensor ACS712 (5A), que é um sensor de corrente através do Efeito Hall. Resumidamente, a corrente elétrica passa por esse sensor e gera uma perturbação no campo magnético onde há um circuito integrado Hall (esse é o componente responsável por medir o campo magnético) que devolve um valor de tensão elétrica proporcional a esta perturbação que, em

seguida, é lido pelo Arduino e convertido para corrente elétrica através de um código computacional.

A corrente elétrica é gerada por uma fonte de alimentação que fornece uma corrente contínua controlada. A fonte é do fabricante TOELLNER, modelo TOE8951. Porém, como um dos objetivos do presente trabalho é estudar a influência da taxa de aquecimento no comportamento dos atuadores utilizados, foi montado um circuito elétrico para tal, uma vez que a aludida fonte não é capaz de gerar rampas de aquecimento precisas.

Outrossim, é feito um acoplamento entre um gerador de sinais do modelo TEKTRONIX AFG3021C e a fonte de potência. O gerador de sinais é responsável por fornecer a forma que se deseja para a corrente. Este, porém, não possui potência suficiente para fornecer o valor de corrente para aquecer a liga até temperaturas de ensaio, logo, para tanto, utiliza-se a fonte. O acoplamento é executado com um transistor Darlington do modelo TIP31C e o circuito esquemático é apresentado na Figura 4.8.

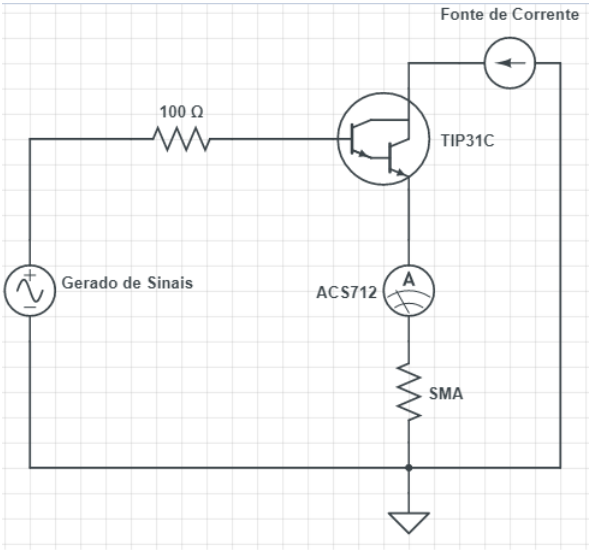


Figura 4.8 – Circuito Esquemático

4.4.1 Temperatura

A medição de temperatura é um tema de grande interesse na ciência. Extrair tais dados sem interferir no corpo é um desafio maior ainda. Em ligas com memória de forma, a temperatura baliza as tensões necessárias para o corpo estar na fase austenítica ou martensítica, portanto, é fundamental conhecer os valores responsáveis por recuperar a deformação imposta para cada nível de tensão normal.

Inicialmente, a temperatura era obtida através da câmera termográfica de modelo FLIR T197274 e uma Lente Close-up, 1xWd. Como o fio com memória de forma possui 0,015'' (0,381 mm), a lente é necessária para aproximar a imagem e diminuir o efeito da distorção causado pela forma cilíndrica do material. Porém, este equipamento não é ideal para adquirir medidas quantitativas de temperatura, sendo melhor aproveitado para se ter uma ideia qualitativa, por exemplo, a distribuição de temperatura ao longo do corpo.

O valor medido pela câmera pode ser melhorado através da calibração da emissividade do corpo, podendo ser feito com o auxílio do reflectômetro (CHILDS, 2001) ou conhecendo a temperatura e achando a emissividade através de uma correção matemática. Além disso, mesmo que sejam calibrados corretamente os valores de emissividade, o SMA se movimenta durante o os ciclos térmicos, prejudicando as medidas da temperatura. Por estas razões, foi necessário buscar outras soluções para estimar a temperatura.

O último sensor considerado e que é empregado ao longo dos ensaios é o termopar. O atuador em estudo possui algumas limitações para o uso de termopar, por esta razão não foi considerada esta opção anteriormente. A primeira limitação é quanto a como é feito o aquecimento, Efeito Joule, pois o termopar precisa estar em contato com o corpo a ser medido, assim a corrente elétrica pode interferir o diferencial de potencial registrado e, consequentemente, influenciar na leitura.

Além disso, o fio de SMA possui massa muito pequena e área de contato também muito pequena. Logo, se a relação dimensional e mássica do termopar com o fio for significativa, a transferência de calor entre os dois corpos não é

desprezível e causa queda de temperatura local. Destarte, a solução é usar termopar com dimensão inferior à do fio, e, por isto é empregado um termopar do tipo K do fabricante Omega e 0,0015'' de diâmetro. Por outro lado, a maneira como é feito o acoplamento do termopar no corpo em que se anela conhecer a temperatura gera alteração na leitura.

Ma (2010) estudou como medir a temperatura em fios com memória de forma. Contribuiu com um modelo teórico para encontrar essa temperatura para diferentes posições do fio, descreveu algumas situações e maneiras pertinentes para o uso da câmera termográfica e explorou uma solução para o acoplamento do termopar levando em consideração o efeito da corrente elétrica.

O efeito gerado pela passagem dos elétrons é explicado através da queda ôhmica entre um fio do termopar e outro. Isso ocorre porque, apesar de pequena, há uma distância entre esses dois pontos, assim, causando um gradiente de diferença de potencial elétrico. A Figura 4.9 denota o descrito.

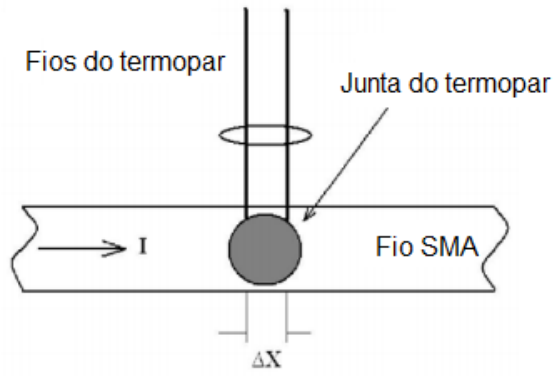


Figura 4.9 – Queda Ôhmica (Adaptado Ma, 2010)

Ma (2010) propõe um método para solucionar a influência da corrente elétrica, esse método consiste em acoplar o termopar no fio de SMA através de Solda Ponto em dois passos (Improved *Two-Step Spot Welded Thermocouple)*. Resumidamente, solda-se um dos fios do termopar onde se deseja medir e, em seguida, solda-se o segundo em cima da primeira solda. A Figura 4.10 apresenta o procedimento.

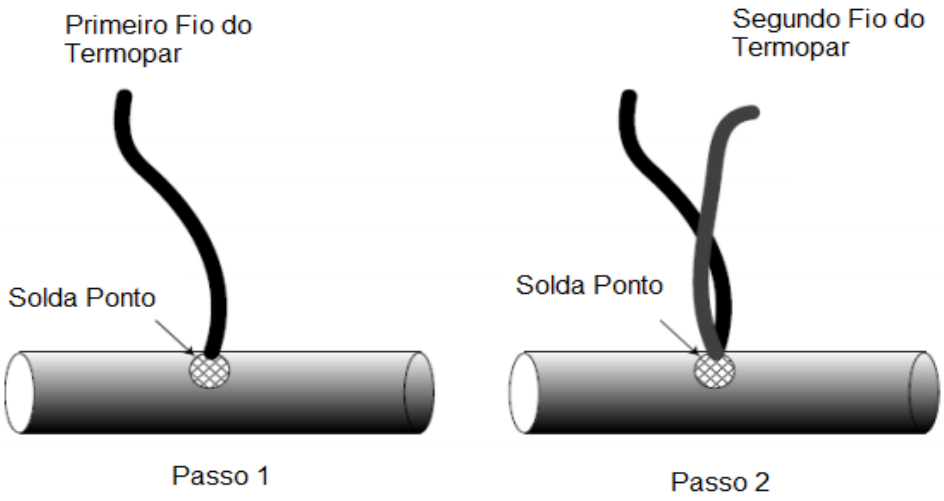


Figura 4.10 – Procedimento de Soldagem (Adaptado Ma, 2010)

Ainda, são apresentados dois métodos para verificar se a solda foi feita de forma correta. O primeiro consiste em alterar o sentido do fluxo da corrente elétrica (*Current Reversal and averaging Method)* e verificar se há mudança de leitura. O segundo método (*Pulse Shut-Off Measurement Method)* necessita que a corrente elétrica e a temperatura sejam medidas ao mesmo tempo onde, em seguida, desliga-se a corrente e é verificado se nesse instante houve queda de temperatura.

Apesar do método de Solda Ponto em Dois Passos ser uma ótima solução, ele não é aplicado neste experimento, pois a soldagem cria uma zona termicamente afetada, alterando as propriedades termomecânicas da liga estudada nessa região, o que inviabilizaria quaisquer resultados encontrados.

Portanto, empregou-se o Silicone de cura neutra para alta temperatura (até 343ºC) da marca Abro® para o acoplamento mecânico. Para efetuar a leitura dos valores de temperatura, é utilizado o Arduino em conjunto com o módulo MAX6675, este módulo possui uma biblioteca pronta para conversão do sinal elétrico em valores de temperatura, possui junta a fria, circuito amplificador para o sinal e impedância elétrica muito alta, o que evita passagem de corrente elétrica para o módulo.

Como de praxe, para aumentar a confiabilidade dos dados extraídos, alguns testes foram executados. O primeiro teste consiste em verificar o funcionamento do módulo com o termopar. Para tal, é montado um experimento que consiste em um recipiente com água, um fogareiro, o termopar ligado ao módulo e ao Arduino e um termômetro de mercúrio. A água é aquecida até entrar em ebulição e os valores dos dois sensores são anotados para o resfriamento. As medidas do termômetro e do termopar são registradas e colocadas em um gráfico. O resultado é apresentado na Figura 4.11.

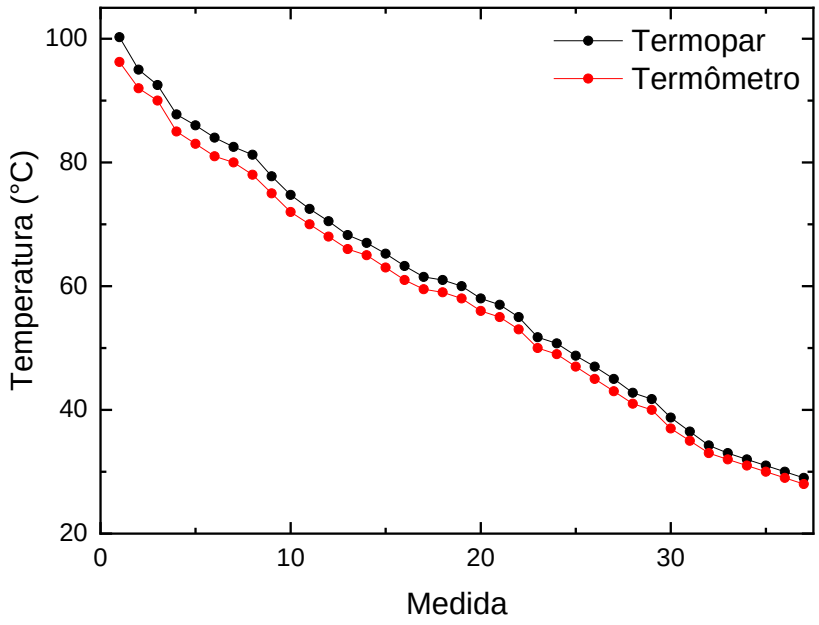


Figura 4.11 – Calibração do termopar

Na Figura 4.11, o eixo das ordenadas apresenta os valores de temperatura e o eixo das abscissas o valor que representa a temperatura para o termopar e o termômetro num mesmo instante. No gráfico é possível ver que o comportamento dos dois equipamentos é igual e que há uma diferença de medida que diminui conforme a temperatura decresce. Essa diferença pode ser explicada pela precisão de cada sensor no tempo, pois, para temperaturas mais altas, a transferência de calor da água para o ambiente é maior e, consequentemente, a temperatura varia mais rapidamente. O termômetro leva mais tempo do que o termopar para registrar a variação de temperatura por uma

razão mássica: o primeiro possui massa maior do que o segundo, portanto a leitura do termômetro possui um atraso em relação ao termopar e, assim, explicando a diferença entre as duas medidas no mesmo instante.

Após conferir o funcionamento do módulo com o termopar, resta comparar o comportamento da leitura antes e após a aplicação do adesivo e verificar se há influência da corrente nos valores aferidos.

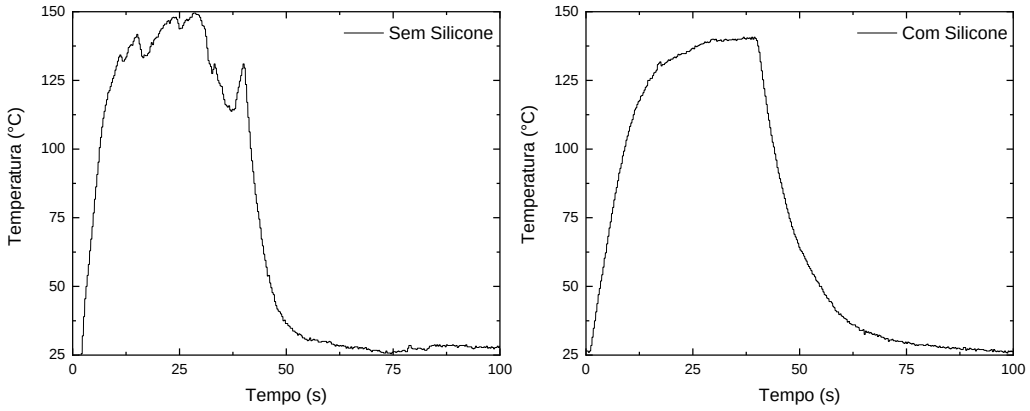


Figura 4.12 – Comportamento da temperatura (a) Com Adesivo (b) Sem Adesivo

Na Figura 4.12 é evidenciada a influência do acoplamento na leitura do termopar durante o resfriamento, os dois ensaios são feitos fornecendo corrente contínua de 1,5 A durante o mesmo intervalo de tempo. Quando sem a camada de silicone, o movimento do fio proporciona uma perturbação na leitura da temperatura. Por outro lado, ao aplicar o adesivo, o comportamento da leitura se torna mais estável. É importante que se aplique a menor quantidade possível para fixar o termopar no fio, já que o adesivo exerce o papel de resistência térmica que não existe para o resto do fio e, consequentemente, há um atraso entre a leitura com e sem o adesivo, que aumenta conforme se diminui a temperatura. A Figura 4.13 contém o fio com o termopar fixado.

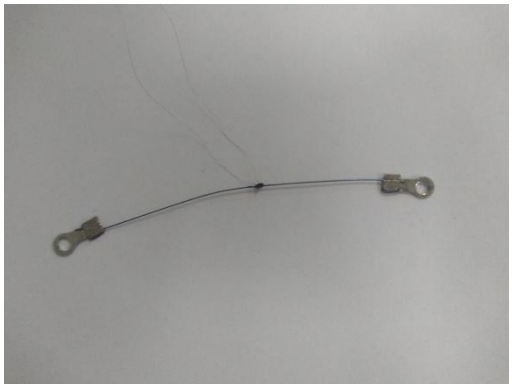


Figura 4.13 – Fio SMA com o termopar acoplado

Por conseguinte, resta verificar se há ou não influência da corrente elétrica na leitura do termopar. Para isto, é usado o método de desligar a corrente e analisar se o valor de temperatura é alterado nesse instante. A Figura 4.14 ilustra como se comporta um termopar que sofre a influência da corrente.

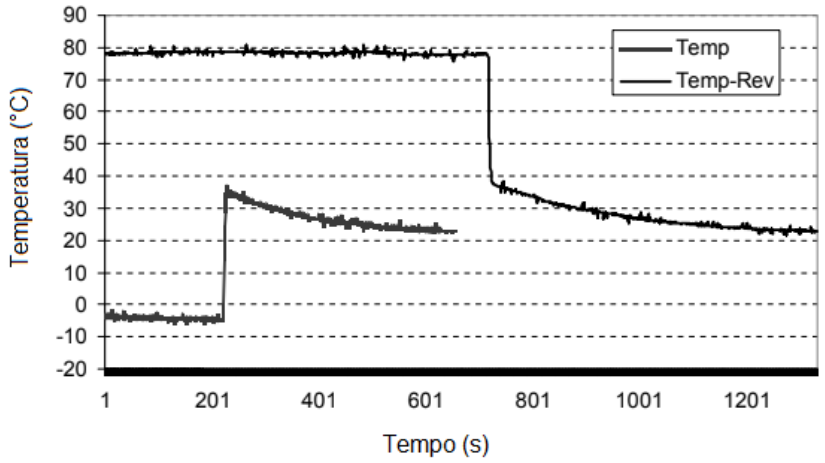


Figura 4.14 – *Pulse Shut-Off Method* (Adaptado Ma, 2010)

A Figura 4.14 auxilia no entendimento sobre como a corrente pode influenciar na leitura da temperatura. Este exemplo denota que ao inverter a polaridade na extremidade do fio, a leitura no termopar é influenciada. Assim, nos dois casos, ao desligar a corrente elétrica, há um salto de temperatura para 37 °C. Além disso, quando a corrente elétrica está em um sentido transversal do fio, o valor mensurado é de 78 °C e, ao inverter, de -4 °C; a média desses dois valores é o valor real de 37 ºC (Ma, 2010).

A Figura 4.15 denota como a leitura do termopar empregado neste trabalho se comporta quando a corrente elétrica é desligada. Como pode ser visto, o termopar assinala que não sofre influência da corrente, pois, assim que fonte de potência é desligada, a temperatura não apresenta mudança brusca de seu valor. Por outro lado, há decréscimo da temperatura após 0,3s.

Assim sendo, neste trabalho é verificado qual é o comportamento normal do resfriamento através da comparação da câmera termográfica e o termopar. Posteriormente, é comparada a leitura aferida no termopar com a corrente elétrica em um sentido do fio e no oposto.

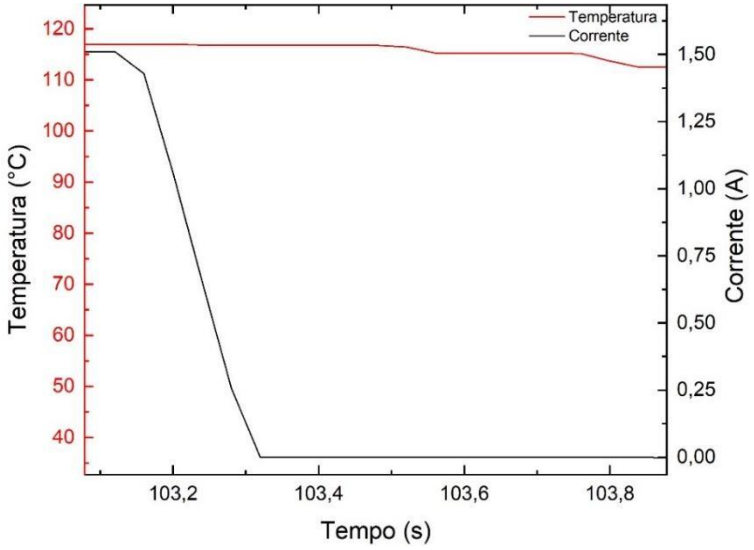


Figura 4.15 – Verificação da influência da corrente elétrica no termopar.

O resultado comparativo entre a câmera e o termopar se encontra na Figura 4.16, esse experimento consiste em aquecer e resfriar o fio com memória de forma e até diferentes patamares de temperatura, variando a corrente elétrica em 0,25 A de 0,5 A até 1,5 A. O ponto de medição não é o mesmo para os dois sensores, uma vez que, em cima do termopar, há uma fina camada de silicone, portanto o ponto onde é focada a imagem da câmera é imediatamente ao lado do termopar. Nesse mesmo gráfico pode ser vista a similaridade qualitativa entre os resultados.

Dessa forma, pode ser visto que o padrão aferido é similar em ambos os casos, porém, os valores máximo e mínimos medidos pela câmera são menores do que os mensurados pelo termopar – isso é justificado pela falta de calibração da câmera. Além disso, há intervalos onde a câmera detecta redução de temperatura e o termopar, não. Esse comportamento é justificado pela movimentação do fio, tendo em vista que a câmera depende do foco escolhido para medida, o qual é muito sensível a qualquer movimentação.

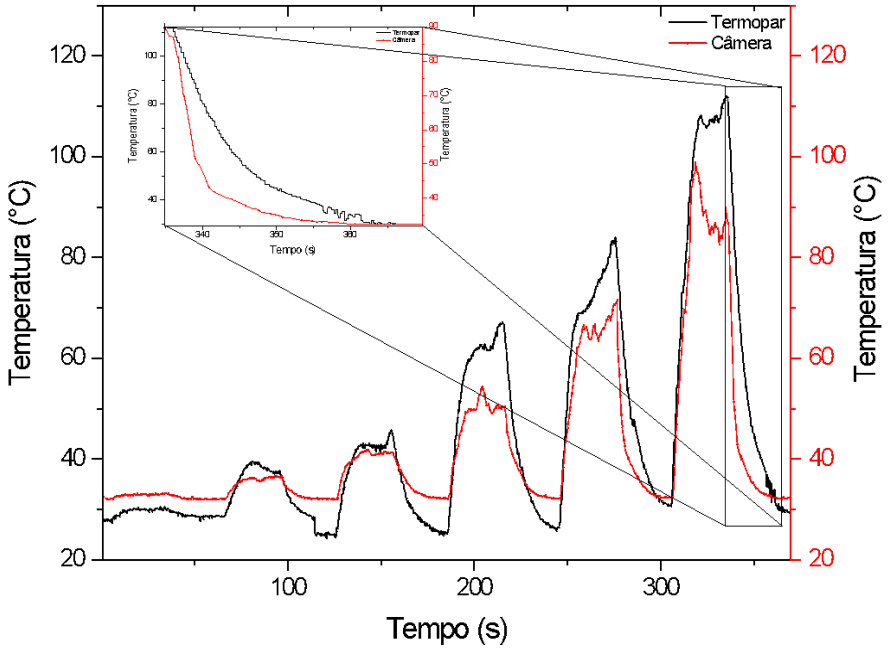


Figura 4.16 – Comparação Câmera Termográfica e Termopar

Por fim, a Figura 4.17 apresenta a temperatura medida no fio ao passar 1 A em um sentido longitudinal do fio e, em seguida, no reverso. Uma vez que a temperatura alcançada é a mesma e o padrão similar, diferentemente do exemplo apresentado na Figura 4.14, esse resultado corrobora que a corrente elétrica não altera a leitura para este experimento.

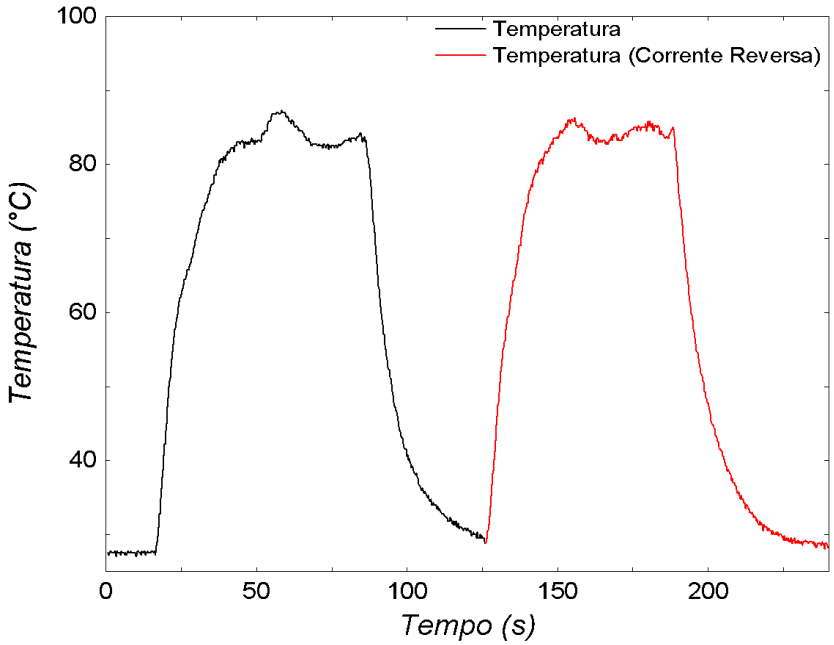


Figura 4.17 – Comparativo da temperatura medida para duas correntes opostas

4.5 Metodologia Experimental

Depois de realizar a caracterização do fio SMA e das molas de aço, faz-se a montagem do atuador SMA no aparato descrito na seção 4.3. Ensaios são executados variando a rigidez da mola linear, os padrões de aquecimento, os valores de corrente elétrica e a pré-deformação do fio SMA. Com esse objetivo, foi estabelecido uma ordem lógica para variar cada parâmetro. Por conseguinte, o primeiro parâmetro estudado é a influência da taxa de aquecimento no comportamento termomecânico, isso é realizado fixando as outras variáveis e alterando como a corrente elétrica é fornecida ao sistema. Em seguida, é escolhida uma taxa de aquecimento para se estudar o efeito da pré-deformação no fio. Em sequência, estuda-se a influência da rigidez para cada pré-deformação. Por fim, é explorado como a corrente máxima altera o comportamento do sistema.

Estabelecidos os parâmetros para cada análise, segue-se a montagem do aparato. Primeiramente, é fundamental garantir que o fio não apresente

deformações residuais provenientes de ensaios anteriores. Portanto, com a amostra posicionada no aparato e o carrinho preso, é feito um aquecimento até a temperatura de austenitização e, consequentemente, recuperando qualquer deformação residual.

Em seguida, é necessário tracionar o fio até a pré-deformação escolhida. Diferentes valores de pré-deformação são escolhidos. Para isto, utiliza-se o gráfico de tração versus deformação do fio (Figura 4.15(a)) para identificar o valor de carga necessária para realizar a pré-deformação do fio. Então, com o carrinho fixado, é feita a pré-deformação desejada para o fio, isto é feito girando um parafuso preso ao anteparo que prende o fio e a uma barra fixa. Ao aplicar torque a este parafuso, o anteparo é puxado na direção da barra, gerando deformação e, quando atingida a carga estabelecida (monitorada pela célula de carga) o anteparo é fixado. Com a mola livre de deformação e o fio com a deformação correta, o sistema é liberado e o aparato está pronto para executar os ciclos térmicos. Entre cada ciclo térmico com parâmetros diferentes, é feita a recuperação do fio e refeito este procedimento. A Figura 4.18 apresenta as etapas descritas.

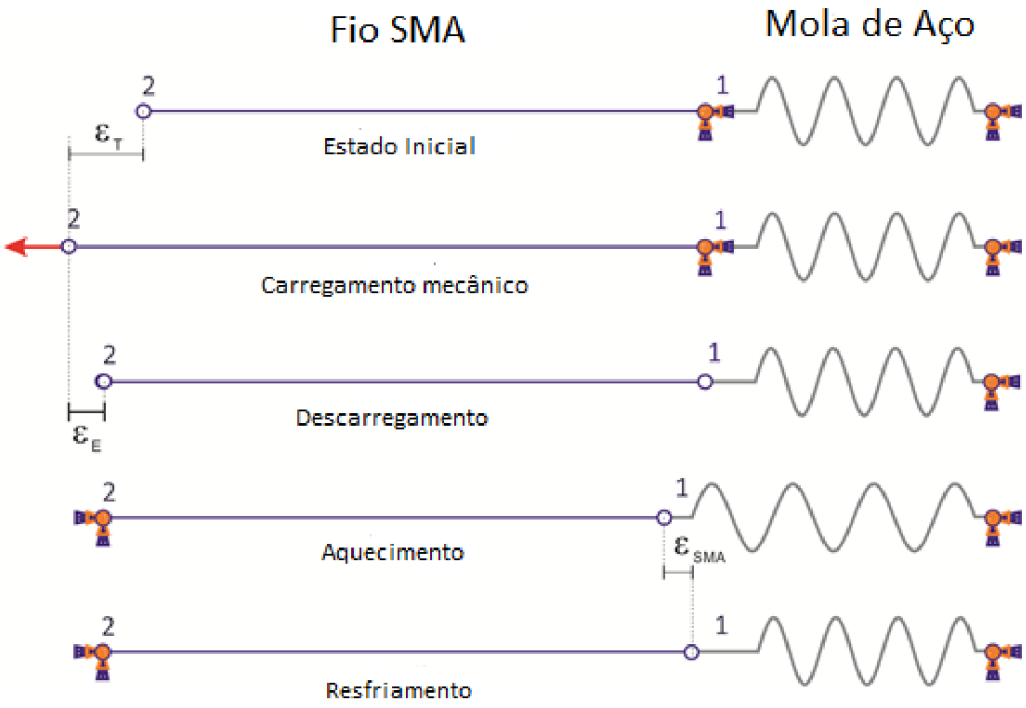


Figura 4.18 - Diagrama esquemático do atuador *bias-spring* (DE PAIVA, 2017)

A Figura 4.19 apresenta como a corrente elétrica varia em cada ensaio da influência da taxa de aquecimento. Dessa forma, o tempo A representa o tempo que se leva para a corrente elétrica variar até seu valor máximo. O tempo B é constante e equivale ao tempo em que se mantém no valor máximo e o tempo C para voltar ao valor mínimo de 0 A.

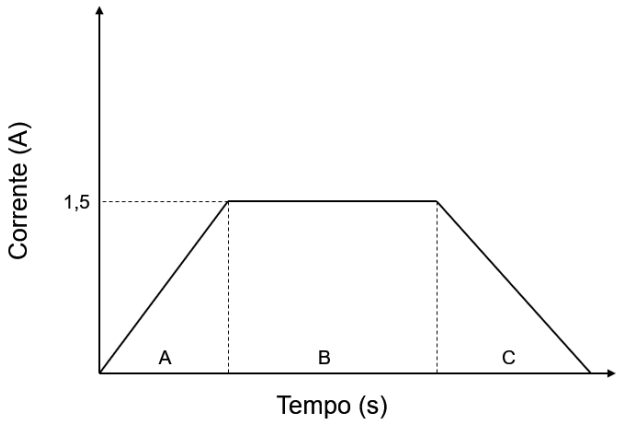


Figura 4.19 – Onda de Corrente Elétrica

A Tabela 4.2 apresenta os tempos empregados neste trabalho, o tempo B é igual para todos e de 90s.

Tabela 4.2 – Tempos referentes aos carregamentos elétricos

C(s) / A(s)	0	10	20	30	40	50	60	90	120	150	180	210	240	270	300
0	x														
10	x														
20	x														
30	x			x											
40	x														
50	x														
60	x						x								
90	x							x							
120	x								x						
150	x									x					
180	x										x				
210	x											x			
240	x														
270	x														
300	x														

A Tabela 4.3 apresenta a nomenclatura para os valores de pré-carga em relação aos de corrente máximas utilizadas nos ensaios.

Tabela 4.3 – Nomenclatura para valores de pré-carga em função da corrente elétrica

Corrente Máxima (A) / Pré-Carga (N)	0,5	0,75	1	1,25	1,5
20	A	B	C	D	E
30	F	G	H	I	J
40	K	L	M	N	O

A Tabela 4.4 traz os ensaios realizados para cada mola em relação a cada parâmetro, na coluna de condições ensaiadas o número corresponde ao

tempo A da Figura 4.19, a letra ‘s’ significa segundos e quando seguido da letra R significa que foi feito ensaio com tempos A e C iguais. As letras no fim correspondem a nomenclatura da Tabela 4.3. Esta tabela tem a função de resumir e organizar os ensaios executados.

Tabela 4.4 – Condições ensaiadas por mola

Mola	Condições Ensaiadas
1	30sR-E, 30sR-J e 30sR-O
2	30sR-E, 30sR-J, 30sR-O, 30sR-A, 30sR-B, 30sR-C, 30sR-D e 30sR-E.
3	0s-J, 20s-J, 30s-J, 40s-J, 50s-J, 60s-J, 90s-J, 120s-J, 150s-J, 180s-J, 210s-J, 240s-J, 270s-J, 300s-J, 30sR-J, 60sR-J, 90sR-J, 120sR-J, 150sR-J, 180sR-J, 210sR-J, 30sR-E, 30sR-O, 30sR-A, 30sR-B, 30sR-C, 30sR-D e 30sR-E.
4	30sR-E, 30sR-J, 30sR-O, 30sR-A, 30sR-B, 30sR-C, 30sR-D e 30sR-E.
5	30sR-E, 30sR-J e 30sR-O
6	30sR-E, 30sR-J, 30sR-O, 30sR-A, 30sR-B, 30sR-C, 30sR-D e 30sR-E.

5. Resultados

Este capítulo se destina a apresentar e discutir os diferentes comportamentos termomecânicos observados para o atuador inteligente. Será dividido em partes que, por sua vez, são escolhidas com base na influência do parâmetro.

5.1 Taxa de aquecimento

Lagoudas (2008) expôs a importância da taxa em que a carga mecânica e térmica é aplicada. Assim, a carga mecânica aplicada depende da rigidez da mola e a térmica da taxa de aquecimento. Dessa forma, Lagoudas (2008) expressa que, para cada sistema estudado, é importante aplicar taxa de aquecimento e resfriamento que assegurem homogeneidade de temperatura ao longo do corpo estudado.

O experimento montado permite analisar a taxa de aquecimento através do controle da corrente elétrica aplicada. Nenhum método de resfriamento forçado foi empregado, então este é feito por convecção natural.

Todos os ensaios são feitos para a mola 3, mesma pré-carga do fio (30 N) e o mesmo valor máximo de corrente elétrica (1,5 A). Em todos os casos a corrente elétrica é mantida constante em seu valor máximo e mínimo por 90s. Esse estudo foi feito alterando o tempo para alcançar a corrente elétrica máxima e, em alguns casos, o tempo que se leva para diminuir essa mesma corrente. Assim, são feitos cinco ciclos térmicos para estabilizar possíveis acomodações mecânicas do experimento e, em seguida, aplicado cada carregamento térmico diferente. Estes são os 21 ensaios com a terminação ‘J’ na Tabela 4.4, na linha da mola 3.

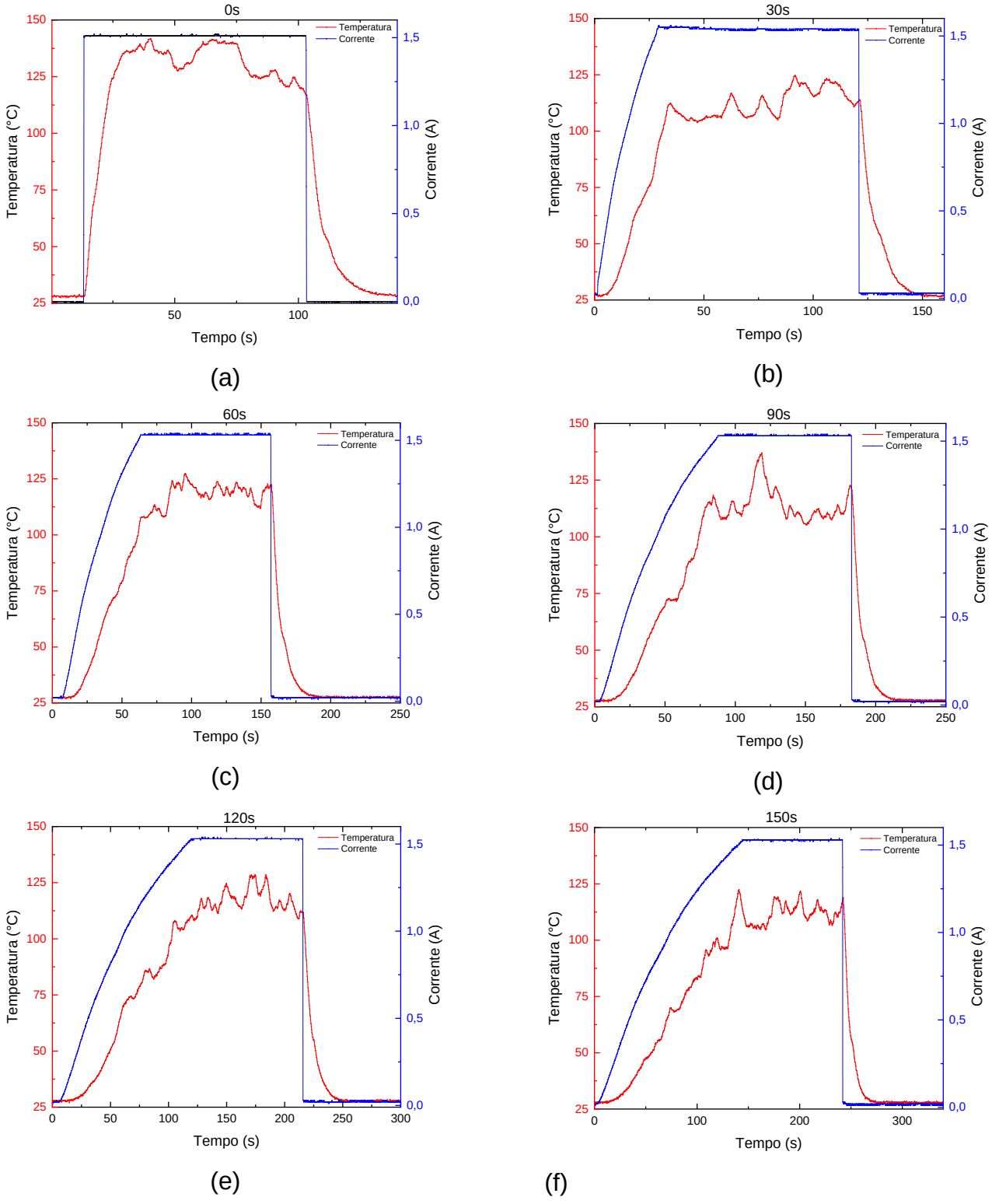
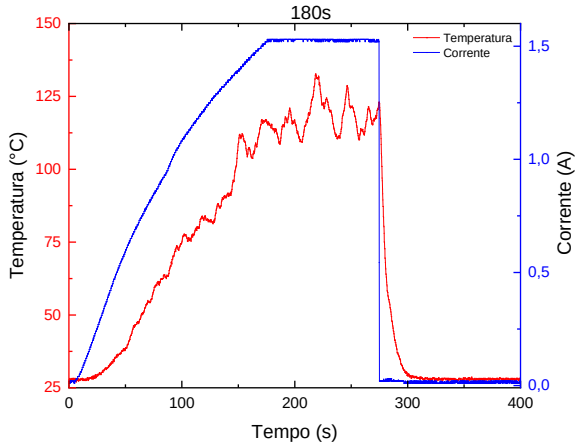


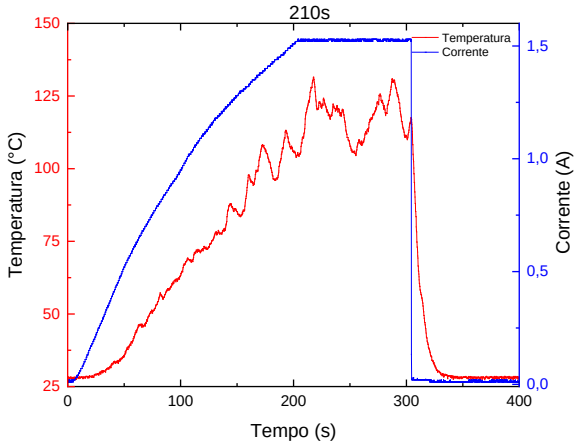
Figura 5.1 – Corrente elétrica e temperatura com taxas de aquecimento 0s a 150s: (a) 0s; (b) 30s; (c) 60s; (d) 90s; (e) 120s e (f) 150s.

A Figura 5.1 ilustra a variação da corrente e da temperatura para alguns casos. Como pode ser observado, o acoplamento feito se aproxima de uma reta. Porém, conforme o transistor aquece, a região de saturação muda e geral o padrão visto. O desvio entre um arquétipo e apresentado e o desejado é muito pequeno, não constituindo em perda para a análise proposta.

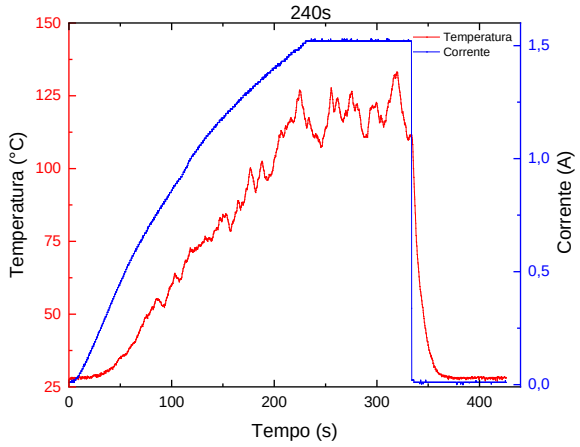
A figura 5.2 apresenta mais alguns ensaios com tempo de queda da corrente elétrica de 0s, designados por 180s-J, 210s-J, 240s-J, 270s-J, 300s-J, de acordo com Tabela 4.4 e linha da mola 3. Nesses gráficos, denota-se a instabilidade da temperatura para a mesma corrente elétrica. Esta aumenta conforme se amplia a diferença de temperatura entre o corpo medido e o ambiente. Visto que, quanto maior é esta diferença, maior é a perda calor, assinala-se que essa variação é uma resposta do mecanismo de troca de calor por convecção.



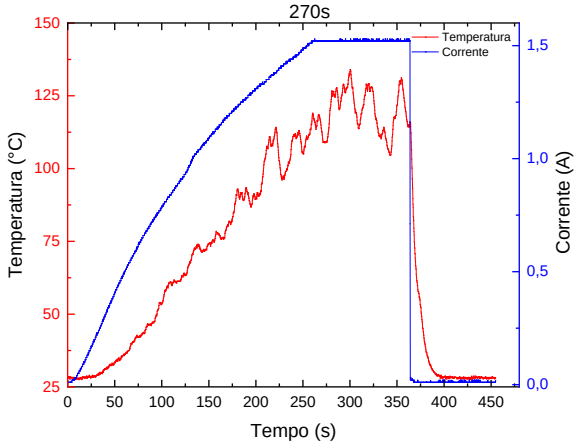
(a)



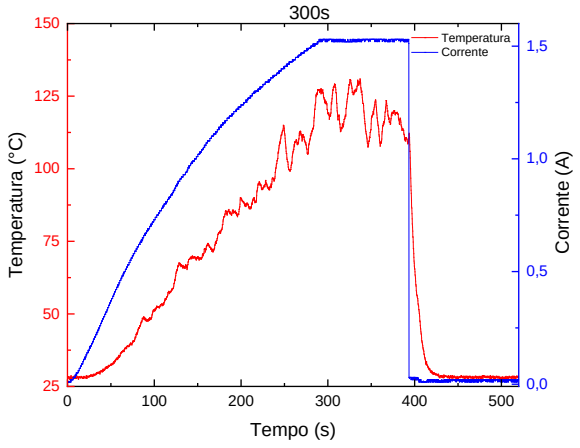
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.2 Corrente elétrica e temperatura com taxas de aquecimento 180s a 300s: (a) 180s; (b) 210s; (c) 240s; (d) 270s e (e) 300s.

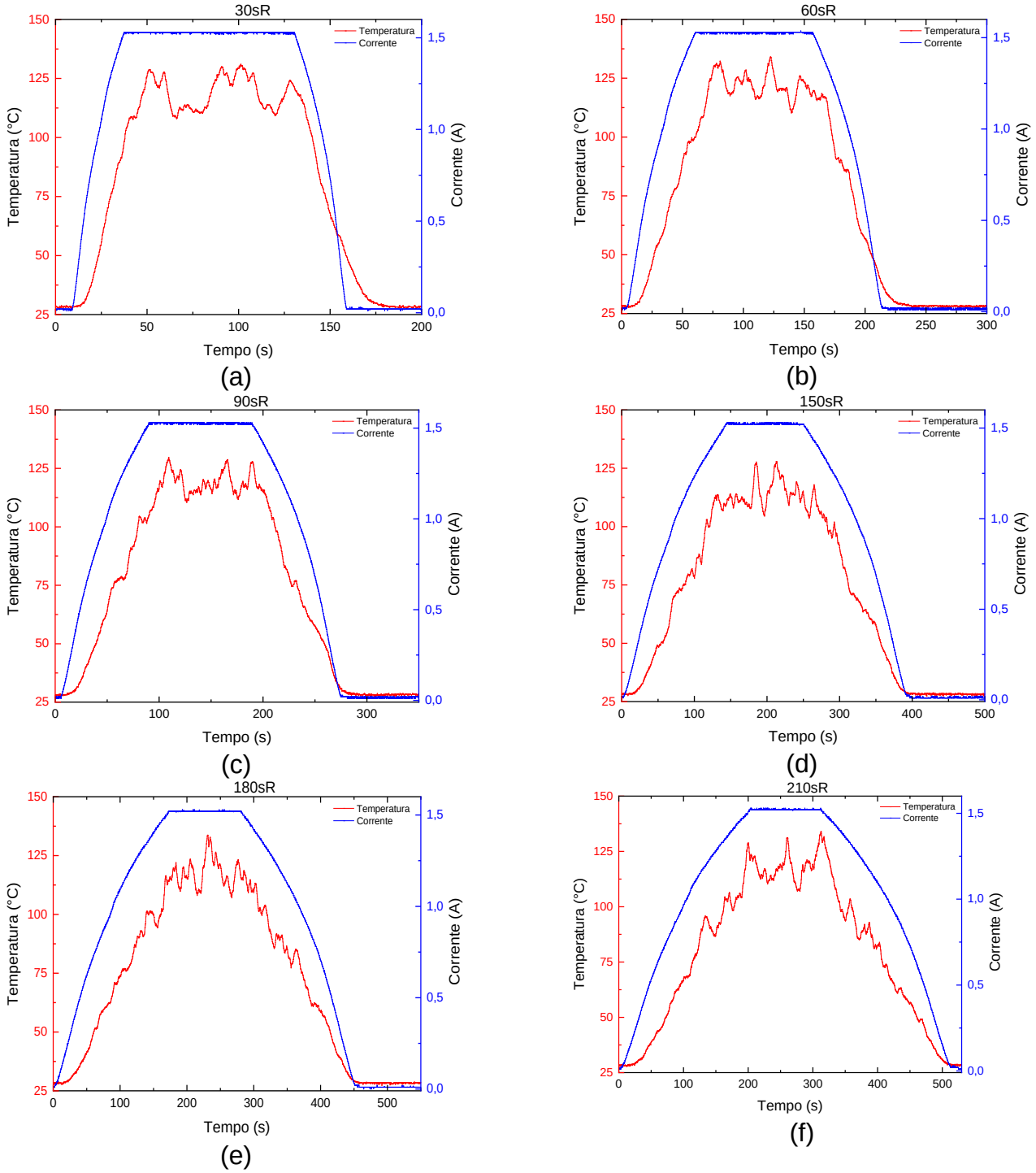


Figura 5.3 – Corrente e Temperatura com controle de corrente no Resfriamento: (a) 30sR; (b) 60sR; (c) 90sR; (d) 150sR; (e) 180sR e (f) 210sR.

A Figura 5.3 mostra como é controlada a corrente para os casos com resfriamento limitado. Nestes ensaios é possível ver que a temperatura decresce

com inclinação semelhante ao aquecimento, mostrando que o resfriamento é mais lento do que nos casos sem este mesmo controle.

Com a finalidade de analisar como a alteração da taxa de aquecimento influencia no estudo, é necessário analisar a densidade energia gerada em cada caso. Isto é alcançado através da área do gráfico Tensão x Deformação da Figura 5.4

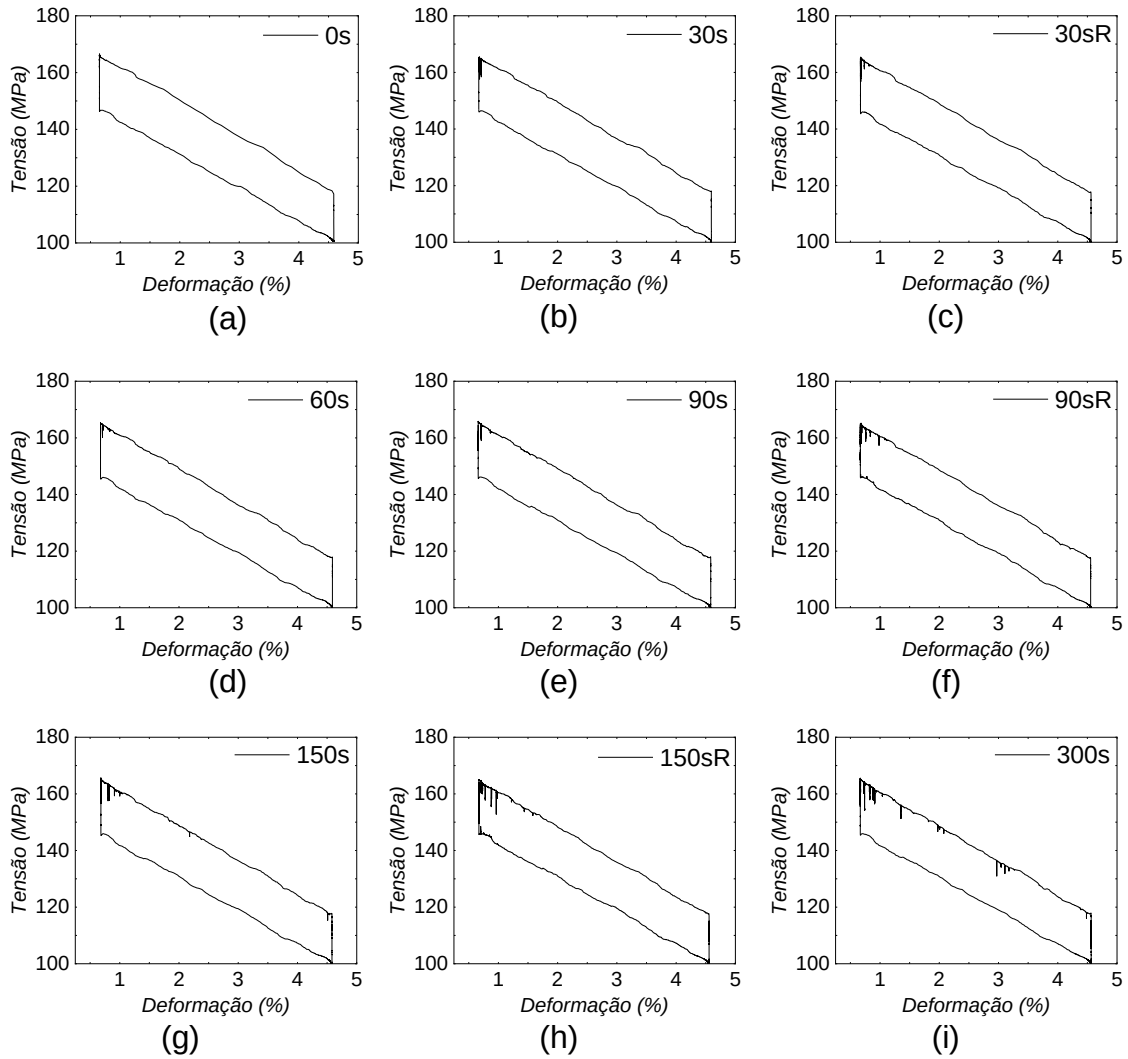


Figura 5.4 – Tensão x Deformação Ensaio de Aquecimento: (a) 0s, (b) 30s, (c) 30sR, (d) 60s, (e) 90s, (f) 90sR, (g) 150s, (h) 150sR e (i) 300s.

A Figura 5.4 indica que a taxa de aquecimento não apresenta influência significativa, porém é fundamental verificar matematicamente a diferença entre cada área. Por conseguinte, a Figura 5.5 apresenta os resultados da densidade de energia calculada para cada taxa de aquecimento e a Tabela 5.1 elucida a diferença relativa entre o caso com e sem resfriamento controlado para o mesmo aquecimento. Na legenda da Figura 5.5, os casos denominados Aquecimento e Resfriamento Controlado correspondem aos ensaios onde há terminação “sR-J”, na linha Mola 3 da Tabela 4.4. Melhor dizendo, a corrente não é desligada instantaneamente depois do patamar de aquecimento, ela varia do valor máximo ao mínimo com taxa simétrica à do aquecimento do mesmo ensaio.

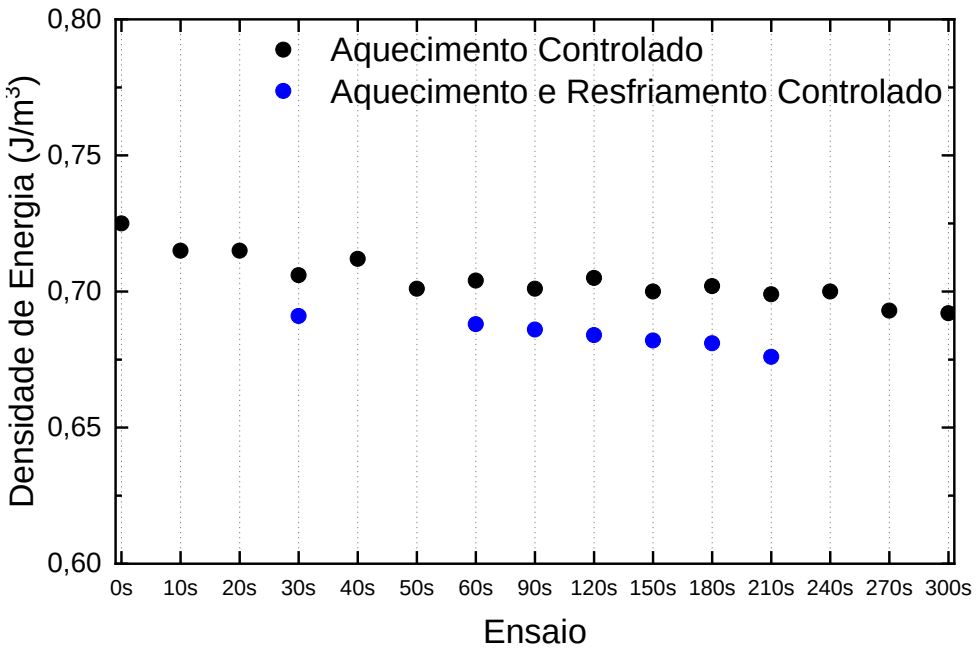


Figura 5.5 – Densidade de Energia do Ensaio de Aquecimento

Tabela 5.1 – Diferença relativa entre os casos de somente aquecimento controlado e de aquecimento e resfriamento controlado

Condição	Diferença relativa (%)
30sR-J	2,12
60sR-J	2,27
90sR-J	2,14
120sR-J	2,98
150sR-J	2,57
180sR-J	2,99
210sR-J	3,29

A Figura 5.5 elucida que a variação da densidade de energia é muito pequena em cada caso e diminui conforme se reduz a taxa de aquecimento. A Tabela 5.1 mostra que a diferença da energia com e sem resfriamento controlado é muito pequena.

A Figura 5.6 ilustra a variação da tensão em cada ensaio. Esse valor é obtido através da diferença entre a média da tensão mecânica depois do resfriamento e a média da tensão mecânica durante o tempo em que a corrente elétrica é mantida no mesmo valor. Podemos ver que a diferença entre os valores de tensão obtidos para cada taxa estudada é muito pequena.

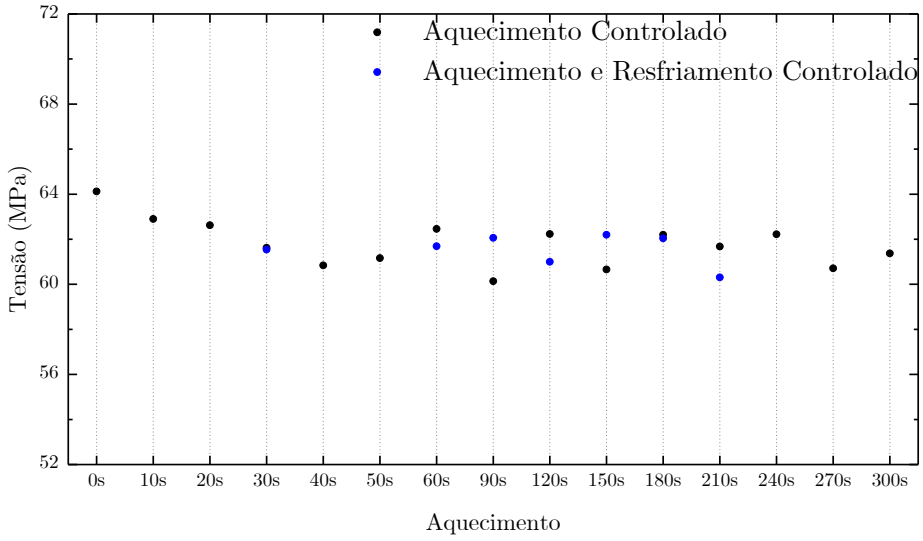


Figura 5.6 – Variação de Tensão do Ensaio de Aquecimento

A Figura 5.7 expõe o ciclo com aquecimento de 30s e resfriamento controlado de mesmo valor. A linha em vermelho corresponde à temperatura, a em azul à deformação e a em preto à tensão, todos em função do tempo. Os dois retângulos representam a região de onde são retiradas as médias para o gráfico da figura 5.6.

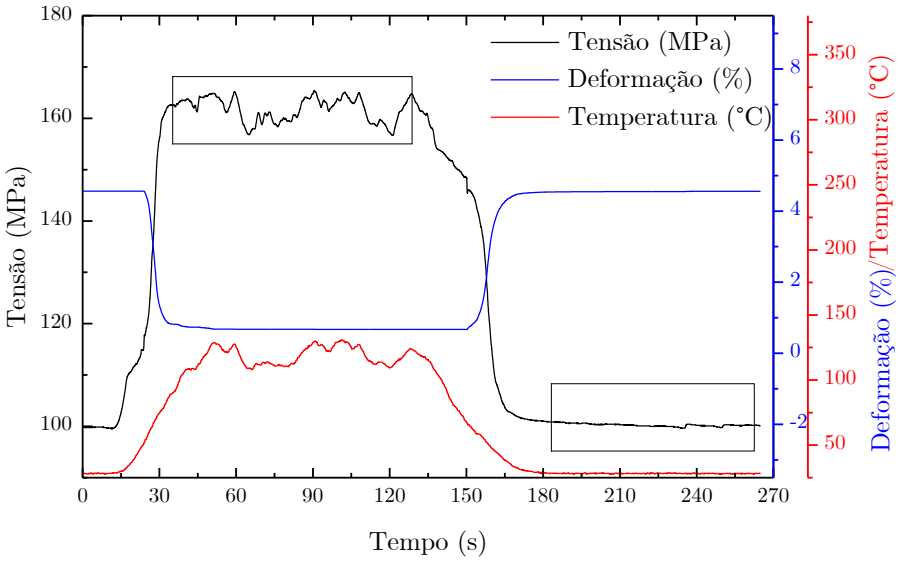


Figura 5.7 – Tensão, Deformação e Temperatura x Tempo Aquecimento 30sR

Conforme o fio é alongado e a deformação aumenta, pode ser visto que, mesmo durante a recuperação máxima alcançada, o fio não consegue voltar ao comprimento livre de tensão e possui deformação de 0,5%. Prosseguindo, assim como foi feito para a variação de tensão, a variação da deformação é calculada e comparada. O resultado se encontra na Figura 5.8. A diferença entre a deformação recuperada para cada caso é ínfima, a maior é de 0,04%.

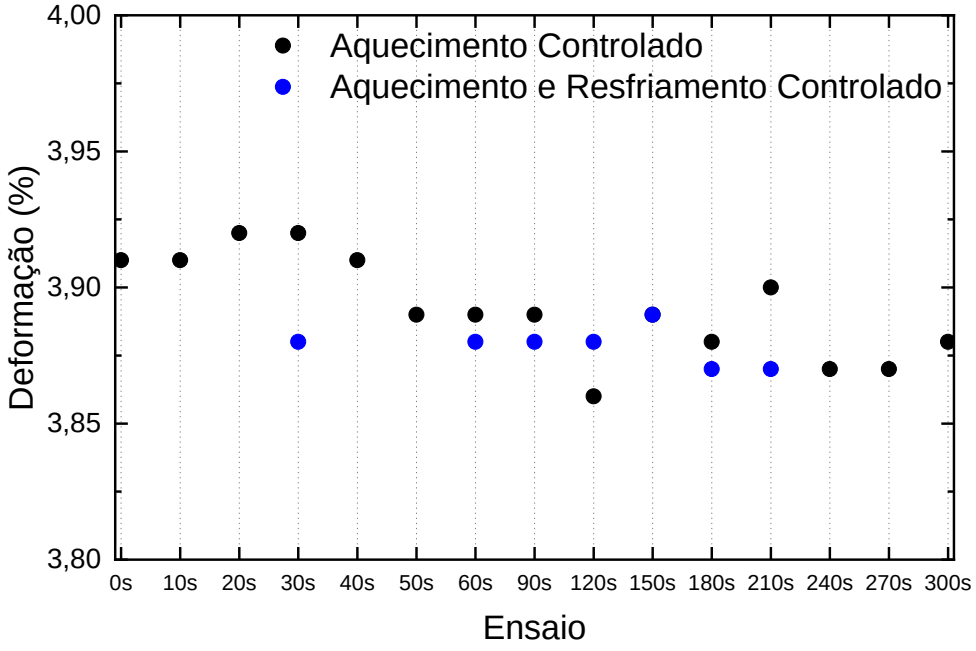


Figura 5.8 – Variação de Deformação do Ensaio de com diferentes taxas de aquecimento

Com os resultados obtidos chegou-se à conclusão que o impacto proveniente da taxa de aquecimento na tensão atuada, na deformação recuperada e na densidade de energia não é relevante o suficiente para ser priorizado no projeto de um atuador linear com liga de memória de forma *bias-spring.*

Por fim, para o restante dos ensaios, é fixada uma taxa de aquecimento e de controle da corrente durante o resfriamento. Objetivou-se empregar o caso onde a diferença de energia entre as condições com e sem resfriamento controlado possui uma diferença pequena e que apresentou laços de histerese melhor definidos.

A Figura 5.9 traz alguns gráficos com laços de histerese da deformação em função da temperatura, onde é possível ver que a partir do gráfico 30sR há estabilização do comportamento. Dessa forma, essa é a taxa escolhida, pois a partir dessa taxa o ensaio é considerado quase-estático.

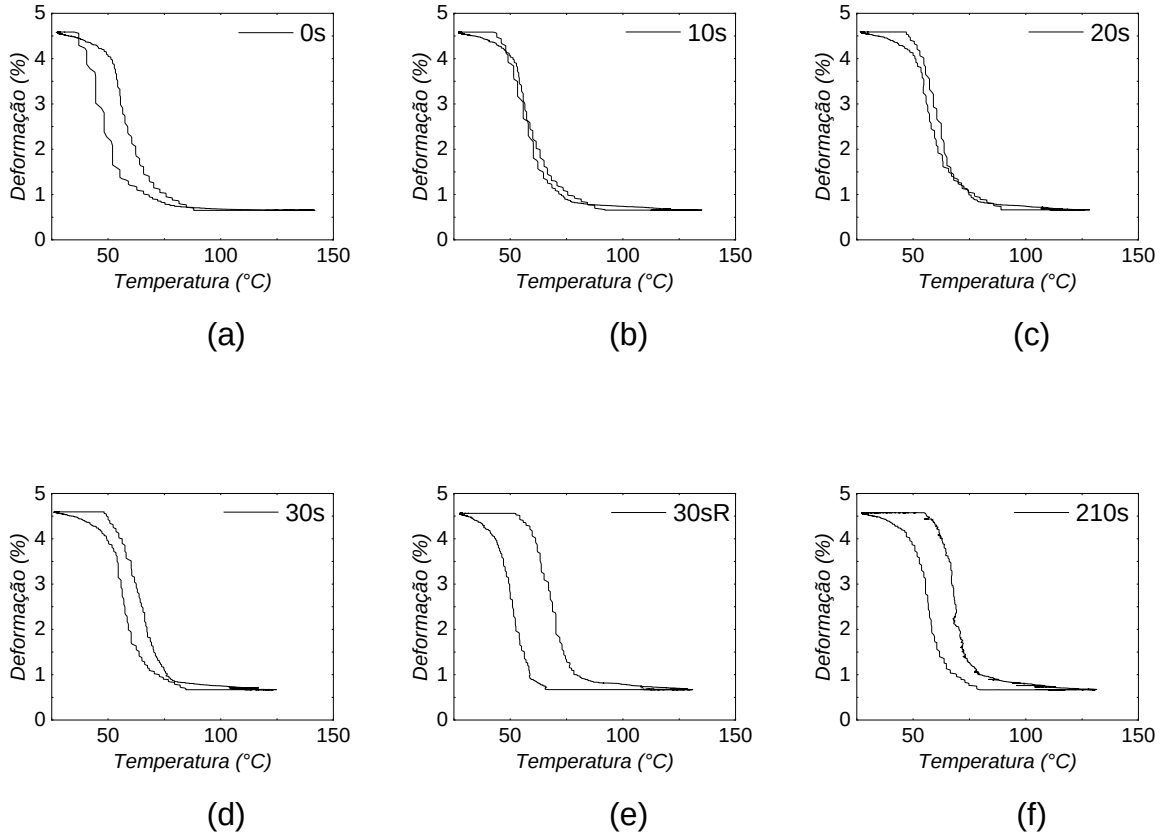


Figura 5.9 – Deformação x Temperatura Ensaio de Taxa de Aquecimento (a) 0s, (b) 10s, (c) 20s, (d) 30s, (e) 30sR e (f) 210s

5.2 Efeito da rigidez da mola

A influência da rigidez da mola é estudada para as seis molas apresentadas anteriormente, a pré-carga aplicada ao fio é de 20N. A corrente elétrica atinge o máximo de 1,5 A com uma rampa de 30s, mantida neste valor por 60s, levando 30s para chegar até 0 A e permanecendo por 60s onde se encerra um ciclo.

O gráfico da Figura 5.10 traz um ensaio completo para cada mola com a pré-carga de 20N. Neles é possível ver que, após aplicada a pré-carga e o sistema ser liberado, a posição inicial para a temperatura ambiente é uma e,

após aquecer o fio e resfriá-lo novamente, posição de equilíbrio é alterada, pois a deformação imposta no momento inicial não é alcançada de forma similar pelas molas. Uma maneira de fazer com que fossem iguais seria se, ao invés de aplicar a deformação inicial no fio com memória inicial, essa mesma pré-deformação fosse aplicada à mola. Esse método não foi escolhido uma vez que seria mais difícil de tentar garantir o ponto no qual o fio se encontra no gráfico Força x Deslocamento da Figura 4.2, ou seja, procurar assegurar que inicialmente o fio encontra-se com a variante martensítica não-maclada.

Alguns dos fatores que são possíveis de se verificar nos gráficos Força, Deslocamento e Temperatura, são a repetitividade do deslocamento e da força para cada ciclo. Além disso, quanto menor a rigidez da mola, mais tempo é necessário para que haja estabilização do deslocamento e da força. Para o patamar onde a corrente se mantém constante, a temperatura varia e a força responde de forma similar, mas o deslocamento não se altera.

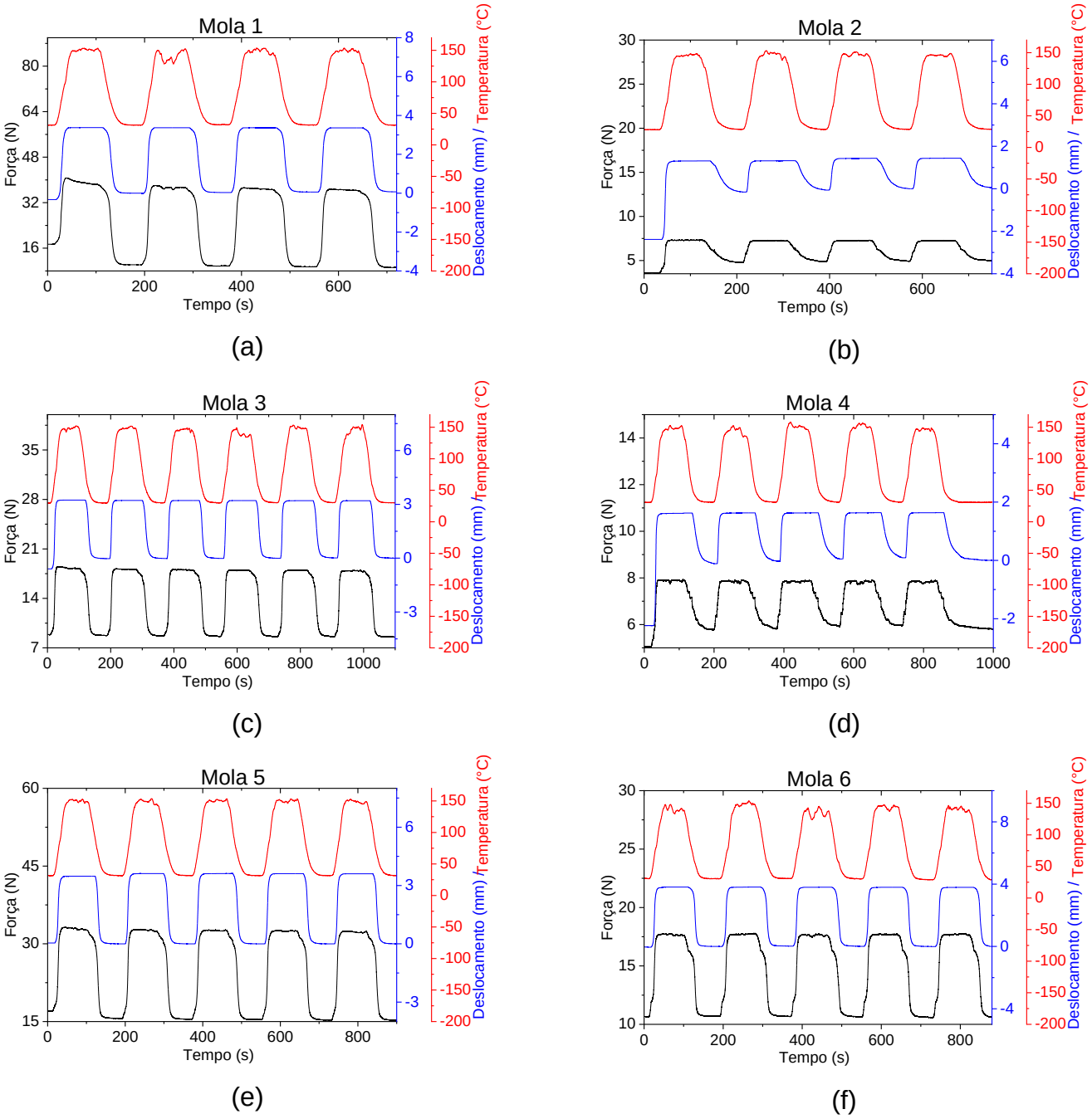


Figura 5.10 Ciclos Térmicos para cada mola e pré-carga de 20N (a) Mola 1 (591N/m), (b) Mola 2 (928N/m), (c) Mola 3 (1496N/m), (d) Mola 4 (2560N/m), (e) Mola 5 (4430N/m) e (f) Mola 6 (8670N/m)

Com a finalidade de comparar o efeito da rigidez na força de atuação e no deslocamento, a figura 5.11 ilustra como ocorre a variação da força e a 5.12 a

variação do deslocamento quando aumentamos a rigidez da mola. Dessa forma, os valores de força e deslocamento do último ciclo de cada ensaio são traçados em um gráfico comparativo.

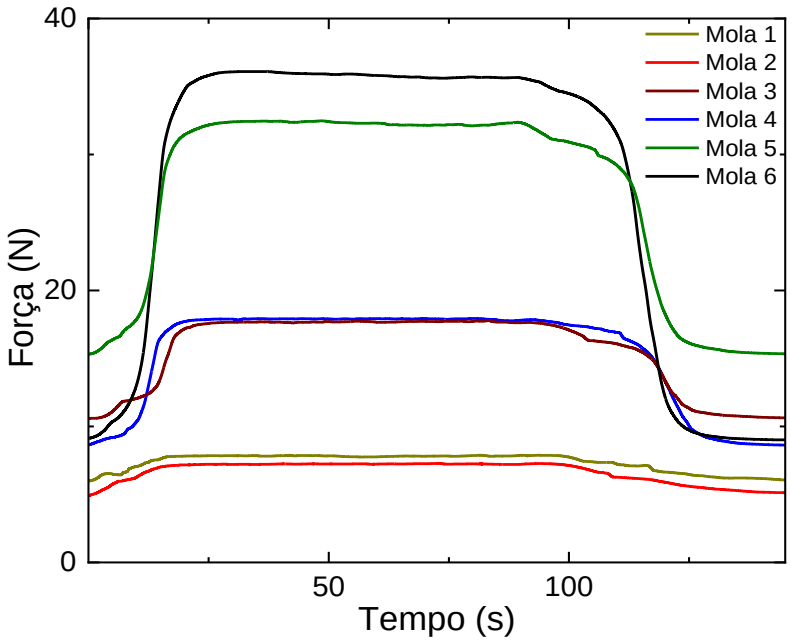


Figura 5.11 – Força x Tempo para cada mola

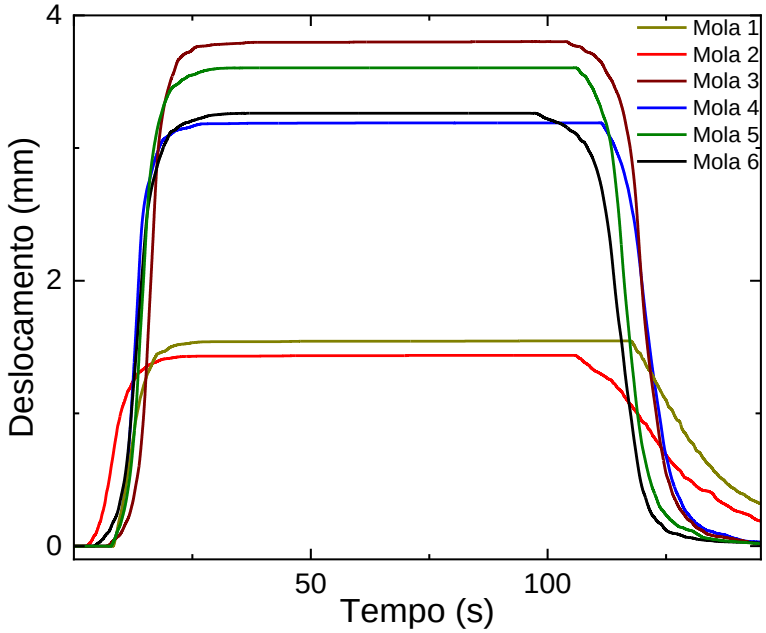


Figura 5.12 – Deslocamento x Tempo para cada mola

O período escolhido para compor os gráficos compreendeu-se entre o início do aquecimento até 25s depois da corrente voltar a 0 A. Pode-se notar que, para esse período, nas molas 1 e 2 não foi possível alcançar a estabilização da deformação no fio: isso é explicado pela baixa rigidez das duas, que exige mais tempo para executar todo movimento de volta, uma vez que a energia potencial elástica é menor que a das outras molas. Para intervalos maiores o deslocamento volta ao patamar antes do aquecimento.

O deslocamento positivo é o movimento efetuado pelo fio ao aquecer. Nessa situação o fio está recuperando sua deformação inicial e, consequentemente, diminuindo seu comprimento. Apesar de a força aumentar conforme a rigidez aumenta, isso não se traduz em aumento do deslocamento. Para essa pré-carga aplicada, a mola que apresentou maior deslocamento foi a 3 e a menor foi a 2. A mola 2 apresenta rigidez maior do que a mola 1, porém a maior força imposta ao longo do ciclo foi menor, o que, provavelmente, é fruto de uma pequena deformação na mola 1 ao ser fixada no experimento.

O deslocamento não varia linearmente, pois as molas com menores valores de rigidez são insuficientes para transformar em martensita maclada o fio SMA, assim promovendo menores valores de deslocamento. Por outro lado, as molas com maiores valores de rigidez, apesar de promover deformações suficientes para transformar em martensita de variante maclada, restringem a recuperação do fio durante o aquecimento. Desse modo, nesse estudo, as molas com valores intermediários de rigidez apresentam os melhores deslocamentos.

A Tabela 5.2 traz a variação da força para cada mola e seu deslocamento. A variação da força é medida através da diferença entre a média da força estabilizada antes do aquecimento e a média no patamar superior do ciclo. O deslocamento é quanto o sistema se moveu desde o início do aquecimento.

Tabela 5.2 – Variação da Força e Deslocamento

Mola	Variação da Força (N)	Deslocamento (mm)
1	1,91	1,54
2	2,35	1,43
3	7,15	3,8
4	9,31	3,2
5	17,09	3,6
6	27,03	3,26

A força desenvolvida em cada ciclo amplia conforme se aumenta a rigidez da mola, porém o deslocamento não. A mola 3 apresenta o maior deslocamento, ou seja, para aplicações onde se deseja o atuador mais compacto, essa seria a mola ideal.

A figura 5.13 compara o gráfico força x deslocamento para cada rigidez, com este gráfico é possível ter uma ideia qualitativa da dissipação de energia durante a atuação para cada rigidez. As linhas de cima representam o aquecimento e as de baixo o resfriamento, no sentido apontado.

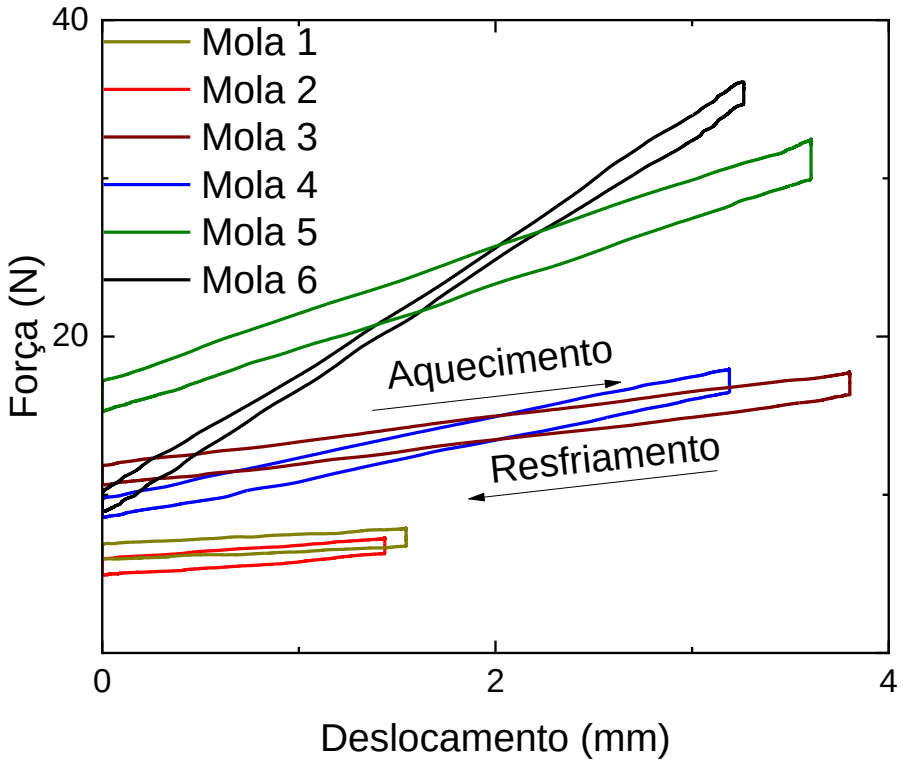


Figura 5.13 – Força x Deslocamento por Rigidez

A tabela 5.3 traz os valores de energia dissipada por ciclo, isso é feito através do cálculo da área de cada curva. A mola 5 é a que gerou a maior energia de atuação para os valores ensaiados. A mola 6 dissipa menos energia do que a mola 5, indicando que há menos transformação da fase martensítica para austenítica.

Tabela 5.3 – Energia por Rigidez

Mola	Energia (10^{-3} J)
1	1,63
2	1,49
3	4,62
4	5,58
5	8,29
6	3,64

O último gráfico analisado para estudar o deslocamento apresenta o deslocamento em função da temperatura. Diferentemente dos anteriores, este foi separado em dois objetivando a clareza dos resultados. A Figura 5.14 e 5.15 contém estes gráficos.

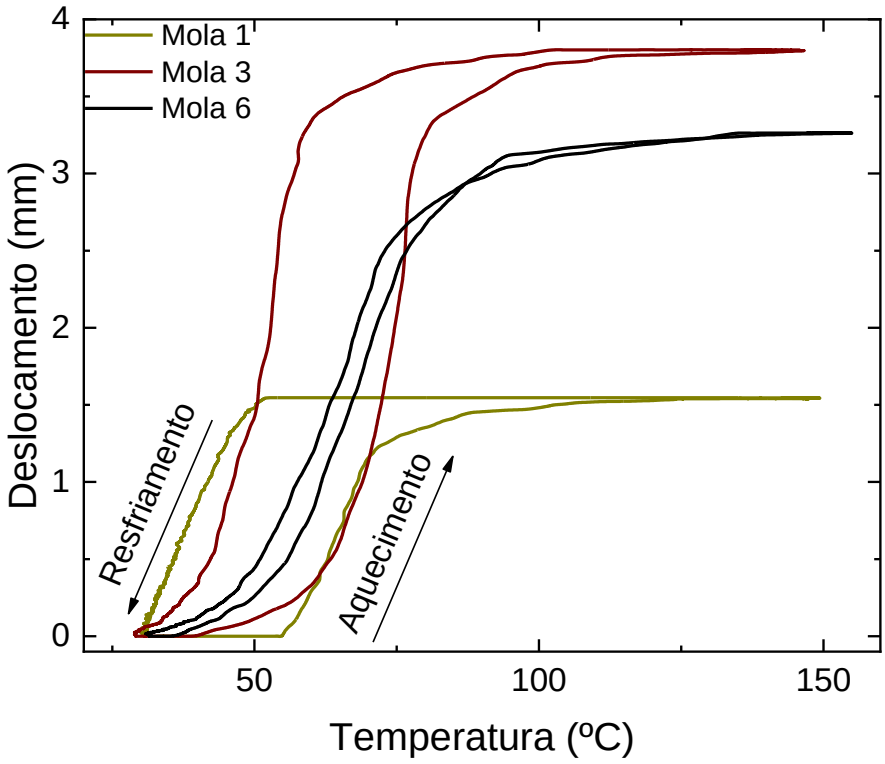


Figura 5.14 – Deslocamento x Temperatura: Mola 1, 3 e 6

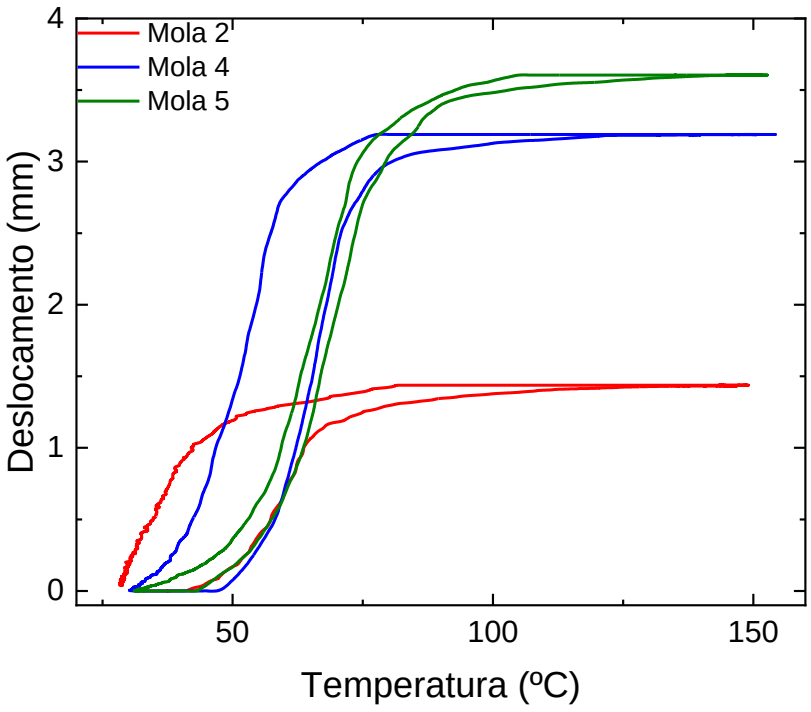


Figura 5.15 – Deslocamento x Temperatura: Mola 2, 4 e 5

Quanto maior a rigidez da mola, menor é a distância entre a curva de aquecimento e de resfriamento. Isto é consequência da mudança das temperaturas de transformação de fase sob tensão, dessa forma, a curva de resfriamento desloca-se para direita conforme se aumenta a rigidez e a maior inclinação do aquecimento acaba em temperaturas mais altas. Esse comportamento está de acordo com o esperado.

A deformação durante os ciclos de atuação ajuda a entender um pouco melhor qual a provável fase constituinte do SMA. Da mesma maneira que os gráficos de deslocamento e força, a deformação do último ciclo é plotada em função do tempo e comparada para cada rigidez da mola. Esse resultado é ilustrado na Figura 5.16.

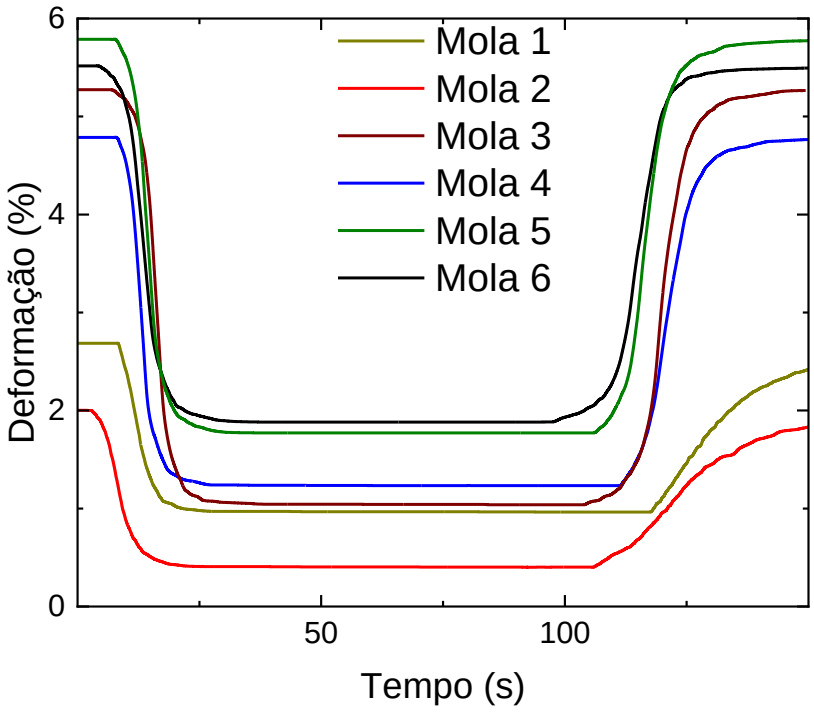


Figura 5.16 – Deformação x Tempo para cada mola

A deformação positiva significa que o fio está alongado. Quando aquecido, parte desse alongamento é recuperado e, assim, move o sistema. Como visto na Figura 5.16, em nenhum dos casos o fio volta ao comprimento livre deformação, uma vez que em nenhum momento há ausência de forças, sempre há deformação referente à tensão aplicada.

5.3 Efeito da pré-carga

Uma vez que a deformação que cada mola impõe ao fio SMA depende da rigidez da mola e do deslocamento recuperado pelo fio, três pré-cargas – 20 N, 30N e 40N – são aplicadas para cada uma das molas como condição inicial, em seguida são feitos ensaios iguais ao para verificar a influência da rigidez. Assim, a Figura 5.17 apresenta o deslocamento absoluto, do último ciclo, para cada mola e cada pré-carga.

No gráfico da Figura 5.17 (a) e (b), é visto que a variação de deslocamento aumenta conforme intensifica-se a pré-carga. Logo, para molas onde a rigidez não é suficiente para alcançar o deslocamento desejado, é possível aumentar a deformação inicial no SMA para estender o deslocamento, porém é mais eficiente aumentar a rigidez da mola.

A mola 3, Figura 5.17 (c) apresenta deslocamento máximo quando imposta a uma pré-carga de 40 N e mínimo de 30 N. De acordo com a caracterização feita do SMA empregado (gráfico força *versus* deslocamento da Figura 4.2) e comparando com o gráfico da Figura 5.18 (c), há transformação completa para martensita não-maclada para os três casos ao fim de cada ciclo. Visto que a força no fio após o aquecimento e a temperatura ambiente corresponde a variante martensítica não-maclada. Apesar de haver perda de deslocamento para o caso de 30N, o gráfico de deformação apresentado na Figura 5.19 encontra-se em acordo com o comportamento termodinâmico esperado.

A mola 4, Figura 5.17 (d), apresenta comportamento semelhante ao anterior, porém somente caso de 40 N de pré-carga aparenta ter apenas martensita não-maclada ao fim de cada ciclo. Com 20 N e 30 N é provável que a mola não tenha exercido força suficiente para transformar completamente por tensão e, assim, exista mistura de martensita maclada e não-maclada, a força ao fim do ciclo apresentada na Figura 5.18 (d) reforça essa hipótese.

As molas 5 e 6 não apresentam variação significativa do deslocamento entre as pré-cargas, como visto na Figura 5.17 (e) e (f). Este comportamento acontece porque a rigidez dessas molas é suficiente para transformar completamente em martensita não-maclada o fio com memória de forma e a temperatura é suficiente para transformar totalmente em austenita.

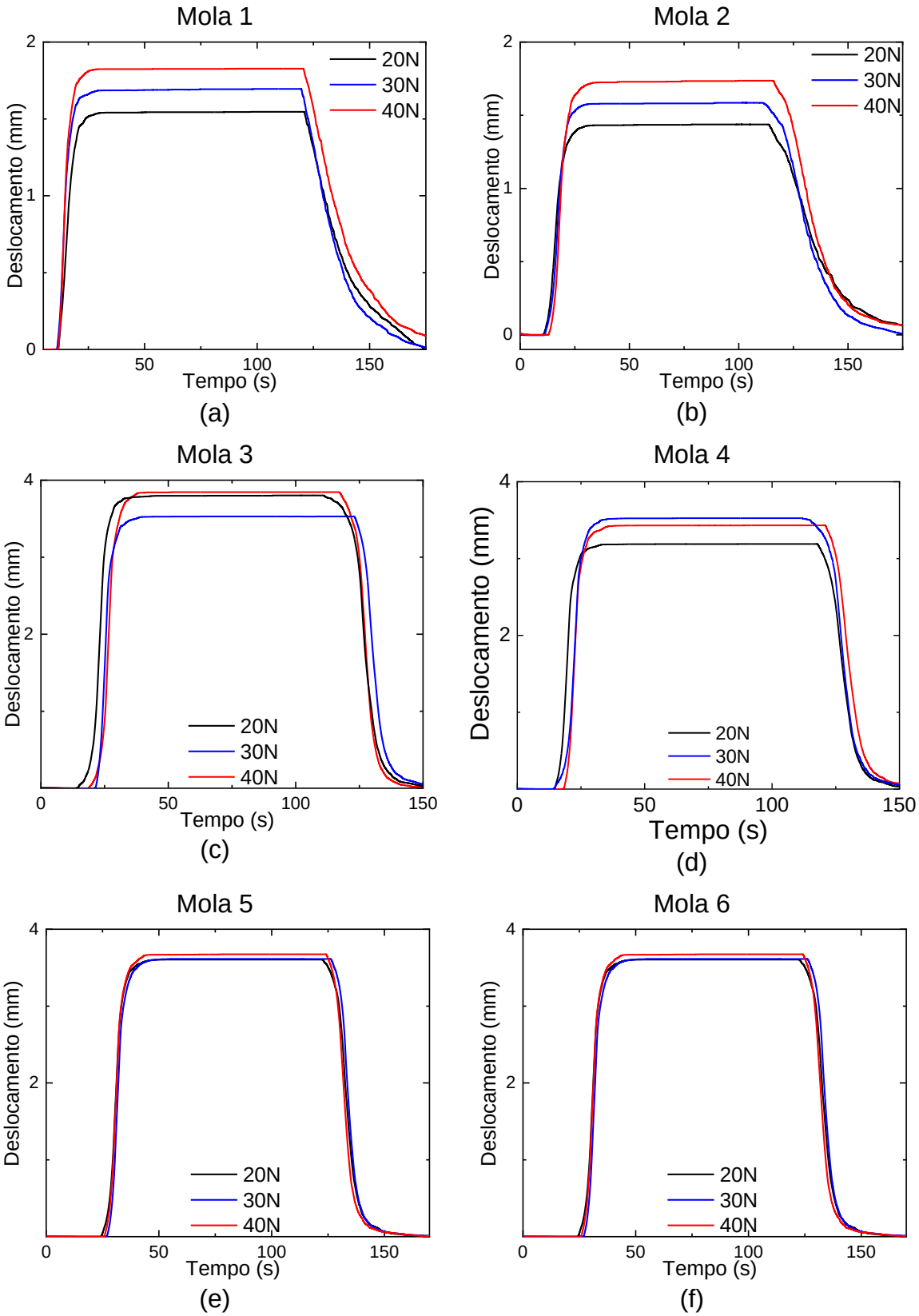


Figura 5.17 – Estudo da Pré-Carga: Deslocamento (a) Mola 1 (b) Mola 2 (c) Mola 3 (d) Mola 4 (e) Mola 5 (f) Mola 6

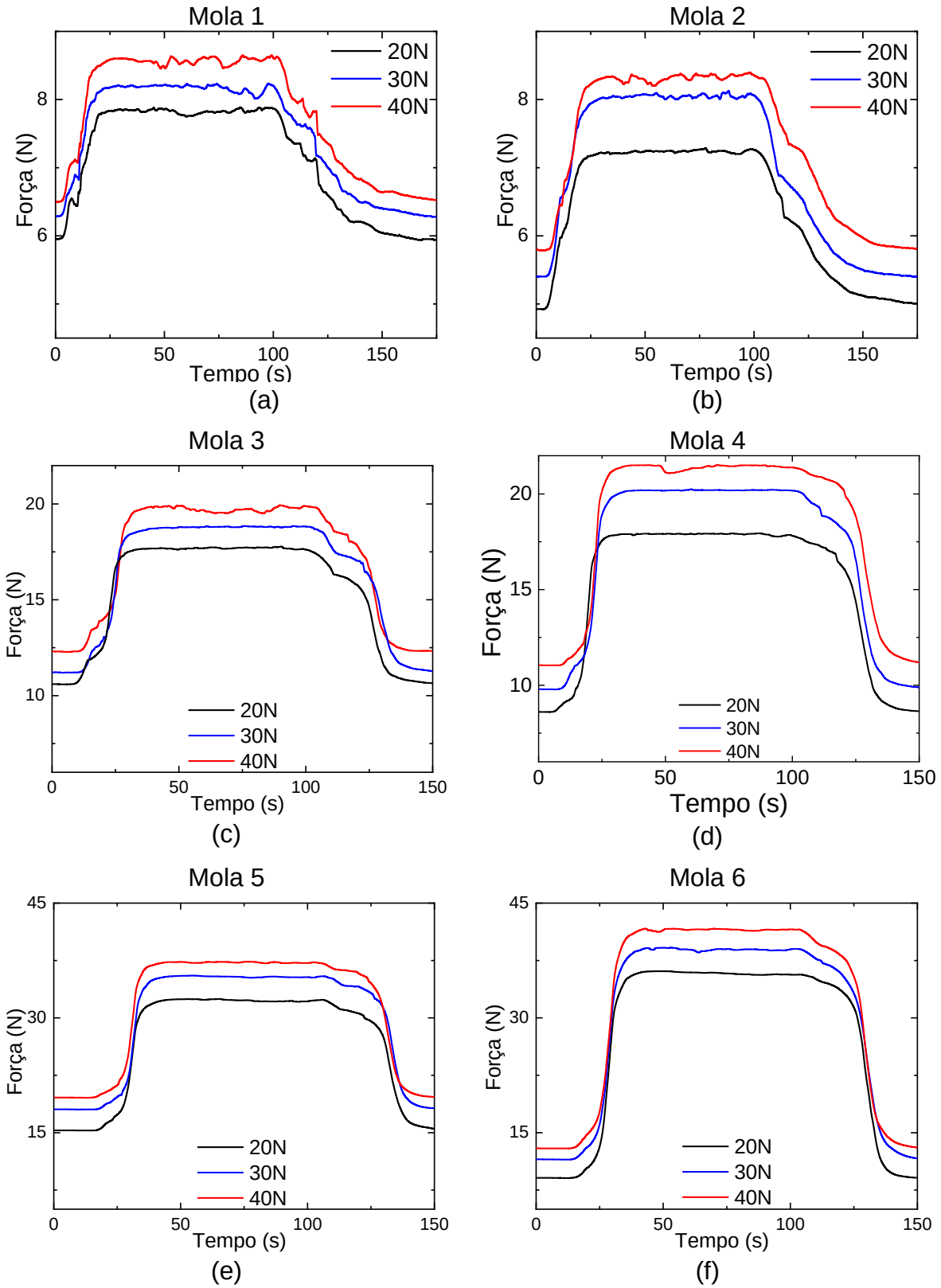


Figura 5.18 – Pré-Carga: Força (a) Mola 1 (591N/m), (b) Mola 2 (928N/m), (c) Mola 3 (1496N/m), (d) Mola 4 (2560N/m), (e) Mola 5 (4430N/m) e (f) Mola 6 (8670N/m)

A Figura 5.18 traz as curvas de força em função do tempo. Em todos os casos a variação da força de atuação aumentou conforme aumentou-se a deformação inicial do fio com memória de forma.

A Figura 5.19 traz o laço de histerese Deformação x Temperatura para cada caso. Nos gráficos, os ciclos ocorrem no sentido horário, portanto conforme aumenta-se a pré-deformação imposta, a curva que representa a recuperação do fio se desloca para direita, indicando que é necessário temperaturas mais altas para dar início a transformação austenítica, assim como as curvas de deformação ao resfriar se deslocam também para direita, já que os níveis de força são mais altos e, assim, transformando para martensita em temperaturas mais altas.

Outro ponto interessante a destacar é que as molas 1 e 2 apresentam pouca ou nenhuma transformação em martensita não-maclada, já as molas 3 e 4 tem um comportamento intermediário que depende da pré-carga e, por fim, as molas 5 e 6 são capazes de transformar por completo em martensita não-maclada para as três pré-cargas estudadas.

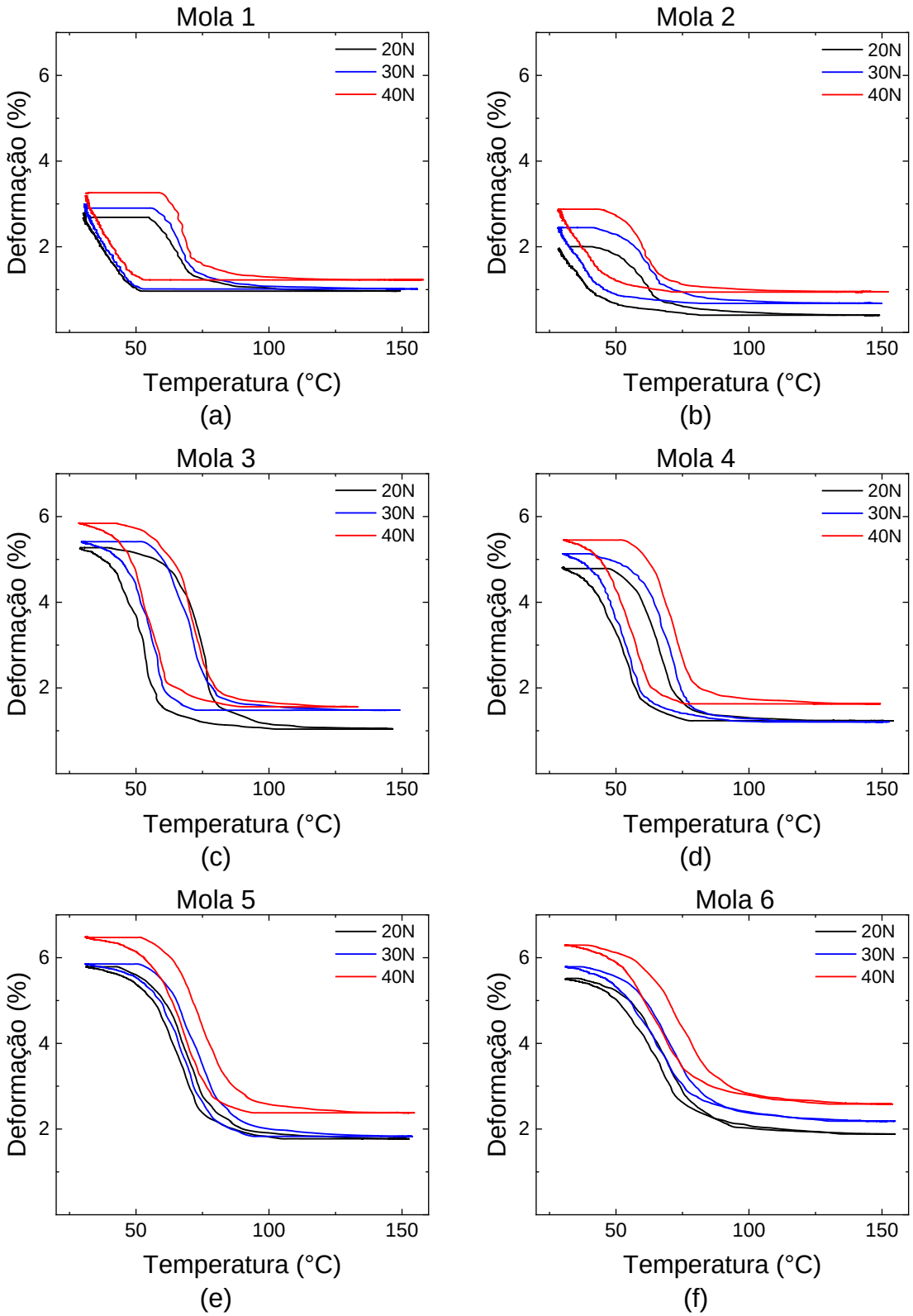
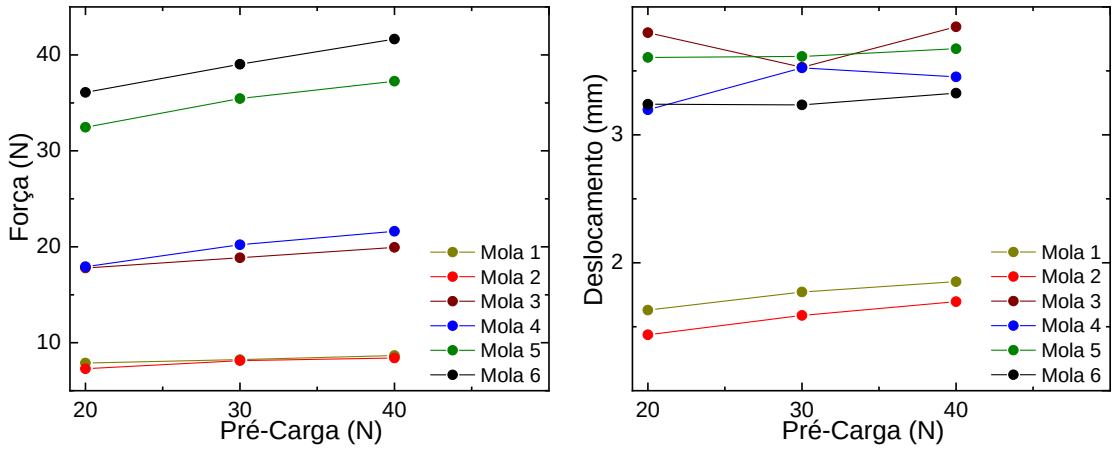


Figura 5.19 – Pré-Carga: Deslocamento x Temperatura (a) Mola 1 (591N/m), (b) Mola 2 (928N/m), (c) Mola 3 (1496N/m), (d) Mola 4 (2560N/m), (e) Mola 5 (4430N/m) e (f) Mola 6 (8670N/m)

O gráfico da Figura 5.20 apresenta um resumo do comportamento da força máxima e do deslocamento para cada mola e cada pré-carga estudada nesta seção. Dessa forma, é visto que conforme aumenta ou a rigidez da mola empregada ou a pré-carga aplicada, a força atuada também aumenta. Por outro lado, o deslocamento máximo não é alcançado nos casos extremos, mas sim para algumas condições. No arranjo em estudo o deslocamento máximo ocorre quando a mola 3 possui pré-carga de 20N ou de 40 N e a mola 5 se aproxima desses casos em todas as pré-cargas.



(a) (b)

Figura 5.20 - Resultados da Pré-Carga: (a) Força x Pré-Carga (b) Deslocamento x Pré-Carga

5.4 Efeito da Corrente Elétrica

O último parâmetro estudado é a variação do valor máximo da corrente elétrica para três molas. Os valores de corrente empregados são: 0,5 A; 0,75 A; 1,0 A; 1,25 A e 1,5 A. Foram selecionadas as molas 2, 3 e 6, com o objetivo de estudar uma mola com rigidez baixa, uma intermediária e outra com alta rigidez.

O ensaio completo para cada mola é apresentado na Figura 5.21. Nesse gráfico há a variação da força, do deslocamento e da temperatura ao longo do

tempo. Cada corrente foi ensaiada em cinco ciclos e separado no gráfico, o aumento de temperatura aparenta parar de influenciar na variação de força e deslocamento de 1,0 A em diante para a mola 2 – Figura 5.21 (a) – e em 1,25 A para a mola 3 – Figura 5.21 (b).

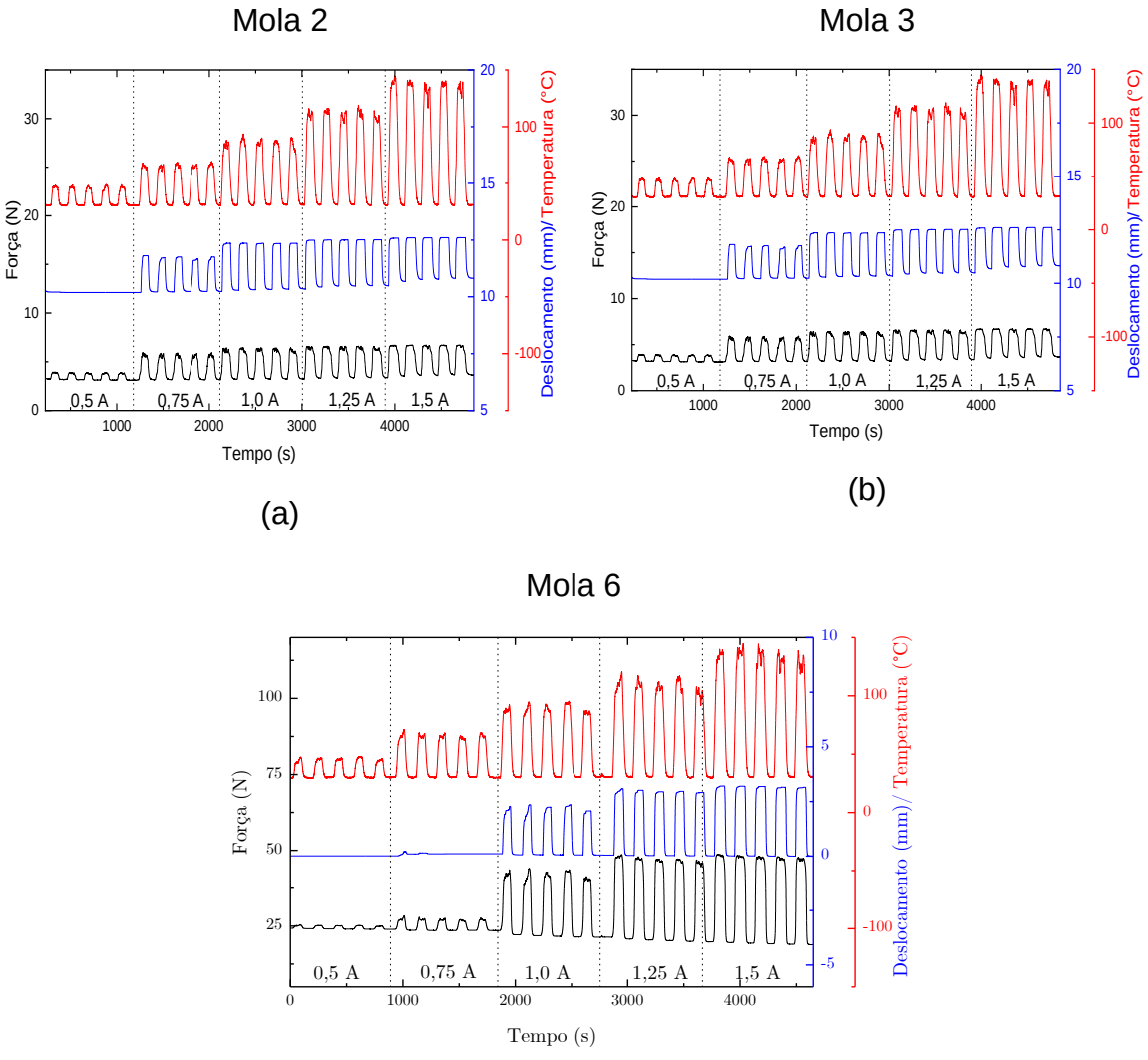


Figura 5.21 – Ensaio de Corrente Elétrica – Força, Deslocamento e Temperatura no Tempo: (a) Mola 2; (b) Mola 3 e (c) Mola 6

A mola 6 é a mais rígida e, diferentemente das anteriores, só há deslocamento a partir de 1,0 A e o deslocamento máximo alcançado ocorre para

a maior corrente elétrica, Figura 5.21 (c). Não é possível, neste momento, afirmar se este é o maior deslocamento que pode ser alcançado para essas condições mecânicas, pois este fio não trabalha – sem perda significativa de suas propriedades termomecânicas – para corrente elétrica acima deste valor.

O deslocamento, a força e a deformação para cada corrente da mola 2 são apresentados na Figura 5.22. O deslocamento mostrado é a variação de quanto o sistema andou entre o começo e o final do ciclo. Para esta mola, só há deslocamento a partir da corrente de 0,75 A e, a partir de 1,0 A, é visto que não ocorre grande variação da força máxima. Contudo, o deslocamento de 1,5 A é menor que os dois casos anteriores, este é um problema de estabilização, ou seja, para o tempo em que se manteve o sistema em baixa temperatura, a mola não acabou de executar todo o deslocamento capaz durante o resfriamento.

Esse comportamento é comprovado através da deformação, onde é visto que para a temperatura mais alta, a deformação durante o aquecimento é menor que nos outros casos. Além disso, é notório que, para cada temperatura diferente, a deformação durante o ciclo é inferior ao anterior. Para esta mola, a corrente de 1,0 A é suficiente para alcançar o deslocamento máximo e com menor tempo de retorno.

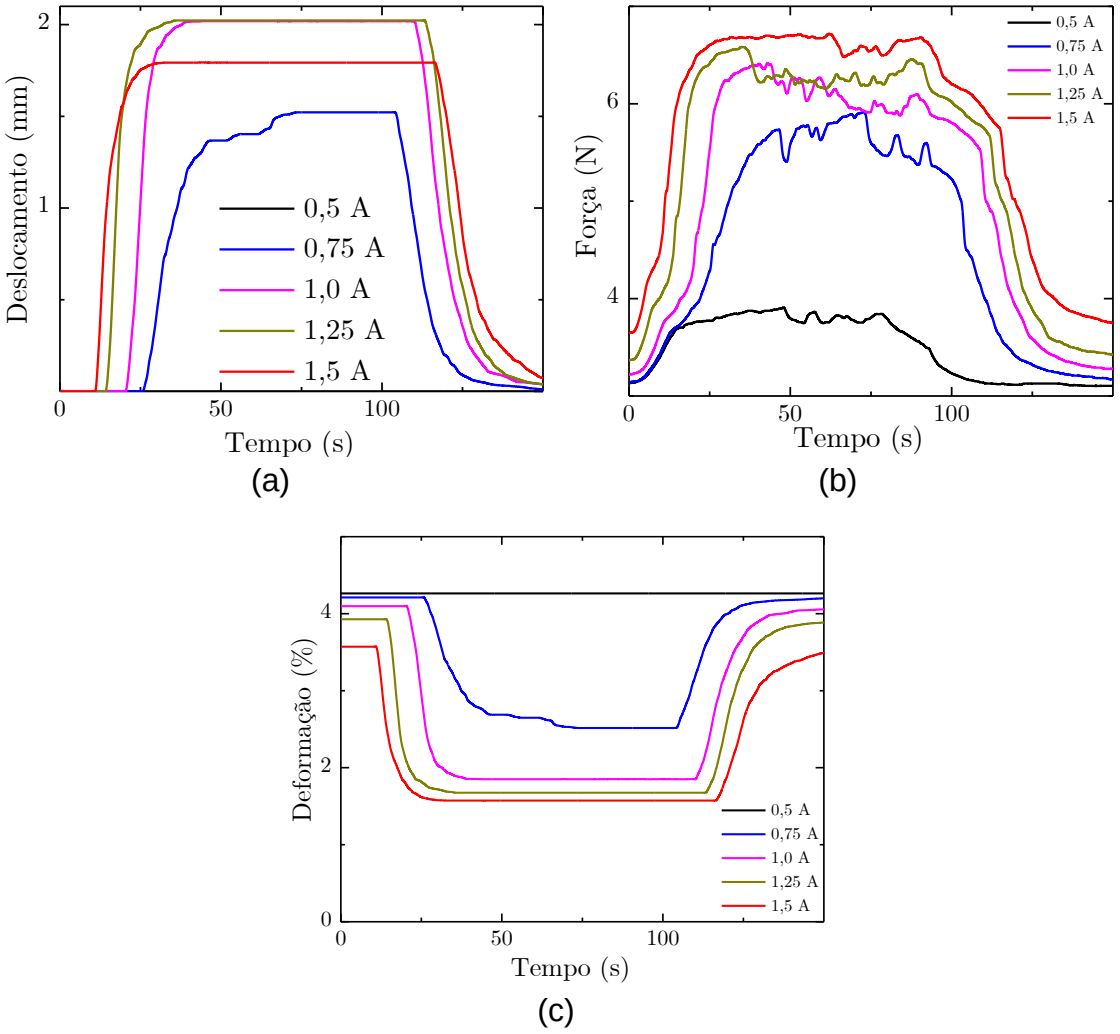


Figura 5.22 – Ensaio para diferentes valores de Corrente elétrica para a Mola 2: (a) Deslocamento x Tempo; (b) Força x Tempo (c) Deformação x Tempo

Dessa forma, a Figura 5.23 traz algumas curvas da mola 3, a Figura 5.23 (a) mostra que a estabilização da variação de deslocamento ocorre a partir de 1,25 A de corrente, apesar da temperatura alcançada por 1,0 A apresentar comportamento bem próximo aos posteriores – 0,1 mm a menos. De acordo com o gráfico da Figura 5.23 (b), a variação de força se estabiliza a partir de 1,0 A. Diferentemente da Mola 2, as curvas de deformação possuem deformação máxima e mínima iguais para as três correntes mais altas, com deformação recuperada máxima menor para 1,0 A. Este comportamento indica que o ponto

em torno do qual o carrinho oscila não se altera conforme aumenta-se a temperatura.

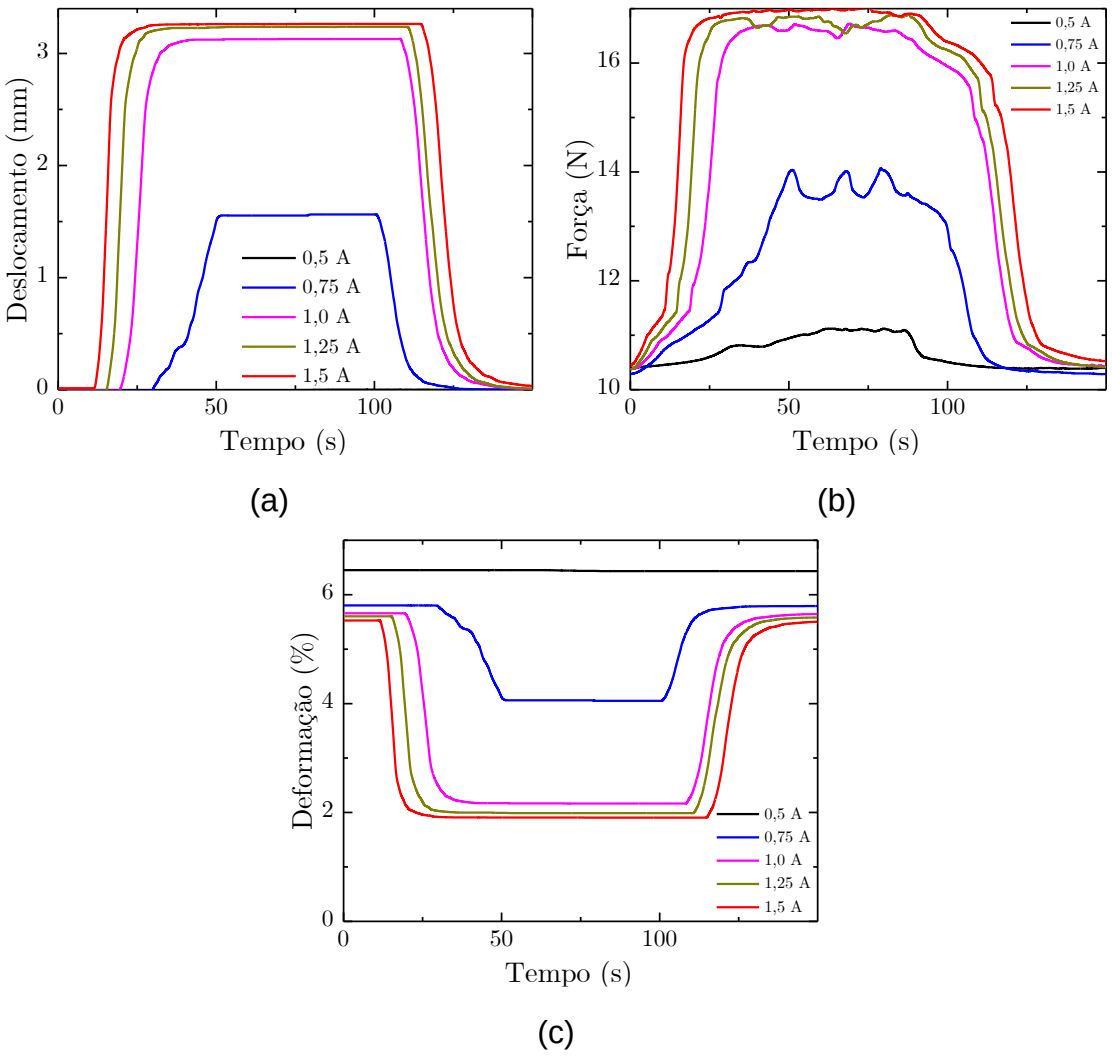


Figura 5.23 – Ensaio para diferentes valores de Corrente elétrica para a Mola 3: (a) Deslocamento x Tempo; (b) Força x Tempo; (c) Deformação x Tempo

A Figura 5.24 apresenta os gráficos de deslocamento, força e deformação em função do tempo, para o último ciclo de cada corrente da mola 6. Só é percebido deslocamento para corrente a partir de 1,0 A e não é possível afirmar se houve deslocamento máximo para a temperatura atingida com 1,5 A. Porém, do gráfico de força, pode-se concluir que é possível ou ter alcançado o

deslocamento máximo para esses parâmetros termomecânicos ou estar bem próximo desta temperatura, uma vez que o patamar de força máxima para 1,25 A e 1,5 A são bem próximos. O gráfico da Figura 5.24 (c) demonstra que esta mola é suficientemente rígida para igualar a pré-deformação inicial e transformar-se em martensita não-maclada completamente.

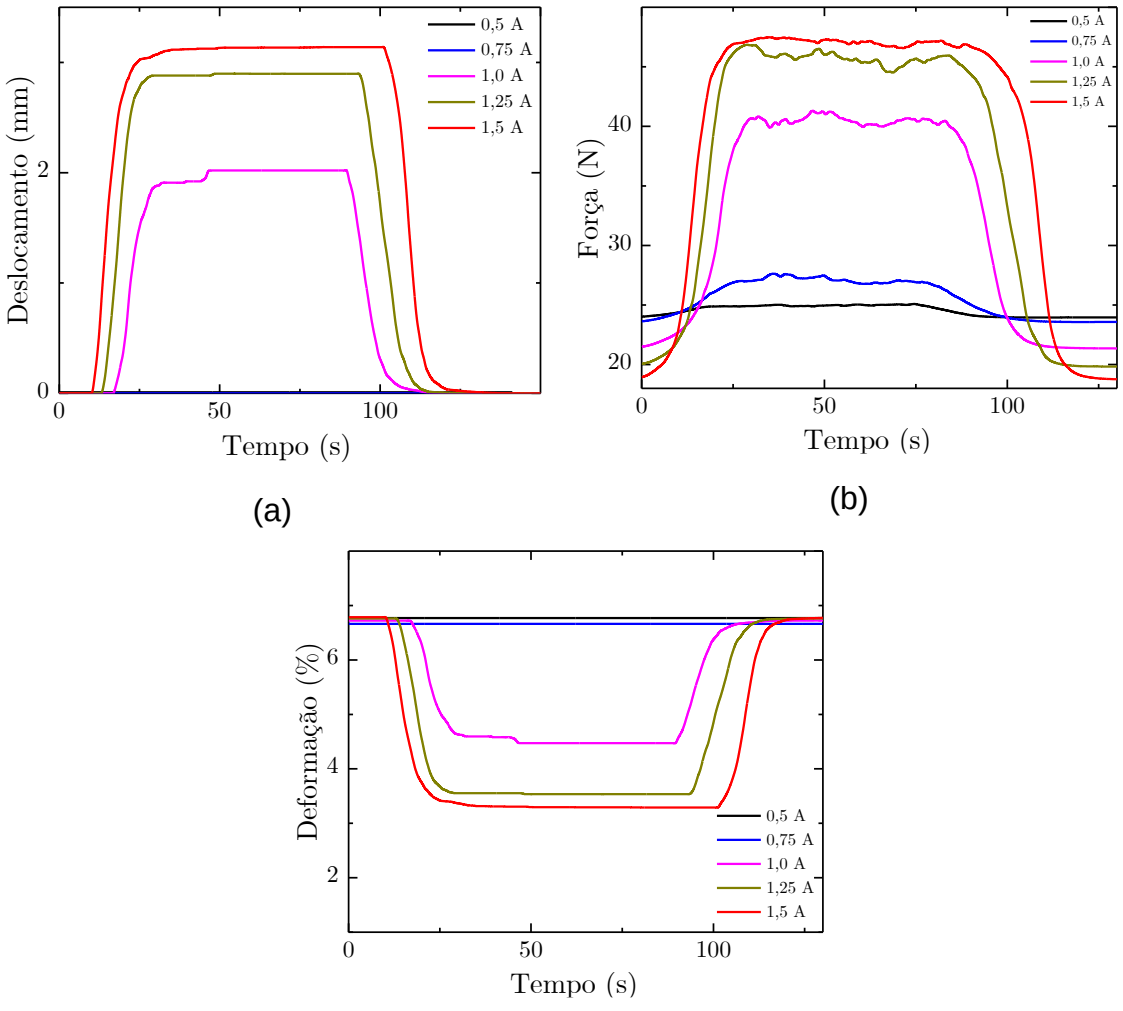


Figura 5.24 – Ensaio para diferentes valores de Corrente elétrica para a Mola 6: (a) Deslocamento x Tempo; (b) Força x Tempo; (c) Deformação x Tempo

A Figura 5.25 expões os laços de histerese para a deformação e deslocamento em função da temperatura. O gráfico da Figura 5.25 (a) indica

estabilização da energia dissipada da mola 2 a partir de 1,0 A, com a ressalva mencionada anteriormente para a curva de 1,5 A. As temperaturas máximas para as correntes são: 48 °C, 69 °C, 90 °C, 114 ° C e 140 °C.

Para a mola 3 não houve alteração significativa dos pontos de equilíbrio entre os ciclos, portanto não há mudança considerável da posição entre as curvas de 1,0 A, 1,25 A e 1,5 A – Figura 5.26 (c) e (d). As curvas de 0,75 A indicam transformação parcial, já a de 1,0 A sugere que houve transformação bem próxima do máximo para estas condições estudadas, quando comparada às curvas de 1,25 A e 1,5 A. As temperaturas máximas para cada caso foram: 51 °C, 73 °C, 89 °C, 118 °C e 137 °C.

A Figura 5.25 (e) e (f) apresentam essas curvas para a mola 6, e pode ser visto que a forma da curva de 1,5 A se assemelha à das molas anteriores quando especulado que há o máximo de transformação por temperatura, a curva de 1,25 A indica que há transformação parcial. Comparando os laços de histerese de cada mola e para cada temperatura é observado que o esperado acontece, ou seja, quanto maiores as tensões aplicadas, maior é a temperatura necessária para o início da transformação em austenita. As temperaturas alcançadas foram: 46 °C, 68 °C, 87 ° C, 118 ° C e 141 °C.

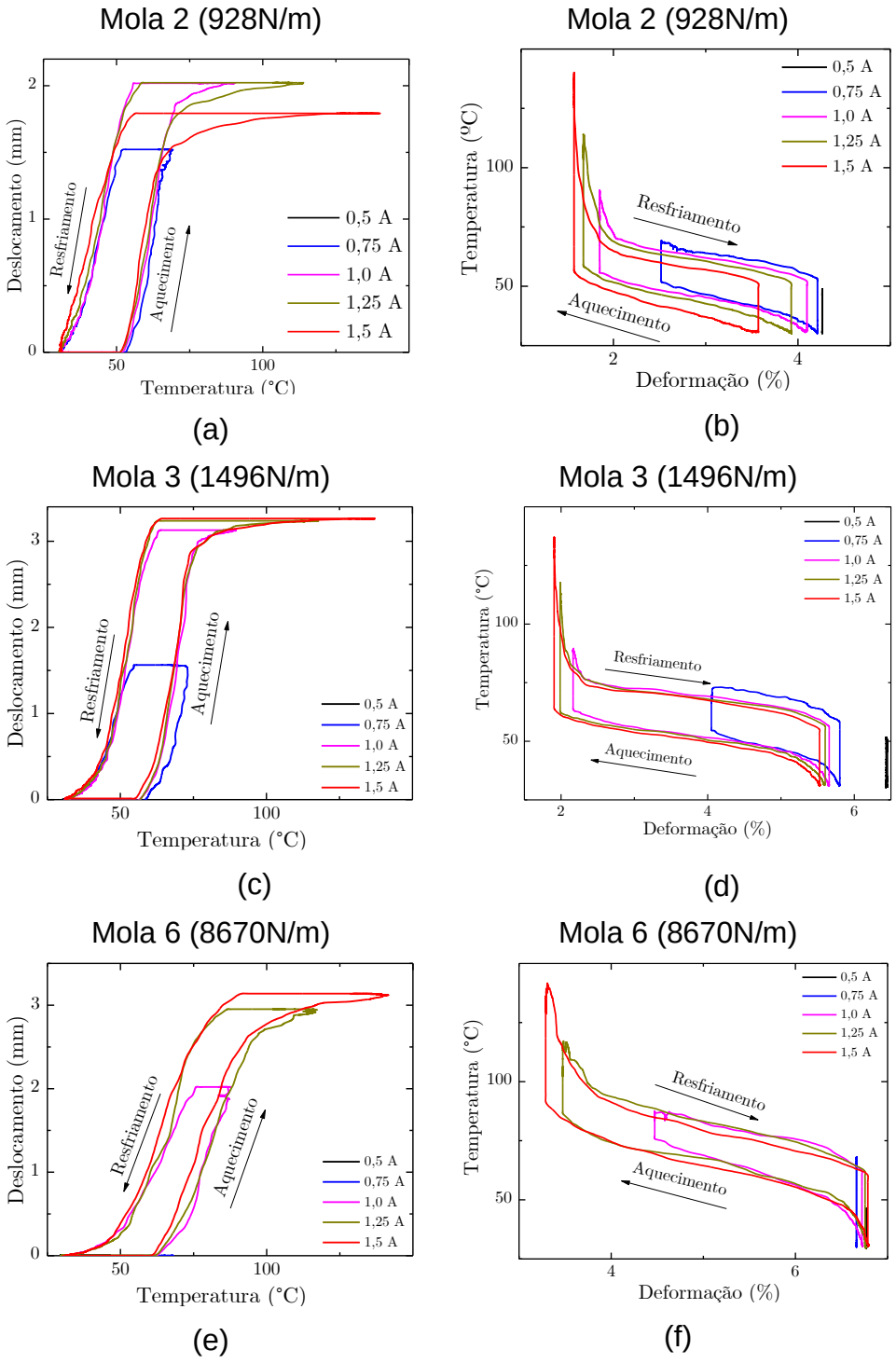
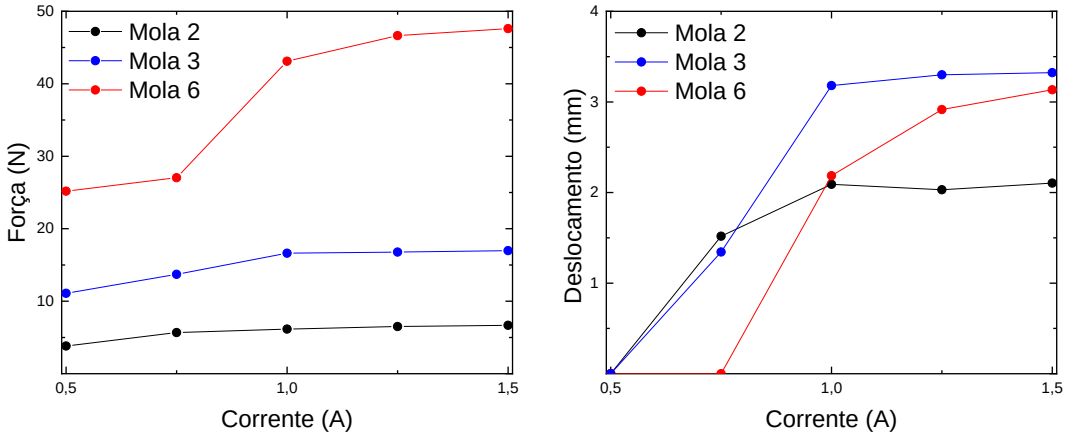


Figura 5.25 – Ensaio para diferentes valores de Corrente Elétrica (a) Deslocamento x Temperatura: Mola 2; (b) Temperatura x Deformação: Mola 2; (c) Deslocamento x Temperatura: Mola 3; (d) Temperatura x Deformação: Mola 3; (e) Deslocamento x Temperatura: Mola 6 e (f) Temperatura x Deformação: Mola 6

Por fim, a Figura 5.26 compila os valores de deslocamento máximo e força máxima para os valores de corrente elétrica estudadas nesta seção. Deste modo, tanto o gráfico de força como o de deslocamento demonstram que a mola 2 necessita do menor valor de corrente elétrica (1,0A) para alcançar próximo ao valor de deslocamento máximo. Por outro lado, o arranjo com a mola 6 necessita do maior aporte térmico para atingir o seu maior deslocamento, 1,5 A, que ainda sim é menor do que apresentado para a mola 2. Esses resultados comprovam que para otimizar este atuador é necessário projetá-lo para cada circunstância de trabalho.



(a) (b)

Figura 5.26 – Resultado em função da corrente (a) Força x Corrente (b) Deslocamento x Corrente.

6. Conclusão

Atuadores são empregados em diversos sistemas que necessitam transmitir força e deslocamento. Para tal, diversas soluções são empregadas e, dentre elas, os atuadores com memória de forma ganham espaço como solução de projetos que requerem miniaturização e buscam a redução de seu peso. Desta forma, para selecionar a melhor configuração é necessário estudos exaustivos do comportamento de diferentes arranjos.

Neste trabalho foi investigado experimentalmente o comportamento termomecânico de atuadores lineares com liga de memória de forma *bias-spring.* Assim, é confeccionado um aparato capaz de medir o deslocamento e a força deste atuador durante ciclos termomecânicos distintos. Além disso, foi avaliado como este arranjo responde ao variar a rigidez da mola, o estado de deformação inicial do fio SMA, a corrente elétrica máxima aplicada e a taxas de aquecimento distintas.

Os resultados experimentais obtidos na investigação da influência da taxa de aquecimento empregada nos ciclos termomecânicos mostram que a mesma não influencia no deslocamento máximo alcançado ou na força máxima de atuação. Por outro lado, para cada uma das rigidezes estudadas foi encontrado um valor diferente de corrente elétrica necessária para deslocar completamente o sistema.

Além disso, é notória a influência da rigidez da mola empregada e da pré-deformação do fio SMA no deslocamento máximo alcançado, no sistema montado a mola com rigidez de 1496 N/m apresentou o maior deslocamento e para as pré-cargas de 20 N e 40 N. A força de atuação no sistema aumentou conforme se aumenta o valor de rigidez da mola ou a pré-deformação inicial do fio SMA. Por fim, as molas com valores intermediários de rigidez apresentaram comportamentos mais distintos em relação aos casos extremos que constataram respostas mais previsíveis.

A influência da rigidez da mola empregada é notória e não segue um padrão linear no aspecto do deslocamento. Mais especificamente, conforme a rigidez da mola aumenta a força de atuação aumenta, porém, o deslocamento máximo é alcançado para os valores intermediários de rigidez em estudo. Do ponto de vista de projeto, a rigidez deve ser selecionada levando em conta os níveis de força desejado e o volume total que se deseja.

O aumento da pré-deformação no fio SMA eleva a força de atuação, o que pode vir a ser empregado como ajuste fino de um atuador qualquer. Já no deslocamento, seu efeito é pouco evidenciado para as duas molas mais rígidas.

O último parâmetro em estudo é a corrente elétrica, sendo este o mais importante para sistemas de controle. Desse modo, ao projetar sistema onde o controle é feito pela força atuada, a mola mais rígida apresenta a maior amplitude de força, sendo ideal para sistemas onde é necessária maior variação de força. Quando o foco é o deslocamento, a mola com maior rigidez é a ideal para controle preciso em deslocamentos mais altos e a intermediária para deslocamentos menores, tendo em vista que a primeira apresenta mais pontos para os maiores deslocamentos e a segunda para menores.

Para continuidade desta pesquisa algumas sugestões são pertinentes. Para o mesmo arranjo investigado pode ser realizado a influência de fios com memória de forma com diferentes diâmetros, comprimentos e composição química. Ainda, pode ser estudado outros arranjos lineares como, por exemplo, o antagônico. Além disso, com os dados compilados neste trabalho, pode ser feita uma correlação numérico experimental com base em algum modelo constitutivo para SMA.

7. Referências Bibliográficas

ANDRIANESIS, K.; KOVEOS, Y.; NIKOLAKOPOULOS, G.; TZES, A. Experimental study of a shape memory alloy actuation system for a novel prosthetic hand. In: **Shape Memory Alloys**. InTech, 2010.

BAÊTA-NEVES, Alessandro P.; SAVI, Marcelo A.; PACHECO, Pedro MCL. On the Fremond's constitutive model for shape memory alloys. **Mechanics Research Communications**, v. 31, n. 6, p. 677-688, 2004.

BANDEIRA, E. L.; SAVI, M. A.; DA CAMARA MONTEIRO, P. C.; NETTO, T. A. Finite element analysis of shape memory alloy adaptive trusses with geometrical nonlinearities. **Archive of Applied Mechanics**, v. 76, n. 3-4, p. 133, 2006.

BUTERA, F.; CODA, A.; VERGANI, G.; SPA, S. G. Shape memory actuators for automotive applications. **Nanotec IT newsletter. Roma: AIRI/nanotec IT**, p. 12-6, 2007.

CHABOCHE, Jean-Louis. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. **International journal of plasticity**, v. 24, n. 10, p. 1642-1693, 2008.

CHILDS, Peter RN. **Practical temperature measurement**. Elsevier, 2001.

DE ALMEIDA OLIVEIRA, Sergio. **MODELAGEM TERMOMECÂNICA DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA EM UM CONTEXTO TRIDIMENSIONAL**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DE OLIVEIRA, S.; SILVA, S. A.; SOUTO, C. R.; RIES, A. Experimental Characterization and Control of a Force Actuator Based on Shape Memory Alloy Wire. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, p. 1-7, 2018.

DE PAIVA, Tamara Leite. **ANÁLISE NUMÉRICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA**. 2017. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

DHAKAL, B.; NICHOLSON, D. E.; SALEEB, A. F.; PADULA II, S. A.; VAIDYANATHAN, R. Three-dimensional deformation response of a NiTi shape memory helical-coil actuator during thermomechanical cycling: experimentally validated numerical model. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 9, p. 095056, 2016.

DUERIG, T. W. Applications of shape memory. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications, 1990. p. 679-691.

HUANG, W. On the selection of shape memory alloys for actuators. **Materials & design**, v. 23, n. 1, p. 11-19, 2002.

IKUTA, Koji. Micro/miniature shape memory alloy actuator. In: **Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on**. IEEE, 1990. p. 2156-2161.

JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A.; GIBSON, M. A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 56, p. 1078-1113, 2014.

JANI, J. M.; HUANG, S.; LEARY, M.; SUBIC, A. Numerical modeling of shape memory alloy linear actuator. **Computational Mechanics**, v. 56, n. 3, p. 443-461, 2015.

LAMBERT, Tyler Ross; GURLEY, Austin; BEALE, David. SMA actuator material model with self-sensing and sliding-mode control; experiment and multibody dynamics model. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 3, p. 035004, 2017.

LEAL, Pedro BC; SAVI, Marcelo A. Shape memory alloy-based mechanism for aeronautical application: Theory, optimization and experiment. **Aerospace Science and Technology**, v. 76, p. 155-163, 2018.

LIANG, C.; ROGERS, C. A. Design of shape memory alloy actuators. **Journal of Mechanical Design**, v. 114, n. 2, p. 223-230, 1992.

MA, Huilong. **Thermal modeling of shape memory alloy wire actuators for automotive applications**. 2010. Dissertação de Mestrado. University of Waterloo.

MAVROIDIS, Constantinos; PFEIFFER, Charles; MOSLEY, Michael. Conventional actuators, shape memory alloys, and electrorheological fluids. 1999.

MOHD JANI, Jaronie; LEARY, Martin; SUBIC, Aleksandar. Designing shape memory alloy linear actuators: A review. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 13, p. 1699-1718, 2017.

MONTEIRO JR, P. C. C.; SAVI, M. A.; NETTO, T. A.; PACHECO, P. M. C. A phenomenological description of the thermomechanical coupling and the rate-dependent behavior of shape memory alloys. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, n. 14, p. 1675-1687, 2009.

MONTEIRO JR, P. C.; SILVA, L. L.; NETTO, T. A.; SAVI, M. A. Experimental investigation of the influence of the heating rate in an SMA actuator performance. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 199, p. 254-259, 2013

MONTEIRO, P.C.C.; DA SILVA MONTEIRO, L.L.; SAVI, M.A.; NETTO, T.A.; PACHECO, P.M.; DE PAIVA, T. A comparative analysis of different shape memory alloy actuator configurations. Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, v. 28, p. 1415-1427, 2017.

PAIVA, A.; SAVI, M. A.; BRAGA, A. M. B.; PACHECO, P. M. C. L . A constitutive model for shape memory alloys considering tensile–compressive asymmetry and plasticity. **International Journal of Solids and Structures**, v. 42, n. 11-12, p. 3439-3457, 2005.

PAIVA, Alberto; SAVI, Marcelo Amorim. An overview of constitutive models for shape memory alloys. **Mathematical problems in engineering**, v. 2006, 2006.

PAIVA, Alberto. Modelagem do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma. **Dr. Tese, PUC-Rio, Rio de Janeiro**, 2004.

RIAGUSOFF, Ivan Ivanovitsch Thesi. Estudo de Dispositivos Pseudoelásticos para a Aplicação em Atenuadores de Vibração. **Dr. Tese, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro**, 2012.

RAO, Ashwin; SRINIVASA, Arun Ramaswamy; REDDY, Junuthula Narasimha. **Design of shape memory alloy (SMA) actuators**. Heidelberg: Springer, 2015.

RICHER, Edmond; HURMUZLU, Yildirim. A high performance pneumatic force actuator system: Part I—Nonlinear mathematical model. **Journal of dynamic systems, measurement, and control**, v. 122, n. 3, p. 416-425, 2000.

SAVI, M. A.; PAIVA, A. Describing internal subloops due to incomplete phase transformations in shape memory alloys. **Archive of Applied Mechanics**, v. 74, n. 9, p. 637-647, 2005.

SHAW, John A.; KYRIAKIDES, Stelios. Thermomechanical aspects of NiTi. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 43, n. 8, p. 1243-1281, 1995.

SURESH, S. Fatigue of materials (Cambridge solid state science series). **Cambridge: Press Syndicate of the University of Cam-bridge**, 1991.

WADA, Kiyohide; LIU, Yong. Two-way memory effect in NiTi shape memory alloys. In: **Advances in Science and Technology**. Trans Tech Publications, 2008. p. 77-85.