



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

ROANA D'ÁVILA SOUZA MONTEIRO

**CARACTERIZAÇÃO ELETROMECHANICA DE MINI MOLAS
SUPERELÁSTICAS DE NITINOL EM REGIME DE EFEITO
MEMÓRIA DE FORMA SOB CARGA CONSTANTE**

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2015

ROANA D'ÁVILA SOUZA MONTEIRO

CARACTERIZAÇÃO ELETROMECHANICA DE MINI MOLAS
SUPERELÁSTICAS DE NITINOL EM REGIME DE EFEITO
MEMÓRIA DE FORMA SOB CARGA CONSTANTE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eisenhaver de Moura Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Carlos José de Araújo

Agência Financiadora: CAPES

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2015

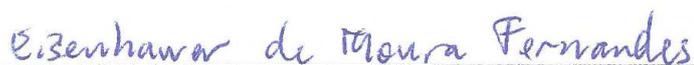
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- M776c Monteiro, Roana d'Ávila Souza.
Caracterização eletromecânica de mini molas superelásticas de nitinol em regime de efeito memória de forma sob carga constante / Roana d'Ávila Souza Monteiro. – Campina Grande, 2015.
79 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2015.
- "Orientação: Prof. Dr. Eisenhower de Moura Fernandes, Prof. Dr. Carlos José de Araújo".
Referências.
1. Ligas de Ni-Ti. 2. Mino Molas Helicoidais. 3. Superelasticidade. 4. Caracterização Eletromecânica. 5. Nitinol. I. Fernandes, Eisenhower de Moura. II. Araújo, Carlos José de. III. Título.
- CDU 669.018.2(043)

“CARACTERIZAÇÃO ELETROMECAÂNICA DE MINI MOLAS SUPERELÁSTICAS
DE NITINOL EM REGIME DE EFEITO MEMÓRIA DE FORMA SOB CARGA
CONSTANTE”.

ROANA D'ÁVILA DE SOUZA MONTEIRO

Dissertação Aprovada em 31/08/2015 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Eisenhower de Moura Fernandes

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Carlos José de Araújo

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. José Sérgio da Rocha Neto

Examinador Externo

UAEE/CEEI/UFCG



Dr. Cícero da Rocha Souto

Examinador Externo

DEE/CEAR/UFPB

Dedico este trabalho aos meus pais, Helio e
Sidony.

AGRADECIMENTOS

A Deus por guiar minha vida.

Aos meus pais dedicados, Sidony e Hélio, e a minha irmã Radharany pelo muito que sempre fizeram e ainda fazem por mim, pela educação, dedicação e amor que sempre demonstram.

Ao meu noivo, Juliano, por todo apoio, incentivo, amor e companheirismo.

Aos meus avós Nancy, Hélio e Risonete, por toda ajuda, incentivo e amor dedicado ao longo da minha vida.

A toda minha família, tios e primos, pelo apoio, incentivo e companheirismo.

Ao meu cunhado, Mateus, por todo incentivo e exemplo em dedicação e disciplina.

Aos meus cunhados, João Marcelo e Dayane, e aos meus amigos por todo apoio, incentivo e companheirismo.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho do LIEC, Aninha, Nathália, Thamiles, Maurício, Raphael, Leandro, Tony, Simões, Maria Helena, Pedro e Luís Carlos, por toda ajuda e companheirismo.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho do LaMMEA e do mestrado em engenharia mecânica, Suelene, Estephanie, Henrique, Daniela, Fernandinho, Zaca, Diego, João Vitor e PC, por toda ajuda e solidariedade.

Ao professor Carlos José de Araújo que apesar de na teoria ser co-orientador me orientou excelentemente e mesmo com suas diversas tarefas me ajudou no entendimento do assunto e na elaboração do texto.

Aos professores José Sérgio, Jaidilson e Saulo, do LIEC, pela orientação e disposição em tirar minhas dúvidas e conseguir materiais para a execução dos experimentos desse trabalho. Novamente ao professor José Sérgio por ter conseguido um local para que eu pudesse me instalar no LIEC.

Ao professor Eisenhower por ser meu orientador.

Ao órgão CAPES pelo apoio financeiro.

“Vive de tal forma que deixes pegadas luminosas no caminho percorrido, como estrelas apontando o rumo da felicidade e não deixes ninguém afastar-se de ti sem que leve um traço de bondade, ou um sinal de paz da tua vida.”

Joanna de Ângelis.

RESUMO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) constituem uma classe de materiais metálicos que possuem a capacidade de recuperar uma deformação pseudo plástica, introduzida por aplicação de carga mecânica, e retornar à sua forma original através de um simples aquecimento. O principal interesse nos atuadores de LMF utilizados no formato de molas helicoidais reside no grande deslocamento proporcionado pelo fenômeno de Efeito Memória de Forma (EMF), que permite a realização de trabalho mecânico quando este componente é submetido a diferentes condições de temperatura e cargas mecânica. No caso de elementos de LMF em estado de superelasticidade (SE) na temperatura ambiente, quando a carga mecânica é aplicada e mantida sob o material, a deformação originada pela formação de martensita induzida por tensão poderá também ser revertida por meio de um aquecimento. Nesse caso, tem-se um EMF em um elemento de LMF originalmente superelástico. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar a caracterização eletromecânica de uma mini mola superelástica de LMF Ni-Ti (Nitinol) quando submetida a um carregamento mecânico constante, avaliando a influência da taxa de variação da corrente elétrica e do aumento da carga mecânica nas temperaturas de transformação, além de determinar o comportamento do deslocamento com a variação de resistência elétrica. Para isso, foi desenvolvida uma plataforma experimental capaz de submeter a mini mola a carregamento mecânico constante (peso) e sinais de corrente elétrica variáveis com o tempo. Verificou-se que, para todas as cargas mecânicas e níveis de corrente elétrica, os resultados para a taxa de variação da corrente elétrica mais lenta (6 mA/s) apresentou uma melhor resposta em deslocamento e na variação da resistência elétrica quando comparados com a taxa mais rápida (12 mA/s), embora esta última resulte em um comportamento histerético mais estreito (resistência elétrica *versus* deslocamento). Também foi observado um aumento das temperaturas de transformação com o aumento da carga mecânica, como esperado pela lei de Clausius-Clayperon para LMF. Finalmente, foi verificada uma relação praticamente linear entre a variação do deslocamento e a variação de resistência elétrica, no aquecimento e no resfriamento.

Palavras-chave: Ligas de Ni-Ti, Nitinol, Mini molas helicoidais, Superelasticidade, Caracterização eletromecânica.

ABSTRACT

The Shape Memory Alloys (SMA) are a class of metallic materials that have the ability to recover pseudo plastic deformation introduced by the application of mechanical load, and return to original shape by heating. The main interest in the SMA actuators used in the form of coil springs lies in the large displacement provided by the shape memory effect (SME) phenomenon, which allows performing mechanical work when the component is subjected to varying conditions of temperatures and mechanical loads. In the case of SMA elements in a state of superelasticity (SE) at room temperature, when mechanical load is applied and maintained on the material, the deformation caused by the formation of stress induced martensite can be reversed by heating. In this case, we have a SME in a SMA element originally superelastic. In this context, the objective of this work is to realize the electromechanical characterization of a superelastic mini coil spring of Ni-Ti SMA (Nitinol), when subjected to a constant mechanical loading, evaluating the influence of the electric current rate, the influence of mechanical load on the phase transformation temperatures, and determining the displacement behavior to the variation of electrical resistance. For this, an experimental platform was developed to submit the mini spring under constant load (dead weight) to electric current signals varying with time. It was found that for all mechanical loads and electrical current levels, the results for the slower rate of change electrical current (6 mA/s) showed a better response in displacement and the variation in the electrical resistance when compared to faster rate (12 mA/s), although the faster rate present a narrower hysteretic behavior (electrical resistance vs displacement). There was also verified an increase in phase transformation temperatures with increased mechanical load, as expected by the Clausius-Clayperon law for SMA. Finally, a practically linear relationship was found between the change in displacement with the variation in electrical resistance, during heating and cooling.

Keywords: Ni-Ti alloys, Nitinol, Mini coil springs, Superelasticity, Electromechanical characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Curva típica de transformação de fase em função da temperatura para LMF.	18
Figura 2: Representação esquemática das estruturas martensíticas em LMF. (a) Fase martensita maclada (desorientada); (b) Fase martensita de-maclada (orientada).....	19
Figura 3: Esquema de mudança estrutural que ocorre nas ligas com memória de forma.	21
Figura 4: Esquema correspondente ao fenômeno de EMFS em uma mola.	23
Figura 5: Modelo de uma asa com flap sendo atuado por fios de LMF.	25
Figura 6: Protótipo de asa inteligente ativada por molas helicoidais de LMF.....	26
Figura 7: Protótipo de viga inteligente ativada por fios de LMF. (a) Identificação dos elementos da viga inteligente; (b) Vista de cima da viga inteligente deformada por dois atuadores de LMF.....	27
Figura 8: Protótipo de mão protética acionada por LMF.	28
Figura 9: Protótipo de mini robô lagarta.....	28
Figura 10: Diagrama do inalador inteligente (à esquerda), junta flexível superior (centro) e esquema de ativação das juntas flexíveis (à direita).....	30
Figura 11 :Evolução temporal da potência de entrada, da resistência elétrica, deformação do fio atuador de LMF, e do deslocamento da ponta do bocal para o atuador 1, a 0,2 Hz.	30
Figura 12 :Curvas de histerese para os 6 fios atuadores de LMF usados no protótipo de inalador inteligente.....	31
Figura 13: Fotografia da mini mola superelástica de LMF Ni-Ti com o comprimento útil deformável e total em destaque.	33
Figura 14: Montagem específica utilizada para o treinamento cíclico das mini molas de LMF Ni-Ti.....	34
Figura 15: Diagrama de blocos representando o esquema de funcionamento da plataforma experimental.	35
Figura 16: Imagem e respectivo esquema da estrutura mecânica com uma mini mola de LMF Ni-Ti instalada para testes.	36
Figura 17: Módulo de aquisição de dados (NI USB-6212).	36
Figura 18: Painel Frontal do programa Labview desenvolvido para a plataforma experimental.	38
Figura 19: Formas de ondas de corrente elétrica aplicadas para ativação da mini mola de LMF submetida à diferentes cargas mecânicas. a) Para 2,26 N. b) Para 1,77 N. c) Para 1,28 N.....	40
Figura 20: Resultado do ensaio de DSC para a mini mola de Ni-Ti.	42
Figura 21: Comportamento histerético do deslocamento da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis maiores de corrente elétrica.	45

Figura 22: Comportamento da resistência elétrica no tempo para a mini mola de Ni-Ti para os níveis maiores de corrente elétrica.	47
Figura 23: Comportamento da resistência elétrica e da temperatura no tempo para a mini mola de Ni-Ti para os níveis maiores de corrente elétrica.	49
Figura 24: Comportamento histerético da resistência elétrica da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis maiores de corrente elétrica.	50
Figura 25: Comportamento do deslocamento da mini mola de LMF em função da resistência para as taxas de variação de corrente elétrica de 6 e 12mA/s e níveis maiores de corrente elétrica.	51
Figura 26: Comportamento histerético do deslocamento da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis intermediários de corrente elétrica.	53
Figura 27: Comportamento da resistência elétrica no tempo para a mini mola de Ni-Ti para os níveis intermediários de corrente elétrica.	56
Figura 28: Comportamento histerético da resistência elétrica da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis intermediários de corrente elétrica.	57
Figura 29: Comportamento do deslocamento da mini mola de LMF em função da resistência para as taxas de variação de corrente elétrica de 6 e 12mA/s e níveis intermediários de corrente elétrica.	58
Figura 30: Comportamento histerético do deslocamento da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis menores de corrente elétrica.	60
Figura 31: Representação das temperaturas críticas e da histerese térmica.	63
Figura 32: Coeficiente de aumento de $M_s\sigma$ e de $A_f\sigma$ a partir de uma aproximação linear.	64
Figura 33: Comportamento da resistência elétrica no tempo para a mini mola de Ni-Ti para os níveis menores de corrente elétrica.	66
Figura 34: Comportamento histerético da resistência elétrica da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis menores de corrente elétrica.	67
Figura 35: Comportamento do deslocamento da mini mola de LMF em função da resistência para as taxas de variação de corrente elétrica de 6 e 12mA/s e níveis menores de corrente elétrica.	68
Figura 36: Relação do deslocamento em função da resistência elétrica para apenas um ciclo de trabalho termomecânico.	69
Figura 37: Protótipo de robô <i>Inchworm</i> ativado por mini molas de LMF Ni-Ti em desenvolvimento no LaMMEA/CCT/UFCG.	70
Figura 38: Diagrama esquemático de um LVDT.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores das correntes elétricas e temperaturas nas regiões de ativação e saturação para os maiores níveis de corrente elétrica e ambas taxas de variação.	44
Tabela 2: Valores de deformações termoelásticas para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os maiores níveis de corrente elétrica.	46
Tabela 3: Valores das correntes elétricas e temperaturas nas regiões de ativação e saturação para os níveis intermediários de corrente elétrica e ambas taxas de variação.	52
Tabela 4: Valores de deformações termoelásticas para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os níveis intermediários de corrente elétrica.	54
Tabela 5: Valores das correntes elétricas e temperaturas nas regiões de ativação e saturação para os menores níveis de corrente elétrica e ambas as taxas de variação de corrente.	59
Tabela 6: Valores de deformações termoelásticas para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os menores níveis de corrente elétrica.	61
Tabela 7: Temperaturas críticas, deformação termoelástica e histerese térmica das mini molas para 6 mA/s.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_f – Temperatura final de transformação de fase martensítica reversa (aquecimento)

A_s – Temperatura inicial de transformação de fase martensítica reversa (aquecimento)

C_{A_f} Coeficiente de Aumento de A_f^σ

C_{M_s} Coeficiente de Aumento de M_s^σ

di/dt – Taxa de Variação da Corrente Elétrica

DMA – Dynamic Mechanical Analyser (Analisador Dinâmico Mecânico)

DSC – Differential Scanning Calorimeter (Calorímetro Diferencial de Varredura)

DT – Deformação Termoelástica

EMF – Efeito Memória de Forma

EMFD – Efeito Memória de Forma Duplo

EMFS – Efeito Memória de Forma Simples

H_t – Histerese Térmica

LMF – Ligas com Memória de Forma

M_f – Temperatura final de transformação de fase martensítica direta (resfriamento)

M_s – Temperatura inicial de transformação de fase martensítica direta (resfriamento)

P – Força Peso

SE – Superelasticidade

SMA – Shape Memory Alloys

SUMÁRIO

1	Introdução	14
2	Objetivos	16
2.1	Geral	16
2.2	Específicos	16
3	Ligas com Memória de Forma	17
3.1	Breve Histórico	19
3.2	Transformação Martensítica	20
3.2.1	Temperaturas Críticas da transformação Martensítica	21
3.2.2	Efeito Memória de Forma (EMF)	22
3.2.2.1	Efeito Memória de Forma Simples (EMFS)	22
3.2.2.2	Efeito Memória de Forma Duplo (EMFD)	23
3.2.3	Superelasticidade (SE).....	24
3.3	Aplicações das LMF.....	24
3.3.1	Aplicações na Aeronáutica	24
3.3.2	Aplicações na Robótica	27
3.3.3	Aplicações na Medicina.....	29
4	Materiais e Métodos.....	32
4.1	Mini molas de LMF Ni-Ti	32
4.2	Treinamento Cíclico	33
4.3	Plataforma Experimental	34
4.4	Ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC).....	38
4.5	Ensaio de EMF em Tração sob Carga Constante	38
5	Resultados e Discussões.....	41
5.1	Análise Térmica via Ensaio de DSC	41
5.2	Ensaio de EMF em Tração sob Carga Constante	42
5.2.1	Para os Níveis Maiores de Corrente Elétrica	43
5.2.2	Para os Níveis Intermediários de Corrente Elétrica	51
5.2.3	Para os Níveis Menores de Corrente Elétrica	58
6	Conclusões	71
7	Sugestões para Trabalhos Futuros	73
8	Referências Bibliográficas	74
	APÊNDICE A – Circuito de Condicionamento do sinal da Corrente Elétrica na LMF (<i>Driver</i> de corrente de LMF).....	77
	APÊNDICE B – Circuito para Condicionamento do sinal do microtermopar tipo K (<i>Driver</i> de Temperatura).....	78
	APÊNDICE C – Transformador Diferencial Variável linear (LVDT)	79
	C.1 Princípio de Funcionamento	79

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial tem buscado cada vez mais componentes e materiais capazes de reduzir custos e otimizar operações. Estas melhorias vêm acontecendo por meio da redução de espaço (miniaturização), resposta mais rápida a comandos e maior rendimento energético, muitas vezes proporcionados por materiais inteligentes (JANI et al., 2014).

Nesse contexto, a versatilidade das aplicações destes materiais inteligentes, e dentre estes as Ligas com Memória de Forma (LMF), internacionalmente denominadas por SMA (*Shape Memory Alloys*), vem permitindo seu uso em inúmeros setores, tais como odontologia, medicina, robótica, aeronáutica, automotivo entre outros. A principal motivação para esta evolução está no fato destes materiais apresentarem funcionalidade como elementos sensores/atuadores. Os sistemas mecatrônicos que incorporam materiais funcionais como as LMF podem ser considerados estruturas inteligentes.

O principal interesse nos atuadores de LMF utilizados no formato de molas helicoidais reside no grande deslocamento proporcionado pelo fenômeno de Efeito Memória de Forma (EMF), que permite a realização de trabalho mecânico quando este componente é submetido a diferentes condições de temperaturas e tensões mecânicas (OLIVEIRA, 2007). Este deslocamento originado pela recuperação de uma deformação pseudo plástica em função da temperatura, correspondente ao fenômeno de EMF, tem origem em uma transformação de fase reversível, no estado sólido, que ocorre no interior do material. As LMF de Ni-Ti são as mais bem sucedidas e exploradas dentre aquelas que exibem esse fenômeno de EMF.

As LMF também apresentam um outro fenômeno, denominado de superelasticidade (SE). Nesse caso, quando o material é mantido acima de uma determinada temperatura em que uma fase correspondente a uma estrutura cúbica denominada de austenita é estável, uma outra estrutura cristalina menos simétrica (ortorrômbica ou monoclínica), denominada de martensita, pode ser induzida e revertida com o aumento e retirada da carga mecânica, originando grandes deformações reversíveis.

No caso de elementos ou componentes de LMF em estado de SE na temperatura ambiente (entre 25 °C e 30 °C), quando a carga mecânica é aplicada e mantida sob o material, a deformação originada pela formação de martensita induzida por tensão poderá ser revertida por meio de um aquecimento. Nesse caso, tem-se um EMF em um elemento de LMF originalmente superelástico e isto tem sido pouco explorado na literatura dos materiais e estruturas inteligentes. Isto ocorre por que a maioria das aplicações para LMF superelásticas é realizada na área médica e odontologia, em regime quase estático e a temperatura constante, correspondente ao corpo humano (JANI et al., 2014).

Assim sendo, neste trabalho foi estudado o comportamento eletromecânico de mini molas superelástica de LMF Ni-Ti (liga comercialmente denominada de Nitinol[®]) originalmente aplicadas na área odontológica. Para tanto, foi desenvolvida uma estrutura mecânica para compor uma plataforma experimental com o intuito de submeter mini molas de LMF Ni-Ti a cargas constantes, variando entre 130 e 230 gramas (1,28 N e 2,26N) e realizar a ativação por aquecimento resistivo (efeito Joule) controlado. Essa plataforma permite obter curvas características de resposta eletrotermomecânica sob diferentes níveis de carga constante, correspondentes aos comportamentos de deslocamento em função da corrente elétrica de ativação e da temperatura, além de resistência elétrica em função da temperatura e do deslocamento das mini molas de Nitinol.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Através deste trabalho tem-se como principal objetivo realizar a caracterização eletromecânica de mini molas superelásticas de LMF Ni-Ti (Nitinol[®]), quando submetidas à diferentes níveis de carga externa constante.

2.2 ESPECÍFICOS

No âmbito do objetivo geral, alguns objetivos específicos podem ser traçados:

- i. Construção de uma plataforma experimental para aplicar carga constante e medir deslocamentos por EMF em mini molas superelásticas de LMF Ni-Ti comercializadas para aplicações na área odontológica;
- ii. Determinação da resposta histerética das mini molas em termos de curvas características de deslocamento em função da corrente elétrica e da temperatura;
- iii. Verificar se existe uma dependência da resposta em deslocamento com relação à taxa de aquecimento resistivo;
- iv. Determinar a relação entre variação de resistência elétrica das mini molas e o seu deslocamento durante aquecimento e resfriamento.

3 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As Ligas com Memória de Forma (LMF), internacionalmente conhecidas por *Shape Memory Alloys (SMA)*, têm sido objeto de interesse em pesquisas significativas por mais de 40 anos (BUEHLER; WANG, 1968; CROSS; KARIOTIS; STIMLER, 1969; DUERIG et al., 1990; JACKSON; WAGNER; WASILEWSKI, 1972; OTSUKA; REN, 2005; OTSUKA; WAYMAN, 1998; YAMAUCHI et al., 2011). Essas LMF constituem uma classe de compostos metálicos que possuem a capacidade de recuperar uma deformação pseudo plástica, introduzida por aplicação de carga mecânica, e retornar à sua forma original através de um aquecimento acima de uma temperatura crítica. Assim sendo, estes materiais possuem uma capacidade de converter um estímulo não mecânico (elétrico, térmico) em respostas mecânicas (forças, deslocamentos).

O mecanismo de recuperação de forma ocorre por meio de uma transformação de fase conhecida por “transformação martensítica”, que no caso das LMF é reversível com a temperatura. Durante este processo verifica-se a existência de duas fases distintas, uma a baixa temperatura (martensita) e outra a temperatura mais alta (austenita). Estas fases apresentam a mesma composição química e a mudança da fase de baixa temperatura para a fase de alta temperatura, e vice-versa, ocorre sem difusão atômica (AGANUMA; YO; EKI, 1998; OTSUKA; WAYMAN, 1998).

Entre as principais LMF são citadas as de base cobre, as de base de ferro e as mais famosas e que apresentam os melhores resultados em aplicações tecnológicas, que são as ligas de base Ni-Ti (OLIVEIRA, 2007). São exemplos de LMF as ligas de Ag-Cd, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be, Cu-Sn, Cu-Zn-Al, Ni-Ti, Ni-Ti-Cu, In-Tl, Ni-Al, Fe-Pt, Mn-Cu e Fe-Mn-Si. Algumas diferenças entre as várias composições de LMF são a deformação máxima reversível, a resistência mecânica e elétrica, a facilidade ou dificuldade de transformação de fase e as temperaturas nas quais as transformações ocorrem. As aplicações com as LMF de base Ni-Ti são as mais versáteis, apresentando maior capacidade de carga e deformação recuperável.

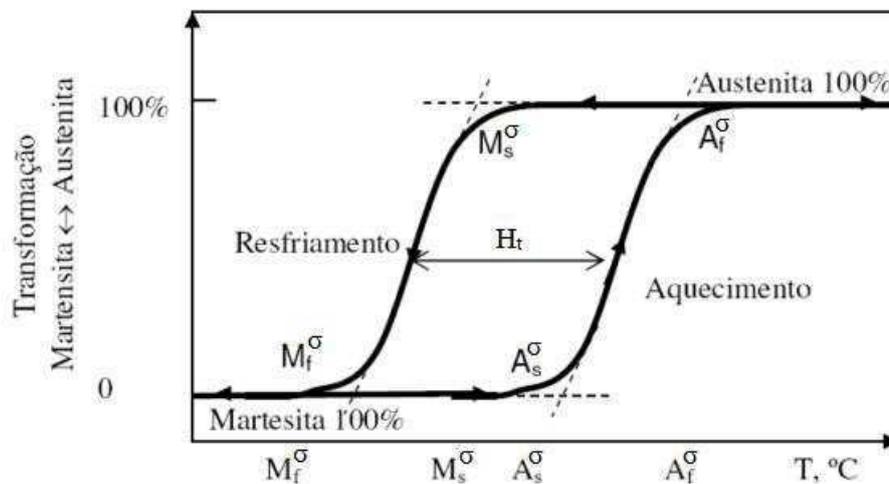
A relação entre as fases austenita e martensita é caracterizada por um laço de histerese e pelas temperaturas críticas de transformação de fase, conforme ilustrado na Figura 1. Nessa figura o sobrescrito σ é referente à aplicação de carga mecânica, como

no caso deste presente trabalho. As temperaturas definidas, ainda com base na Figura 1, são:

- M_s é a temperatura de início de formação da martensita por resfriamento;
- M_f é a temperatura final de formação da martensita;
- A_s é a temperatura de início de reversão da austenita por aquecimento;
- A_f é a temperatura final de formação da austenita.

Estas temperaturas são determinadas principalmente pela composição da LMF, podendo ser afetada por outros fatores, como a aplicação de uma carga mecânica, que tende a aumentá-las segundo uma lei de Clausius-Clayperon específica para LMF (OTSUKA; WAYMAN, 1998).

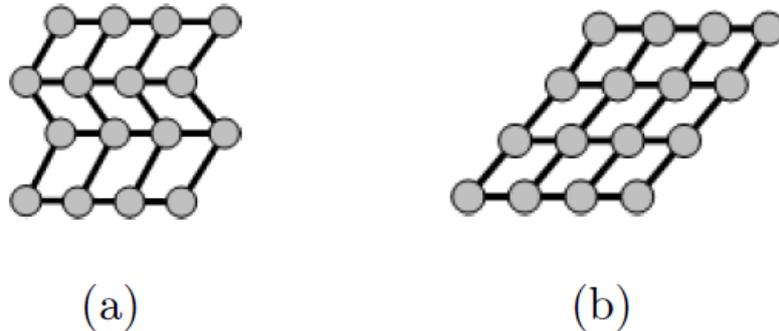
Figura 1. Curva típica de transformação de fase em função da temperatura para LMF.



Fonte: Adaptada de (LIMA, 2008)

Quando induzida somente por variação de temperatura, a martensita é denominada de martensita maclada (desorientada), também chamada de martensita *twinned*, na qual ocorre uma auto-acomodação da estrutura cristalina como ilustra-se na Figura 2(a). Esta martensita, ao se formar, pode escolher algumas orientações (variantes) cristalográficas diferentes em relação a um sistema de referência posicionado na fase original. Quando a martensita é induzida por um tensão mecânica, ou tensão e temperatura, é denominada de martensita de-maclada (orientada), também chamada de martensita *detwinned*, na qual ocorre a formação de apenas uma variante cristalográfica, dentre as variantes da martensita maclada, alinhada de acordo com a orientação do carregamento mecânico, como ilustra-se na Figura 2(b).

Figura 2: Representação esquemática das estruturas martensíticas em LMF. (a) Fase martensita maclada (desorientada); (b) Fase martensita de-maclada (orientada).



Fonte: (LIMA, 2008)

3.1 BREVE HISTÓRICO

Os principais relatos das observações do Efeito Memória de Forma (EMF), que consiste na habilidade do material em rememorar sua forma depois de deformado pseudo plasticamente e posteriormente aquecido, foram feitos por Chang e Read em 1930 em uma liga de Au-Cd (OTSUKA; WAYMAN, 1998). Em 1938, um físico sueco chamado Arne Olander observou comportamentos interessantes em ligas de ouro-cádmio (Au-Cd), as quais podiam ser deformadas enquanto numa baixa temperatura, e quando aquecidas recuperar sua forma original.

Ainda em 1938, Kurdyumov, Isaistchev e Kaminsk publicaram um artigo onde descreveram detalhadamente as observações sobre as “martensitas termicamente reversíveis” em ligas binárias a base de cobre (Cu-Al e Cu-Zn). Em 1949, Kurdyumov e Khandros, conceituaram a martensita termoelástica dando a base experimental e teórica para os avanços científicos verificados nos anos seguintes (DELAEY et al., 1974).

Porém, o conceito de LMF ficou mais difundido apenas na década de 60, quando um grupo de pesquisadores liderados por William J. Buehler observou que uma liga de níquel-titânio (Ni-Ti) também apresentava características de memória de forma. Tendo sido esta descoberta feita em um instituto americano chamado Naval Ordnance Laboratory, o material ficou conhecido como Nitinol (**N**ickel **T**itanium **N**aval **O**rdinance **L**ab). A descoberta do Nitinol fez ressurgirem os interesses e pesquisas por serem mais baratas, mais fáceis de trabalhar e menos prejudiciais à saúde que as conhecidas ligas de ouro-cádmio (PEQUENO, 2012). Esta liga tornou-se a mais bem

sucedida liga com EMF, possuindo alta resistência mecânica, biocompatibilidade, boa resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica (OLIVEIRA, 2007).

Os grandes centros de pesquisas dedicados ao estudo aprofundado do tema surgiram durante a década de 70. Nomes importantes como T. Saburi e S. Nenno despontaram nesse mesmo período por terem realizados excelentes estudos sobre a cristalografia das transformações. Novas descobertas com aplicação tecnológicas foram obtidas por pesquisadores que se dedicaram ao tema, entre eles: C. Rodriguez, L. C. Brown e R. J. Wasilewsky que realizaram estudos sobre as propriedades mecânicas das ligas com EMF; M.C. Wayman, K. Otsuka, K. Shimizu e Luc Delaey com seus colaboradores realizaram as mais abrangentes pesquisas sobre o tema, fornecendo às pesquisas atuais fontes de referência teórica ao desenvolvimento de novas investigações científicas sobre o tema.

3.2 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

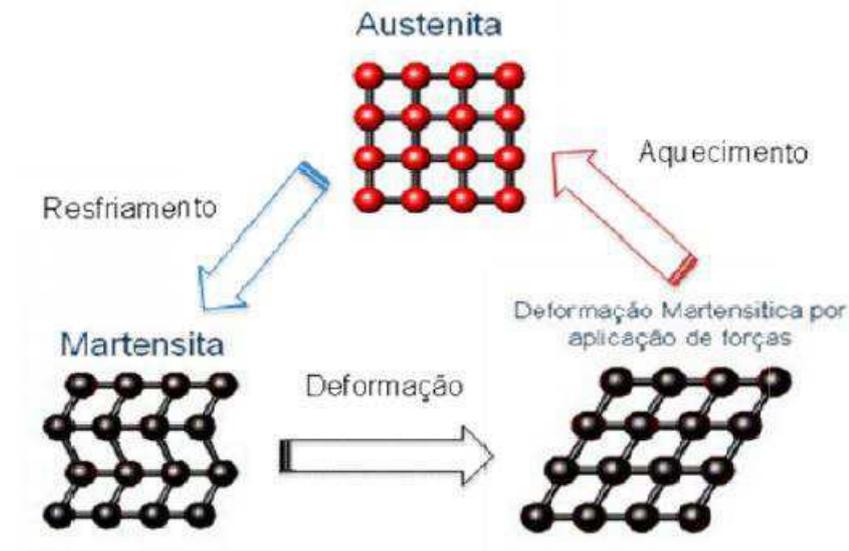
O termo martensita foi originalmente utilizado para designar o constituinte resultante do resfriamento rápido (têmpera) aplicado aos aços. Este constituinte resulta de uma transformação em estado sólido e sem difusão (SILVA, 2009).

A transformação martensítica que ocorre nas LMF é semelhante a que ocorre nos aços comuns, a principal diferença é a reversibilidade entre as fases cristalográficas em uma faixa estreita de temperatura (GRASSI, 2014). Nesta transformação, e no caso dos aços, a fase de alta temperatura, denominada de austenita (com estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada - CFC), transforma-se em domínios de estrutura CCC (Cúbica de Corpo Centrado) ou TCC (Tetragonal de Corpo Centrado), os quais se apresentam sob a forma lenticular ou de plaquetas alongadas. Por extensão, as estruturas criadas com estas características de transformações são chamadas de “martensitas” e as transformações cristalográficas sem difusão que lhes dão origem são chamadas de “transformações martensíticas” (CALLISTER; RETHWISCH, 2007).

A transformação da fase austenita para martensita, ou da fase matriz para a fase produto, em princípio é quem caracteriza o EMF. No caso das LMF, a transformação martensítica é reversível e termoelástica (OTSUKA; WAYMAN, 1998), o que leva a recuperação de forma imposta pela deformação plástica. Na Figura 3 ilustra-se o mecanismo da transformação martensítica termoelástica que ocorre no interior do

material durante um ciclo termomecânico de EMF (resfriamento→deformação→aquecimento).

Figura 3: Esquema de mudança estrutural que ocorre nas ligas com memória de forma.



Fonte: (SILVA, 2009)

3.2.1 TEMPERATURAS CRÍTICAS DA TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

A caracterização física da transformação martensítica termoelástica consiste basicamente em determinar os parâmetros que tem relação direta com o fenômeno, como o deslocamento ou deformação correspondente ao EMF, alterações na resistência elétrica do material, a absorção ou liberação de energia, dentre outras. A partir destas características é possível determinar as temperaturas de transformação de fase e histerese em temperatura de uma LMF. Na Figura 1, apresentada anteriormente, ilustra-se uma curva típica de variação dimensional (comprimento, por exemplo) em função da temperatura para um material com memória de forma. A maior parte da transformação direta (austenita – martensita, no resfriamento) e reversa (martensita – austenita, no aquecimento) acontece em uma faixa de temperatura relativamente estreita, embora o começo e o fim da transformação durante aquecimento ou resfriamento, de fato estenda-se a uma faixa de temperatura muito maior ($M_f \leftrightarrow A_f$). Esse comportamento também exhibe uma histerese térmica, que é medida a 50% da transformação, conforme se ilustra ainda na Figura 1. As temperaturas de transformação variam de um sistema de LMF para outro.

3.2.2 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (EMF)

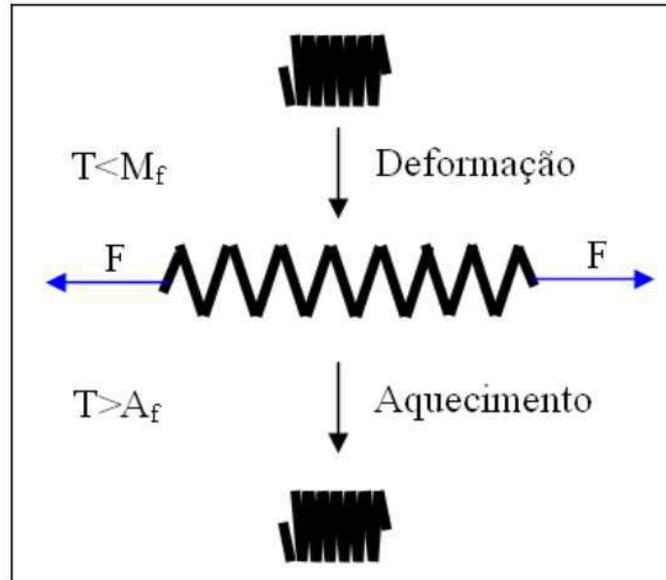
O fenômeno de EMF, indiretamente ilustrado nas Figura 1 e Figura 3, é uma das propriedades termomecânicas resultante das transformações martensíticas termoelásticas. O principal resultado desta propriedade é a recuperação de forma por meio do aquecimento acima das temperaturas críticas de transformação, A_s e A_f (DUERIG et al., 1990).

Este fenômeno ocorre devido à capacidade que estes materiais possuem em assumirem diferentes estruturas cristalinas a distintas temperaturas, por meio de suas duas fases, martensita e austenita (ROMANO; TANNURI, 2008).

3.2.2.1 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA SIMPLES (EMFS)

O efeito memória de forma simples (EMFS) é aquele observado a partir do estado martensítico, quando a martensita é do tipo maclada (desorientada), onde a temperatura é inferior a temperatura M_f e aplica-se uma carga capaz de gerar uma deformação aparentemente permanente. Esta deformação, que persiste após a retirada do carregamento mecânico é chamada pseudo plástica, pois pode ser recuperada após o aquecimento do material até uma temperatura superior a A_f . Na Figura 4 apresenta-se o esquema de funcionamento do efeito memória de forma simples em uma mola helicoidal. Ainda na Figura 4 observa-se a aplicação de uma carga de tração que gera deformação em uma mola.

Figura 4: Esquema correspondente ao fenômeno de EMFS em uma mola.



Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

Este efeito é assim chamado porque sempre que ocorre o resfriamento até uma temperatura inferior a M_f a martensita formada será do tipo maclada, sendo necessária nova aplicação de carga para que ocorra a orientação das maclas da martensita. Na prática, o EMFS é menos interessante para fabricação de atuadores, onde um grande número de ciclos de ativação e desativação é desejável, pois cada vez que o atuador for acionado será preciso “armá-lo” novamente, ou seja, aplicar novamente uma deformação antes da próxima atuação (GRASSI, 2014).

3.2.2.2 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA DUPLO (EMFD)

Neste caso o atuador apresenta não apenas uma forma “memorizada” durante o aquecimento para a fase austenítica (EMFS), mas também o estado martensítico apresenta uma forma específica.

Toda LMF apresenta inicialmente o EMFS, sendo necessário fazê-la passar por um processo de ciclagem através de um carregamento termomecânico específico, chamado de treinamento, para que adquira o EMFD. Ao percorrer repetidas vezes um determinado caminho termomecânico, como o do EMFS, por exemplo, ocorre que o processo de orientação das maclas de martensita introduz a cada ciclo defeitos na microestrutura que favorecem aquela direção preferencial para a orientação da estrutura martensítica maclada. Assim, após um determinado número de ciclos, a aplicação da

carga mecânica não será mais necessária para fazer surgir variantes de martensita naquela direção, bastando apenas a mudança de temperatura (GRASSI, 2014).

3.2.3 SUPERELASTICIDADE (SE)

A superelasticidade ocorre quando a LMF encontra-se no estado austenítico (fase de alta temperatura). Nesse fenômeno o material pode sofrer grandes deformações reversíveis, através do carregamento mecânico, sem deformações plásticas após a retirada da carga.

A fase cristalográfica estável nessa situação (LMF acima da temperatura A_f e suficiente nível de tensão mecânica) é chamada de “martensita induzida por tensão”, que é cristalograficamente semelhante a martensita orientada (de-maclada) (GRASSI, 2014). A fase austenítica reaparece quando a tensão mecânica é liberada no material, levando a recuperação da forma inicial.

3.3 APLICAÇÕES DAS LMF

As LMF, exibindo funções de sensores e atuadores simultaneamente, apresentam uma propriedade única que não está presente em alguns materiais estruturais tradicionalmente usados em aplicações de engenharia. Assim, por si só motiva a sua aplicação em diversas situações, a depender da criatividade do projetista.

3.3.1 APLICAÇÕES NA AERONÁUTICA

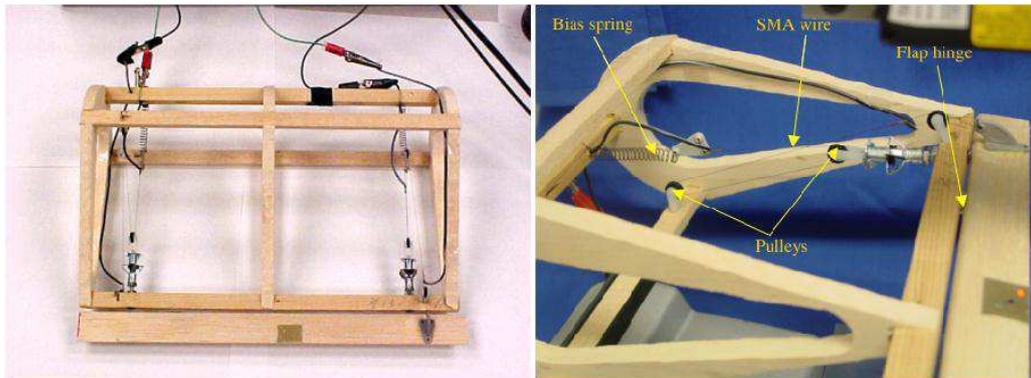
Pesquisas recentes com materiais inteligentes mostram que as LMF são vistas como substitutos potenciais aos atuadores convencionais (SEIGLER et al., 2005). Exemplos de aplicação de materiais inteligentes em aeronaves incluem o desenvolvimento de flaps.

Os flaps são estruturas móveis, inseridas nas asas, que promovem o ganho ou perda de altitude ou a mudança de direção de uma aeronave. A manobra de aeronaves depende da eficiência dos flaps. Estas estruturas utilizam extensos sistemas hidráulicos que necessitam de bombas e atuadores, elevando o custo e o peso, dois pontos críticos do projeto de aeronaves de maior porte. Muitas alternativas na indústria aeroespacial

estão sendo pesquisadas para contornarem esse problema, e potenciais soluções são as LMF.

No trabalho de (SONG; MA, 2007), ilustrado por meio da Figura 5, mostra-se a tentativa desses pesquisadores de usar dois fios de LMF para o controle do flap de uma aeronave (um fio para mover o flap para cima e o outro para movê-lo para baixo) usando controlador robusto não-linear, substituindo os atuadores convencionais que são acionados por motores elétricos ou atuadores hidráulicos.

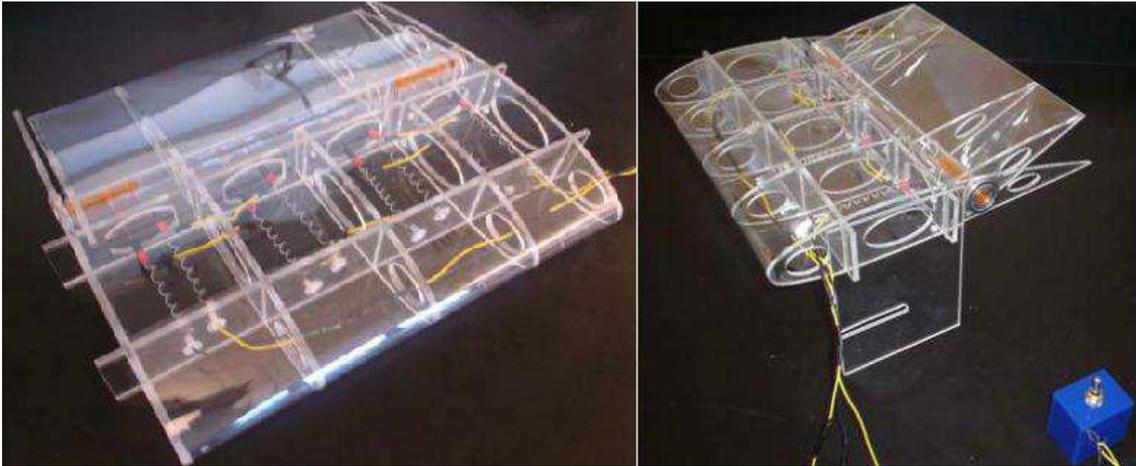
Figura 5: Modelo de uma asa com flap sendo atuado por fios de LMF.



Fonte: (SONG; MA, 2007)

Os pesquisadores (HUTAPEA et al., 2008) desenvolveram um sistema de flaps utilizando molas de LMF. A asa inteligente proposta consiste em molas de LMF que estão fixadas em um protótipo, conforme ilustrado na Figura 6. As molas foram dispostas de maneira a causar a rotação do flap em ambas as direções. Os atuadores do tipo molas helicoidais de LMF foram controlados pela introdução de calor a partir da aplicação de corrente elétrica (aquecimento por efeito Joule).

Figura 6: Protótipo de asa inteligente ativada por molas helicoidais de LMF.

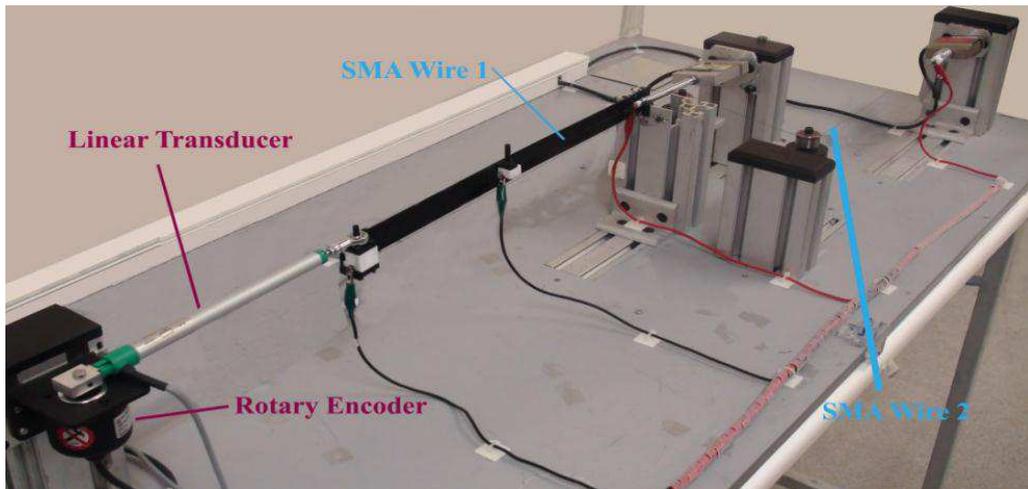


Fonte: (HUTAPEA et al., 2008)

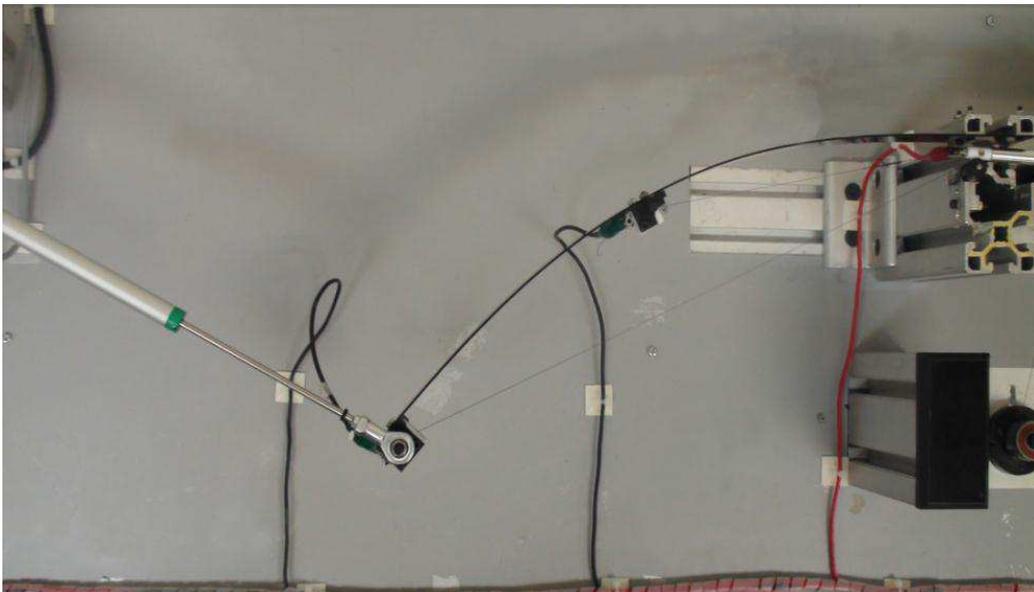
Já os pesquisadores (ZAKERZADEH; SAYYAADI, 2013) propuseram o controle de posição de asas melhoradas, incorporando fios de LMF, onde as não linearidades histeréticas foram modeladas através do modelo de Prandtl-Ishlinskii generalizado. Neste trabalho foi utilizado um controle com realimentação para controlar a deflexão da ponta da asa. A alimentação do controlador é baseada no modelo inverso generalizado de Prandtl-Ishlinskii, enquanto um controlador convencional com realimentação proporcional-integral é adicionado ao sistema de controle de alimentação de entrada para aumentar a precisão em conjunto com a redução do erro de estado estacionário no processo de controle de posição. Além disso, a fim de eliminar as não linearidades em grandes deslocamentos, outro atuador auxiliar de LMF é ligado à estrutura. É experimentalmente demonstrado que, em comparação com o caso de apenas um atuador de LMF ligado à estrutura, o controlador proposto na nova arquitetura, incluindo dois atuadores de LMF, não só aumenta a precisão do controle de posição no modo de pequenos deslocamentos, mas também para o caso de grandes deslocamentos. Para concluir sobre estes resultados foi utilizado um protótipo de viga inteligente apresentado na Figura 7.

Figura 7: Protótipo de viga inteligente ativada por fios de LMF. (a) Identificação dos elementos da viga inteligente; (b) Vista de cima da viga inteligente deformada por dois atuadores de LMF.

a)



b)

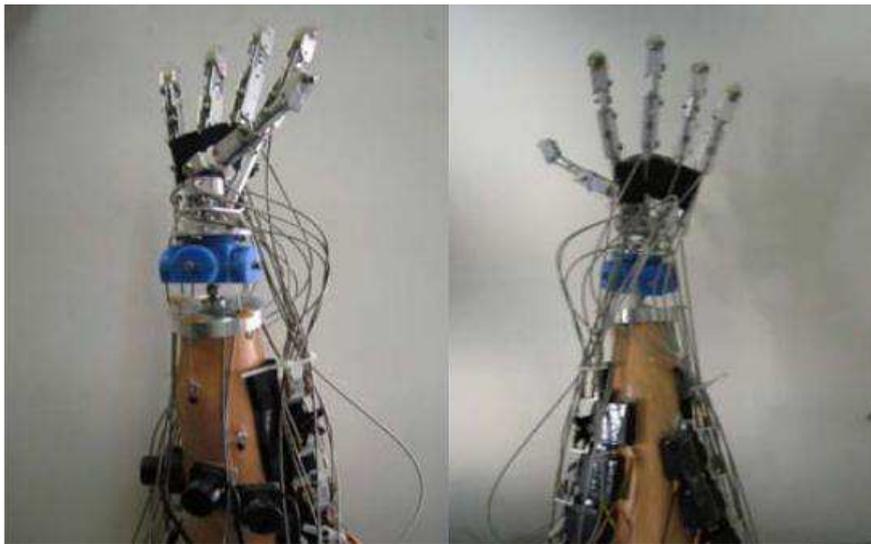


Fonte: (ZAKERZADEH; SAYYAADI, 2013)

3.3.2 APLICAÇÕES NA ROBÓTICA

Um novo projeto de atuador de LMF para uma mão protética foi introduzido por (SIONG LOH; YOKOI; ARAI, 2005). Neste trabalho, dois atuadores de LMF são utilizados para acionar um dedo robotizado, conforme se ilustra na Figura 8. Os dois atuadores são inseridos no final de um tubo metálico de saída, não mostrado na figura, que funciona como dissipador e guia simultaneamente.

Figura 8: Protótipo de mão protética acionada por LMF.

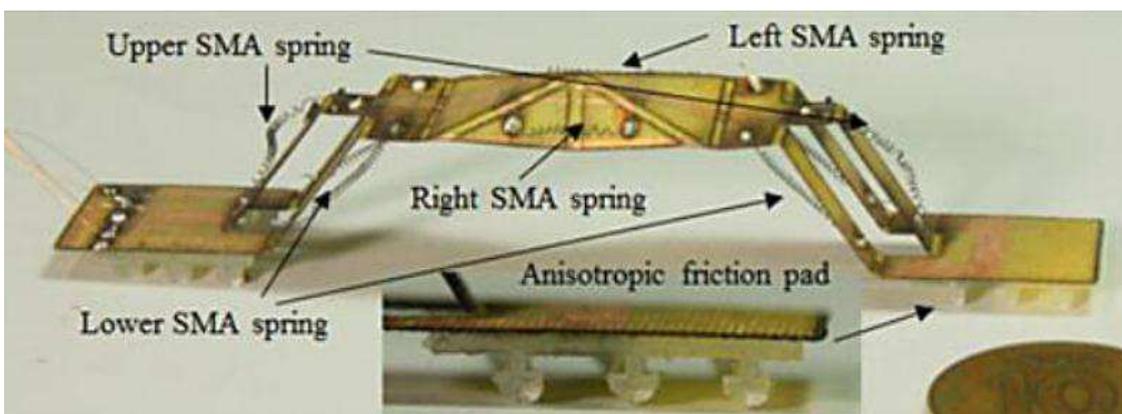


Fonte: (SIONG LOH; YOKOI; ARAI, 2005)

A corrente passa através de fios LMF por meio de eletrodos pontuais, que são localizados no centro do tubo (onde os fios se encontram) e em cada fim do tubo. Os dois atuadores são utilizados para acionar o dedo robótico, que quase pode replicar as ações dos dedos humanos (flexão e extensão). Um controlador PWM é usado para pulsar periodicamente alta tensão em milissegundos para os atuadores, visando evitar o superaquecimento e uso excessivo de energia.

Uma outra aplicação de molas miniaturizadas de LMF na robótica é o desenvolvimento de um mini robô lagarta, que possui mecanismos que permitem sua locomoção em forma de ômega (Ω). O movimento é realizado por meio da ativação de molas helicoidais de LMF. Na Figura 9 ilustra-se o protótipo do mini robô lagarta proposto por (KOH; CHO, 2013).

Figura 9: Protótipo de mini robô lagarta.



Fonte: (KOH; CHO, 2013)

3.3.3 APLICAÇÕES NA MEDICINA

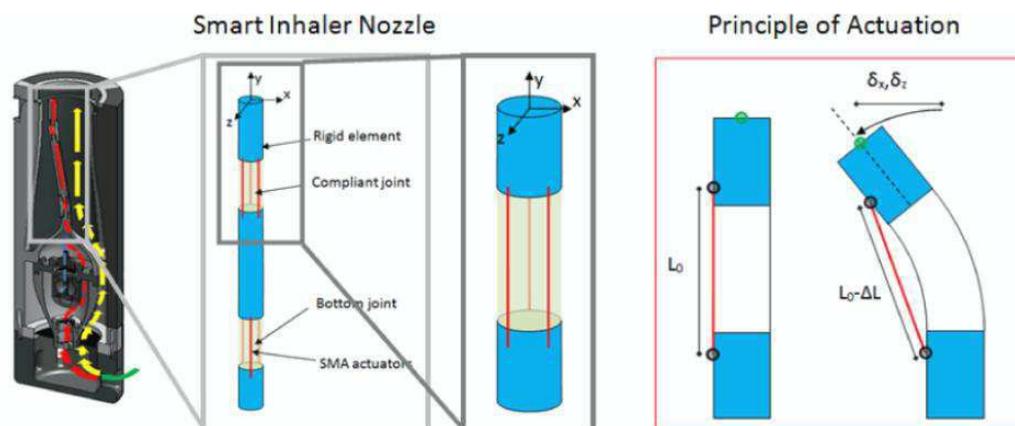
Em uma recente revisão da literatura, (JANI et al., 2014) demonstraram que mais de 60% das aplicações desenvolvidas para LMF, principalmente do sistema Ni-Ti, foram realizadas na área médica e odontológica.

Nesse contexto, recentemente (FURST; SEELECKE, 2014) propuseram um bocal de LMF adaptável, para aplicação em um inalador inteligente. O desempenho do atuador foi caracterizado por medições na alteração da posição do bocal, da deformação e da resistência elétrica do fio de LMF empregado, em resposta a uma entrada de potência de aquecimento controlada por efeito Joule.

O inalador inteligente, mostrado na Figura 10, destina-se a possibilitar a entrega de drogas específicas para um determinado local dentro do sistema pulmonar. Algumas doenças, tais como tumores cancerígenos, podem afetar apenas uma pequena porção dos pulmões e requerem medicamentos tóxicos para serem tratados, por isso, é desejável medicar apenas a região específica. Infelizmente, a medicação em forma de aerosol que é entregue através de um inalador tradicional é depositada por toda a boca, laringe, traquéia, e em ambos os pulmões. O inalador inteligente usando atuador de LMF foi desenvolvido para reduzir a deposição indesejada do medicamento em uma massa benigna.

O componente de bocal usado para posicionar a medicação dentro do fluxo em massa deve ser racionalizado e adaptável o bastante para controlar a localização e a trajetória do fluxo de medicação. Essa adaptação necessita de duas juntas flexíveis em série que podem ser desviadas em qualquer direção. O movimento dessas juntas é realizado através do controle de fios de LMF.

Figura 10: Diagrama do inalador inteligente (à esquerda), junta flexível superior (centro) e esquema de ativação das juntas flexíveis (à direita).

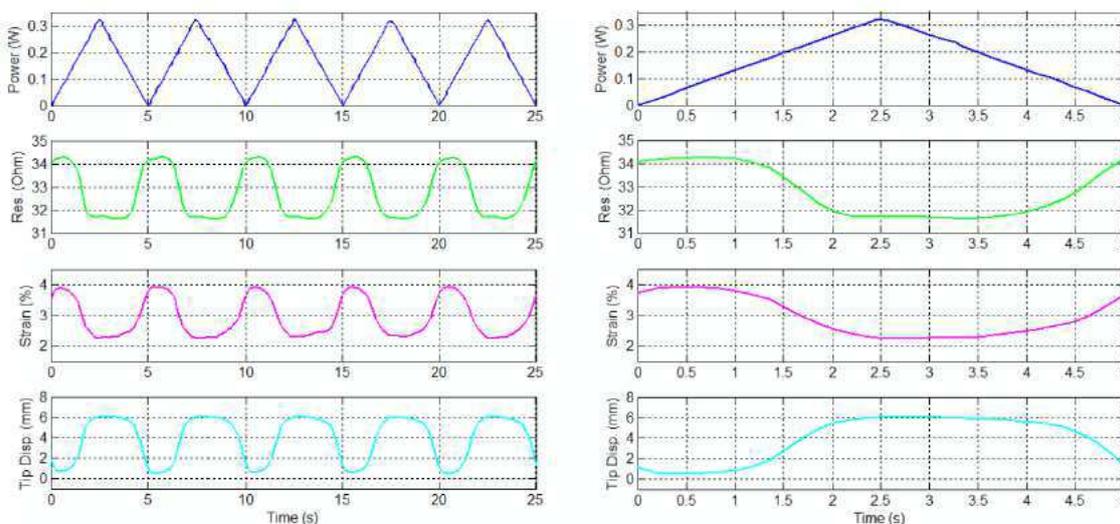


Fonte: (FURST; SEELECKE, 2014)

O processo é então validado pela caracterização da dupla articulação, através da medição da deflexão do bocal, da deformação no fio LMF e da resposta da resistência elétrica a uma entrada de aquecimento por efeito Joule.

Na Figura 11 é possível verificar a evolução temporal da potência de entrada, juntamente com a resistência elétrica do fio LMF, deformação, e deslocamento da ponta do inalador na direção do atuador 1.

Figura 11 :Evolução temporal da potência de entrada, da resistência elétrica, deformação do fio atuador de LMF, e do deslocamento da ponta do bocal para o atuador 1, a 0,2 Hz.

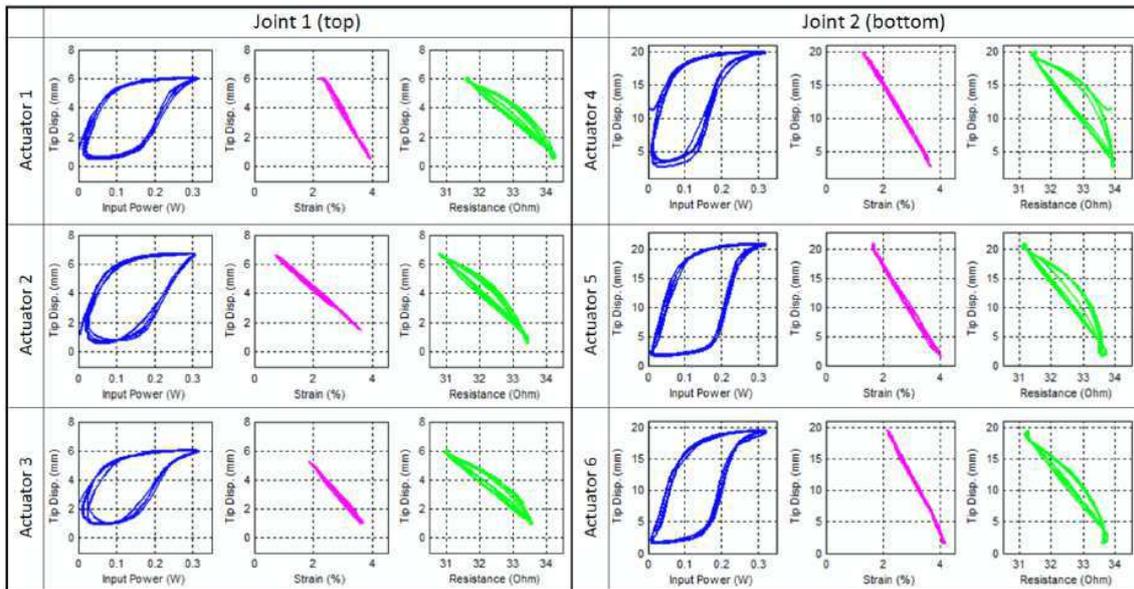


Fonte: (FURST; SEELECKE, 2014)

Na Figura 12 é possível visualizar as curvas de histerese para todos os seis fios atuadores de LMF, incluindo a relação entre o deslocamento da ponta do bocal em função da resistência elétrica do fio atuador. Essa relação ainda não pode ser

considerada ideal, pois apresenta uma certa não linearidade histerética, a qual é mais evidente para o atuador 4 da junta 2. Esse comportamento dificulta o desenvolvimento de um controle de posição do inalador baseado na medição da resistência elétrica do atuador de LMF, na tentativa de usá-lo também como sensor.

Figura 12 :Curvas de histerese para os 6 fios atuadores de LMF usados no protótipo de inalador inteligente.



Fonte: (FURST; SEELECKE, 2014)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades de pesquisa desenvolvidas nesse trabalho foram realizadas no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) e no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), ambos na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Durante o trabalho foi concebida e construída uma estrutura mecânica com instrumentação eletrônica que compôs uma plataforma experimental para determinação do comportamento eletromecânico de atuadores do tipo mini molas helicoidais de LMF Ni-Ti (Nitinol[®]) com ativação por meio de ondas de corrente elétrica (aquecimento por efeito Joule e subsequente resfriamento até a temperatura ambiente).

Neste capítulo serão descritas as características do estudo, a mini mola de LMF Ni-Ti, bem como todos os equipamentos e procedimentos utilizados para tal finalidade.

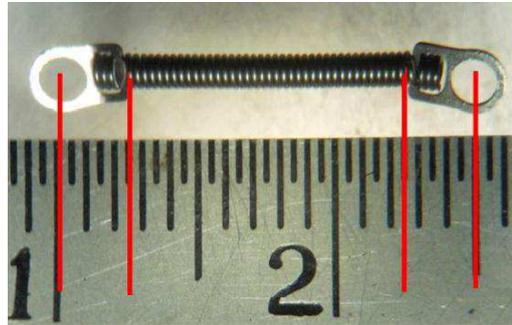
4.1 MINI MOLAS DE LMF NI-TI

A presente pesquisa tem como propósito a caracterização eletromecânica de molas miniaturizadas de LMF superelásticas para futura aplicação como atuador. Estes elementos são originalmente usados na ortodontia para movimentação dos dentes pela aplicação de força na arcada dentária e se encontram no seu estado austenítico à temperatura ambiente (caracterizada como a alta temperatura, nesse caso). Quando uma carga mecânica, variável ou constante, suficientemente alta é aplicada nestas mini molas, é possível induzir martensita por tensão mecânica originando grandes deformações (até 600 % do comprimento útil da mola (AN et al., 2012). Este níveis de deformação podem ser recuperadas por aquecimento.

A mini mola helicoidal de LMF Ni-Ti utilizada neste trabalho foi adquirida no mercado nacional, junto a empresa Dental Morelli (São Paulo - SP), e tem o formato mostrado na Figura 13. Trata-se de uma mini mola completamente fechada (mola de tração), apresentando as seguintes características dimensionais: comprimento de 15 mm (distância correspondente entre os centros dos olhais), comprimento útil da ordem de 10

mm (totalizando 40 espiras), diâmetro externo de 1,25 mm e diâmetro do fio de 0,25 mm. Na embalagem dessas mini molas o fabricante informa uma força máxima correspondente a 200 gramas ($\sim 2\text{N}$).

Figura 13: Fotografia da mini mola superelástica de LMF Ni-Ti com o comprimento útil deformável e total em destaque.



Fonte: (GRASSI et al., 2008)

4.2 TREINAMENTO CÍCLICO

Para estabilizar o comportamento eletromecânico das mini molas da Figura 13 foi realizado um treinamento cíclico utilizando-se o dispositivo mostrado na Figura 14. Para esse processo, a mini mola foi submetida à uma carga mecânica da ordem de 2 N, correspondente a uma massa de 200 gramas, e aquecida por efeito Joule por uma corrente elétrica constante de 430 mA. O resfriamento foi realizado por convecção natural, com a temperatura do ambiente mantida em torno de 22 °C. Foram realizados 2000 ciclos cada um deles com duração de 15 segundos, sendo aproximadamente 5 s para o aquecimento (tempo necessário para que a mini mola atingisse sua contração máxima sob a carga de 2 N) e 10 s para o resfriamento (tempo necessário para que a mola resfriasse e se distendesse totalmente).

Figura 14: Montagem específica utilizada para o treinamento cíclico das mini molas de LMF Ni-Ti.



Fonte: Autoria própria.

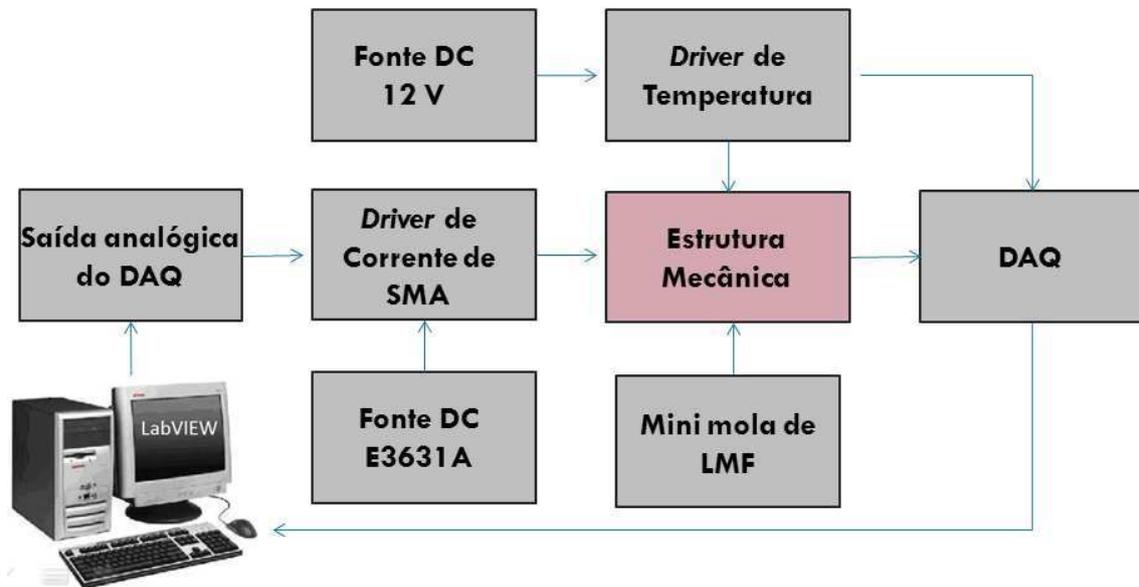
4.3 PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Para a análise detalhada do comportamento eletromecânico dos atuadores do tipo mini molas helicoidais de Nitinol[®] com ativação por meio de corrente elétrica controlada (aquecimento por efeito Joule) foi necessária a construção de uma plataforma experimental capaz de submeter a mini mola em análise a uma carga mecânica constante (peso) e sinais de corrente elétrica variáveis com o tempo, de tal forma que fosse capaz de monitorar o comportamento da resistência elétrica, temperatura e deslocamento em cada etapa do aquecimento e resfriamento (por diminuição da corrente em convecção natural).

Após inúmeros testes com várias formas de onda, foi estabelecido que a forma do sinal de corrente mais adequada para este fim corresponde a uma onda triangular, com uma frequência lenta o bastante para que a mini mola atinja contração máxima, no aquecimento, e distensão máxima, no resfriamento, quando submetida a um carregamento mecânico constante.

De um modo geral, a montagem da plataforma experimental pode ser esquematizada conforme o diagrama em blocos ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Diagrama de blocos representando o esquema de funcionamento da plataforma experimental.



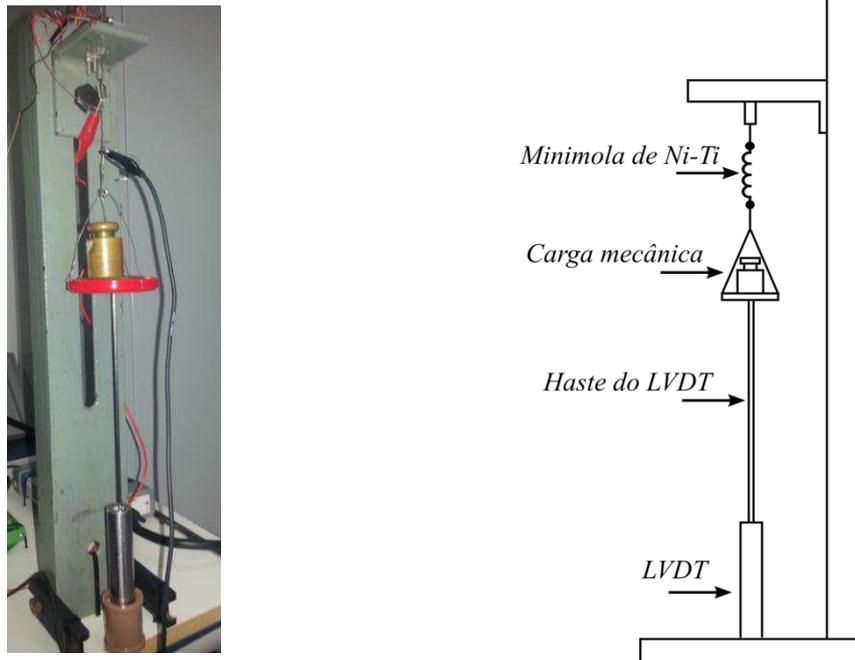
Fonte: Autoria própria.

O sistema desenvolvido é composto de uma estrutura mecânica para fixação da mini mola de LMF, tensionada por uma carga mecânica (peso); uma fonte de tensão elétrica de 12 V; uma fonte de alimentação CC programável; um micro termopar tipo K e seu respectivo circuito de condicionamento da temperatura (*driver* de temperatura); um outro circuito para controlar a corrente na mini mola de LMF (*driver* de corrente da LMF); um sensor de deslocamento do tipo LVDT; um sistema de aquisição de dados da *National Instruments* e um computador com o software LabVIEW.

A estrutura mecânica que suporta a mini mola foi construída de uma maneira que sua fixação fosse realizada na posição vertical para ser distendida por meio de um peso localizado em uma bandeja na qual a haste móvel do sensor de deslocamento LVDT está fixada. O corpo do LVDT foi instalado na plataforma de modo que a sua haste não provoca qualquer atrito com o movimento de contração e distensão da mini mola, como indicado na Figura 16.

Os experimentos de ciclagem eletromecânica foram realizados com a mini mola submetida aos pesos padrões de 200 g, 150 g e 100 g, somados as massas da haste do LVDT e da bandeja que acomoda os pesos padrões (aproximadamente 30 g). Logo, as forças peso a qual a mini mola esteve sujeita foram 1,28 N (130 g); 1,77 N (180 g) e 2,26 N (230 g).

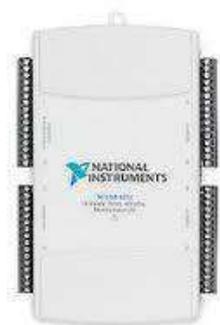
Figura 16: Imagem e respectivo esquema da estrutura mecânica com uma mini mola de LMF Ni-Ti instalada para testes.



Fonte: A autoria própria

A forma de onda triangular da corrente elétrica utilizada para o aquecimento da mini mola, gerada com o software LabVIEW, é enviada para um circuito de condicionamento de sinal (*driver* de corrente), através de uma saída analógica do DAQ. O DAQ é um módulo de aquisição de dados série M, da *National Instruments*, como se mostra na Figura 17.

Figura 17: Módulo de aquisição de dados (NI USB-6212).



Fonte: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/207096>

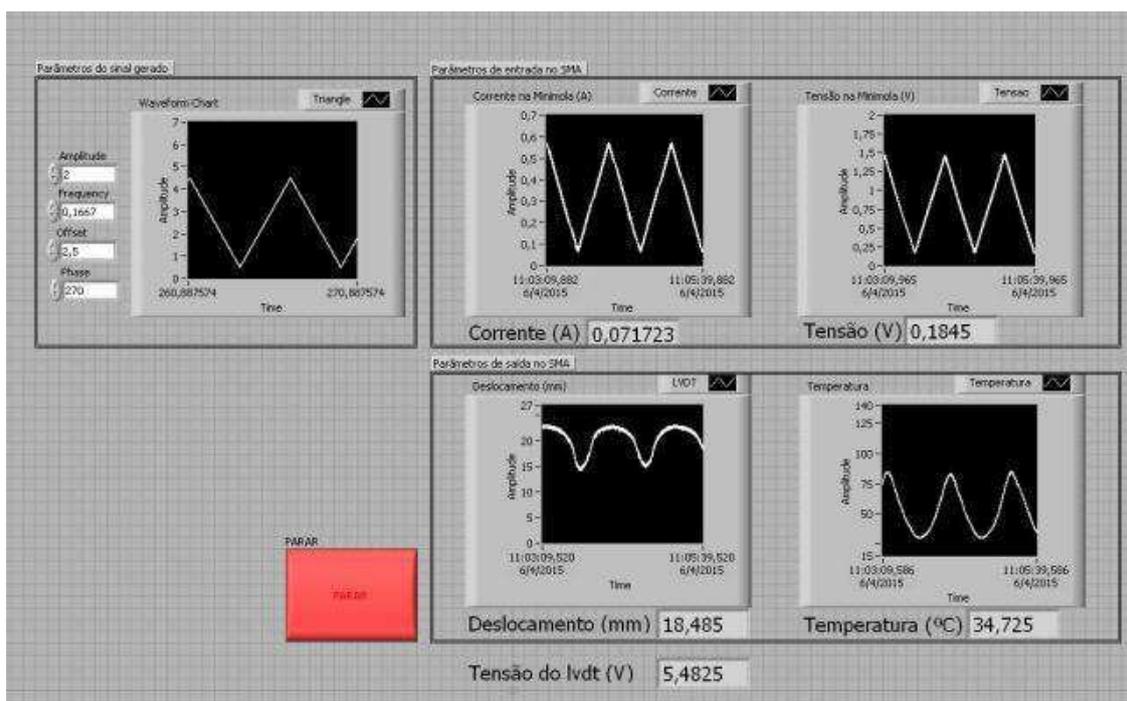
Por sua vez, o *driver* de corrente, esquematizado eletronicamente no Apêndice A, permite que a corrente elétrica da fonte de alimentação (Agilent, E3631A) seja controlada de acordo com o sinal programado no LabVIEW. Esse circuito de condicionamento do sinal da corrente elétrica foi projetado para alimentar quatro atuadores de LMF, porém neste trabalho foi utilizado apenas um canal.

A partir de canais de entrada analógica do DAQ são lidos os sinais de tensão e corrente elétrica (utilizados para encontrar os valores de resistência elétrica da mini mola), temperatura e deslocamento da mini mola de LMF Ni-Ti.

A temperatura da mini mola é medida por meio de um micro termopar tipo K, com 100 μm de diâmetro, cuidadosamente colado entre duas espiras inativas da mini mola, entre o olhal e o fim do comprimento útil (Figura 13). Este sensor necessita de um circuito de condicionamento de sinal para transformar a tensão elétrica em um valor correspondente de temperatura em graus Celsius. No APÊNDICE B é possível visualizar o esquema de montagem desse circuito de condicionamento de sinal que utiliza um AD595, o qual corresponde a um amplificador de instrumentação completo com junção de compensação fria para termopar em um único chip monolítico. O circuito combina uma referência de ponto de gelo com um amplificador pré-calibrado para produzir um nível de 10 $\text{mV}/^\circ\text{C}$, diretamente de um sinal de termopar.

No LabVIEW foi desenvolvida uma rotina capaz de gerar um sinal de corrente triangular simétrico no DAQ. Foi possível ajustar facilmente os valores da amplitude, *offset*, frequência e fase, de modo à escolher os melhores parâmetros da onda para cada experimento a ser realizado, além de uma rotina para monitorar, em tempo real, os sinais de deslocamento, temperatura, tensão elétrica e corrente elétrica na mini mola. Na Figura 18 é possível visualizar esses gráficos de monitoramento e geração do sinal de corrente elétrica. À esquerda estão os parâmetros do sinal gerado; os dois gráficos da parte de cima à direita ilustram o comportamento da corrente elétrica e tensão elétrica na mini mola de LMF; nos dois gráficos de baixo mostra-se o comportamento do deslocamento e da temperatura da LMF, respectivamente.

Figura 18: Painel Frontal do programa Labview desenvolvido para a plataforma experimental.



Fonte: Autoria Própria

4.4 ENSAIOS DE CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

Para determinar as temperaturas de transformação de fase das mini molas de LMF Ni-Ti utilizadas nesta pesquisa, uma amostra com massa de 9,4 mg foi utilizada em ensaios de análise térmica do tipo DSC. O equipamento utilizado foi o calorímetro disponível no LaMMEA, da marca *TA Instruments*, modelo Q20. Foi configurada uma taxa de variação de temperatura de 5°C/min e uma faixa de temperatura entre -50°C e 150°C. As temperaturas são determinadas aplicando o método das tangentes aos picos DSC usando o programa do próprio calorímetro.

4.5 ENSAIOS DE EMF EM TRAÇÃO SOB CARGA CONSTANTE

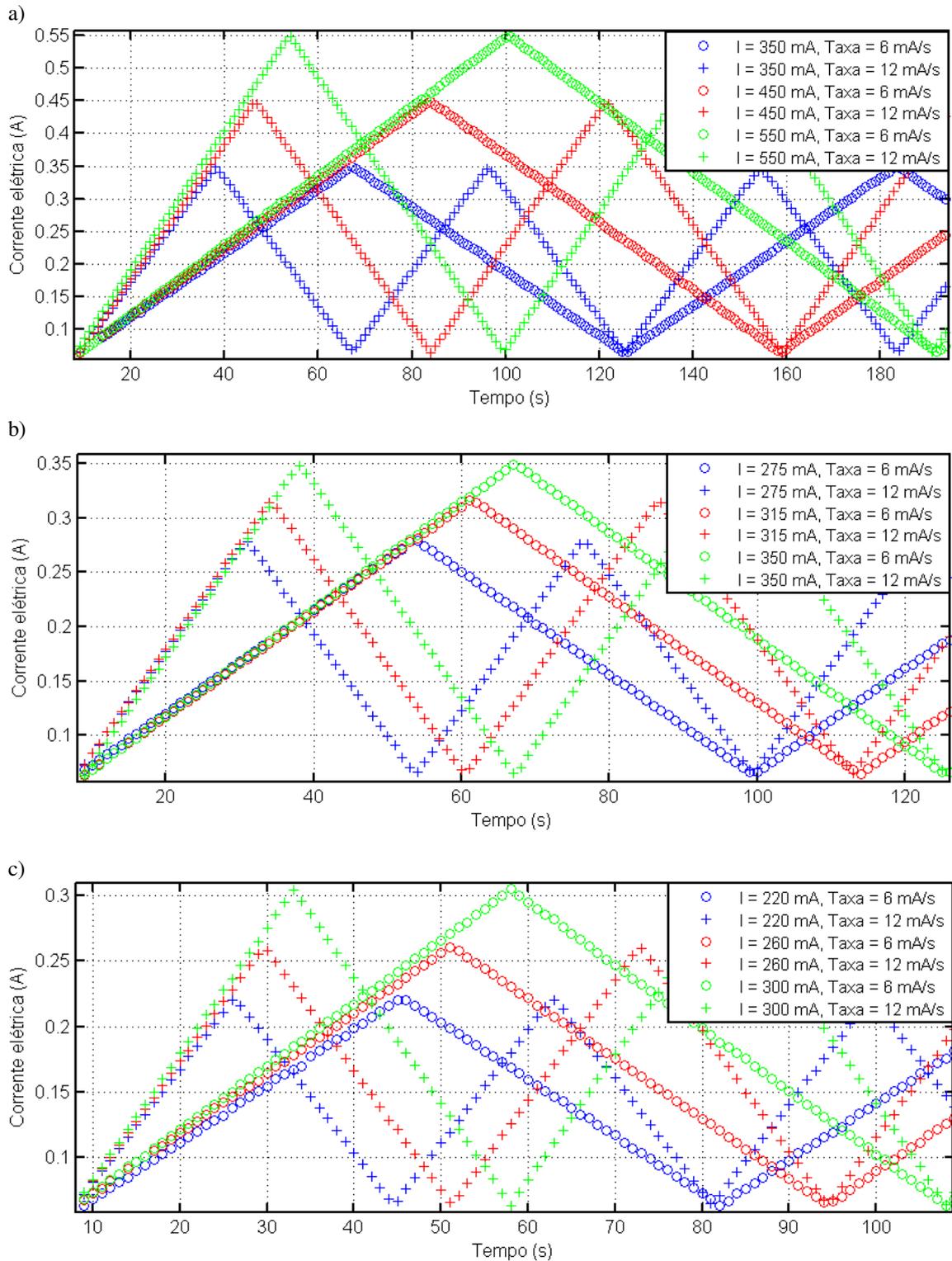
O atuador do tipo mini mola de LMF foi submetido a ciclos térmicos, por meio de ensaio de efeito de memória de forma (EMF) em tração sob carga mecânica constante utilizando a plataforma experimental apresentada nas Figura 15 e Figura 16.

Estes ensaios foram realizados com o intuito de analisar a evolução dos laços de histerese e a correspondente deformação termoelástica (DT) sob carga. Entende-se aqui por deformação termoelástica como sendo a variação do deslocamento da mini mola em um ciclo de aquecimento/resfriamento, ou seja, o valor do deslocamento obtido na contração subtraído do valor atingido na distensão.

Conforme mencionado anteriormente, foram realizados experimentos sob três cargas mecânicas distintas, tendo por base a carga máxima indicada pelo fornecedor. Para cada nível de carga foram realizados experimentos utilizando-se três valores diferentes para o pico da onda de corrente elétrica triangular. Estes valores foram determinados em experimentos preliminares com a mini mola na plataforma, evitando eventual superaquecimento que gere degradação da resposta em deslocamento. Para a carga de 2,26 N (230 g) foram utilizados os valores de pico de 350, 450 e 550 mA. Já para a carga de 1,77 N (180 g) foram usados 275, 315 e 350 mA, e para 1,28 N (130 g) os valores selecionados foram 220, 260 e 300 mA.

Além disso, para cada sinal triangular, foram utilizadas duas taxas de variação da corrente elétrica, correspondentes a 6 e 12 mA/s, para que fosse possível uma análise mais detalhada da resposta eletromecânica da mini mola LMF. A eventual influência desse parâmetro será discutida posteriormente. As formas de onda, com os respectivos valores de pico e de taxa de variação da corrente elétrica podem ser visualizados na Figura 19.

Figura 19: Formas de ondas de corrente elétrica aplicadas para ativação da mini mola de LMF submetida à diferentes cargas mecânicas. a) Para 2,26 N. b) Para 1,77 N. c) Para 1,28 N.



Fonte: Autoria Própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

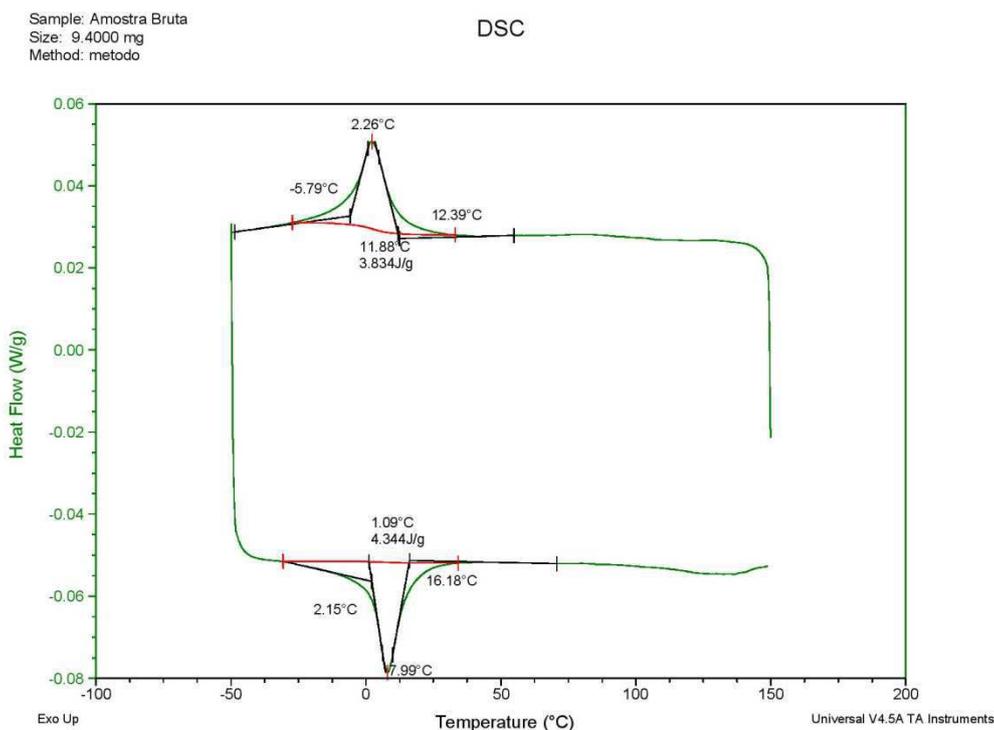
Os atuadores de LMF no formato de mini molas helicoidais foram analisados com o objetivo de caracterizar o comportamento do deslocamento por EMF e da resistência elétrica face às cargas externas aplicadas, ao nível de corrente elétrica e a variação da taxa de corrente elétrica. O comportamento eletromecânico, as temperaturas críticas de transformação, as deformações termoelásticas alcançadas, a influência da carga externa no aumento dos valores médios das temperaturas de transformações e o comportamento da relação entre deslocamento e resistência elétrica foram os principais parâmetros analisados.

5.1 ANÁLISE TÉRMICA VIA ENSAIO DE DSC

A partir de uma curva típica de ensaio DSC é possível obter propriedades térmicas importantes das LMF: integrando as áreas internas dos picos determinam-se as entalpias de transformação de fase; traçando-se tangentes aos picos de transformação é possível identificar as temperaturas de transformação de fase; e a diferença entre as temperaturas de pico representa a histerese térmica da transformação.

Na Figura 20 apresenta-se o gráfico obtido do ensaio de DSC, descrito anteriormente. A partir desta curva foram obtidas as temperaturas de transformação de fase através do traçado das tangentes aos picos. Os resultados foram: $M_s = 12,39^\circ\text{C}$; $M_f = -5,79^\circ\text{C}$; $A_f = 16,18^\circ\text{C}$ e $A_s = 2,15^\circ\text{C}$. Por meio da diferença entre as temperaturas de pico determinou-se a histerese térmica no valor de $5,73^\circ\text{C}$.

Figura 20: Resultado do ensaio de DSC para a mini mola de Ni-Ti.



Fonte: Autoria própria

5.2 ENSAIOS DE EMF EM TRAÇÃO SOB CARGA CONSTANTE

Primeiramente, é importante salientar que molas são elementos de máquina em que as tensões predominantes são do tipo cisalhante, que se apresentam sob forma de gradiente na seção transversal do fio constituinte da mola, sendo máxima na superfície externa e zero no centro da seção (GRASSI et al., 2008). Por esta razão, não se fala de tensão mecânica sobre a mini mola e sim de força. No caso deste trabalho a força corresponde a um peso externamente aplicado conforme indicado na Figura 16.

Como já mencionado anteriormente e ilustrado na Figura 19 foram aplicados três níveis de corrente para cada carga, além de duas taxas de variação, totalizando seis situações possíveis para análise. Para facilitar a visualização e as discussões os resultados serão apresentados sempre se comparando os três níveis de carga mecânica para cada nível de corrente elétrica.

No decorrer do texto utilizaremos os símbolos di/dt e P para representar o valor da taxa de variação da corrente elétrica e o peso ao qual a mini mola de LMF está submetida, respectivamente.

Os ensaios de EMF em tração realizados permitiram avaliar o comportamento eletromecânico dos atuadores. Assim, curvas de deslocamento e resistência elétrica em função da corrente elétrica e da temperatura foram obtidas com o objetivo de constatar o efeito memória de forma nos atuadores ensaiados, como também determinar as temperaturas críticas de transformação; as histereses térmicas; a variação da resistência elétrica; e o comportamento da relação entre deslocamento e resistência elétrica, visando verificar a existência de uma relação linear entre estes dois parâmetros.

5.2.1 PARA OS NÍVEIS MAIORES DE CORRENTE ELÉTRICA

Na Figura 21 apresenta-se o comportamento em histerese do deslocamento da mini mola em relação à corrente elétrica e a temperatura, obtidos para os primeiros 25 ciclos térmicos de trabalho mecânico, para os maiores níveis de corrente elétrica aplicados nas três cargas mecânicas utilizadas.

Com a $di/dt = 6$ mA/s, foi observado que, para a carga de 2,26 N, a mini mola inicia a contração em torno de uma corrente de 130 mA, que corresponde à uma temperatura de aproximadamente 22,5 °C, e que antes dos 390 mA (47,5 °C) a mini mola de LMF caminha para a saturação. Já para a carga de 1,77 N, a contração se inicia em torno de 120 mA (22,5 °C) e a saturação a partir dos 310 mA (36,55 °C). E, finalmente para 1,28 N observa-se aproximadamente os valores de 100 mA (21,06 °C) e 270 mA (30,73 °C) para ativação e saturação, respectivamente.

Já para a $di/dt = 12$ mA/s, quando a mini mola de LMF se encontra submetida a carga de 2,26N o início da contração ocorre em 190 mA (23,15 °C) e a saturação em 460 mA (49,55 °C). Para 1,77 N, a contração inicia em 140 mA (22,9 °C) e a saturação em 330 mA (32,65 °C), e por último, para a carga de 1,28 N o início da contração é em 140 mA (22,13 °C) e da saturação 290 mA (30,18 °C). Estes valores, extraídos da Figura 21, encontram-se resumidos na Tabela 1.

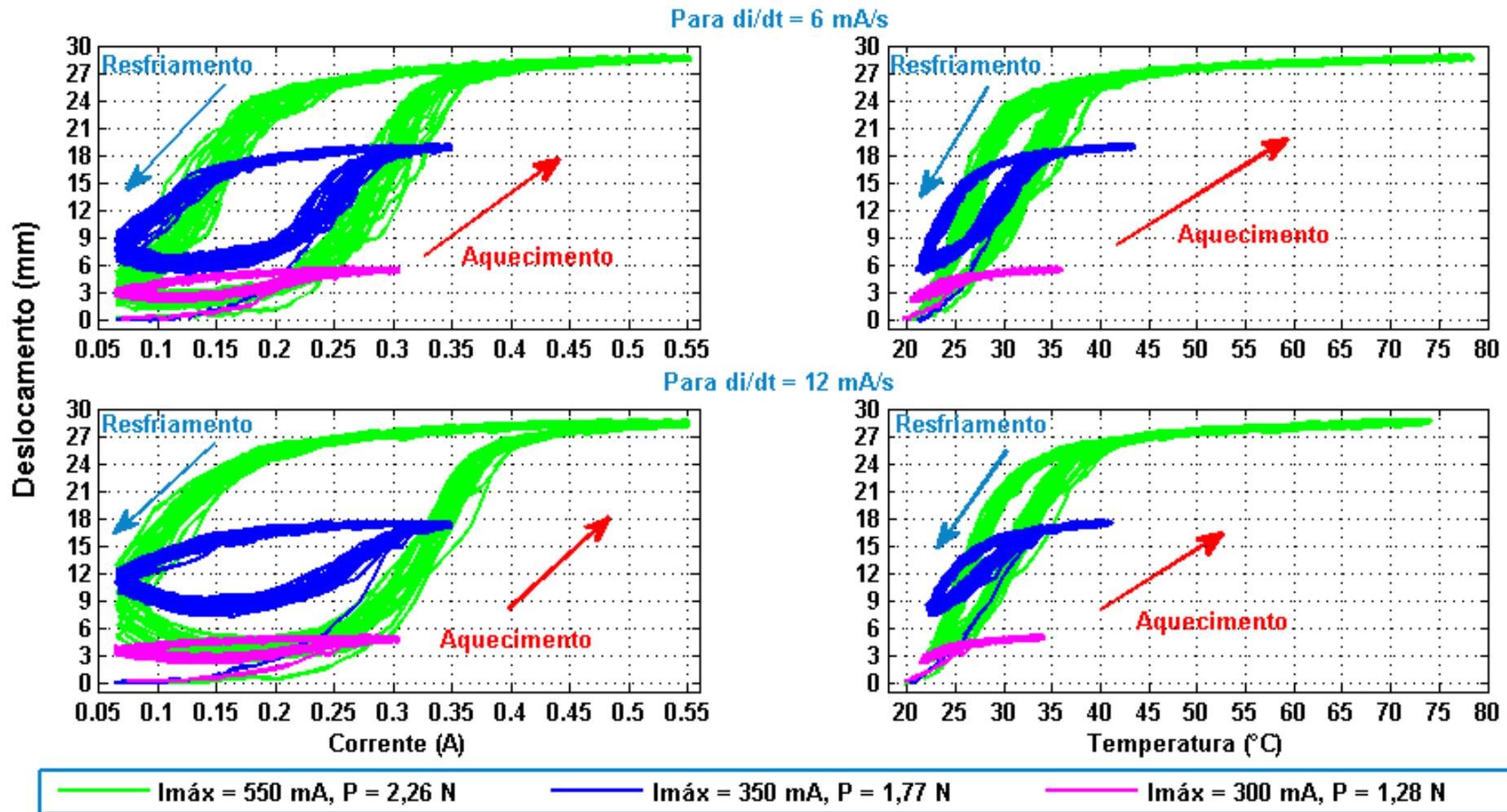
Tabela 1: Valores das correntes elétricas e temperaturas nas regiões de ativação e saturação para os maiores níveis de corrente elétrica e ambas taxas de variação.

Nível de Corrente Elétrica	Carga (N)	di/dt (mA/s)	Região de Ativação		Região de Saturação	
			Corrente Elétrica (mA)	Temperatura (°C)	Corrente Elétrica (mA)	Temperatura (°C)
Maiores níveis de corrente elétrica	1,28	6	100	21,06	270	30,73
		12	140	22,13	290	30,18
	1,77	6	120	22,55	310	36,55
		12	140	22,9	330	32,65
	1,962	6	130	22,5	390	47,5
		12	190	23,15	460	49,55

Fonte: Autoria Própria.

Ainda a partir da Figura 21, constata-se que, assim como já observado na literatura por (NASCIMENTO, 2002) para fios finos, as temperaturas de transformação da mini mola de LMF aumentam com a carga aplicada.

Figura 21: Comportamento histerético do deslocamento da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis maiores de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 2 estão listadas as DTs para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os maiores níveis de corrente elétrica. Os valores das médias das DTs apresentados nesta tabela não levam em consideração o primeiro ciclo, já que este se inicia a partir da condição de repouso (sob carga e na temperatura ambiente), sendo assim equivalente à DT recuperada. É possível observar que em todos os casos as DTs para $di/dt = 6$ mA/s são maiores quando comparadas com $di/dt = 12$ mA/s.

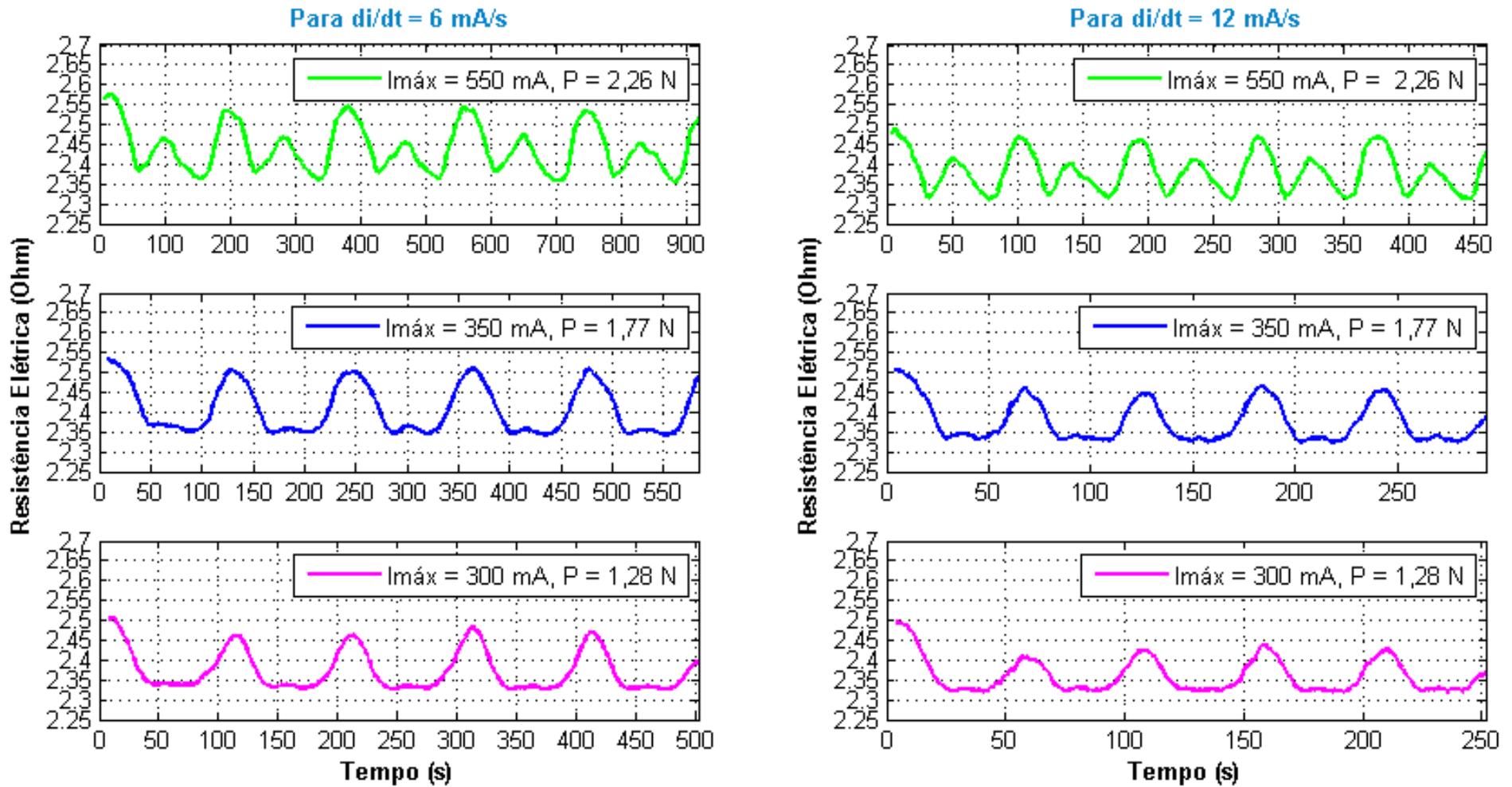
Tabela 2: Valores de deformações termoelásticas para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os maiores níveis de corrente elétrica.

DEFORMAÇÃO TERMOELÁSTICA (DT, em mm)								
Ciclos		1	5	10	15	20	25	Média
2,26N	6 mA/s	28,80	26,86	27,24	26,82	26,86	26,66	26,89
	12 mA/s	28,65	25,94	26,28	25,61	26,25	25,59	25,93
1,77N	6 mA/s	19,09	13,05	12,08	13,4	13,85	13,31	13,14
	12 mA/s	17,61	8,77	9,06	9,51	9,72	8,91	9,19
1,28N	6 mA/s	5,53	3,57	3,06	3,25	3,21	3,15	3,25
	12 mA/s	4,94	2,34	2,5	2,35	2,29	2,23	2,34

Fonte: Autoria Própria

Na Figura 22 apresentam-se os primeiros cinco ciclos do comportamento da resistência elétrica absoluta para as três cargas mecânicas exploradas e maiores níveis de corrente elétrica. Verifica-se que o maior valor de resistência elétrica ocorre quando a mini mola está na temperatura ambiente e distendida sob carga mecânica em repouso (condição de referência), ou seja, o valor mais elevado do primeiro ciclo termomecânico.

Figura 22: Comportamento da resistência elétrica no tempo para a mini mola de Ni-Ti para os níveis maiores de corrente elétrica.



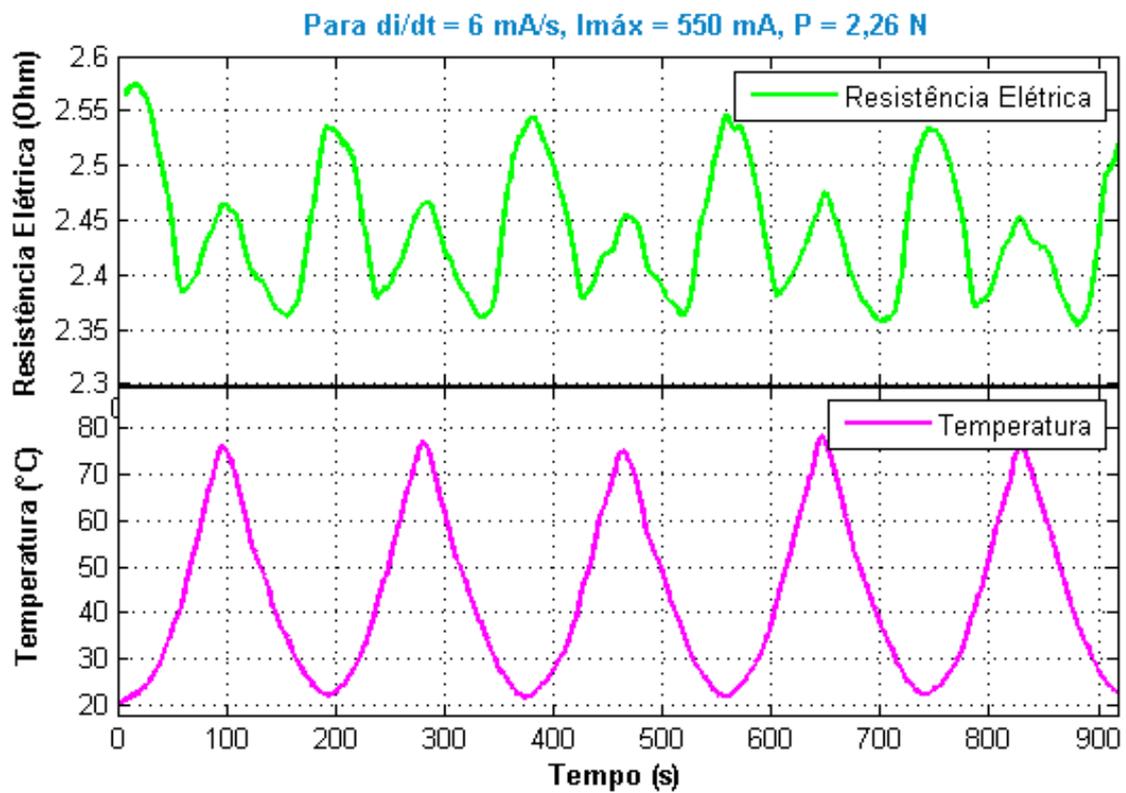
Fonte: Autoria Própria

A resistência elétrica diminui de valor quando a mini mola está em processo de contração (mesmo que no aquecimento). A partir do momento que o aquecimento não provoca mais a contração, a resistência elétrica começa a aumentar (ainda no semi-ciclo de aquecimento). Esse comportamento pode ser observado para as cargas de 2,26 N e 1,77 N, nesta última com intensidade bem menor. Para a carga mecânica de 1,28 N esse comportamento é quase imperceptível.

Quando a mini mola de LMF inicia o resfriamento (sem haver distensão ainda) a resistência elétrica começa a diminuir de valor, porém, quando se inicia o processo de distensão (ainda com o resfriamento) a resistência elétrica começa a aumentar. Da mesma forma que ocorre no aquecimento, isso pode ser observado para as cargas de 2,26N e 1,77, nesta última com intensidade bem menor. Para a carga mecânica de 1,28 N esse comportamento é quase imperceptível. Na Figura 23 é possível verificar o desempenho da resistência elétrica e da temperatura na mini mola de Ni-Ti para a carga mecânica de 2,26 N e uma $di/dt = 6$ mA/s, para uma melhor visualização deste comportamento.

Este fenômeno é explicado por que a contração da LMF (transformação da fase martensita para austenita, neste caso) causa a diminuição da resistência elétrica (mesmo que no processo de aquecimento), enquanto que apenas o aquecimento causa um aumento (FURST; SEELECKE, 2014). O comportamento oposto também é válido, ou seja, a distensão da mini mola (transformação da fase austenita para martensita) causa um aumento na resistência elétrica (mesmo que no processo de resfriamento), enquanto que apenas o resfriamento causa uma diminuição.

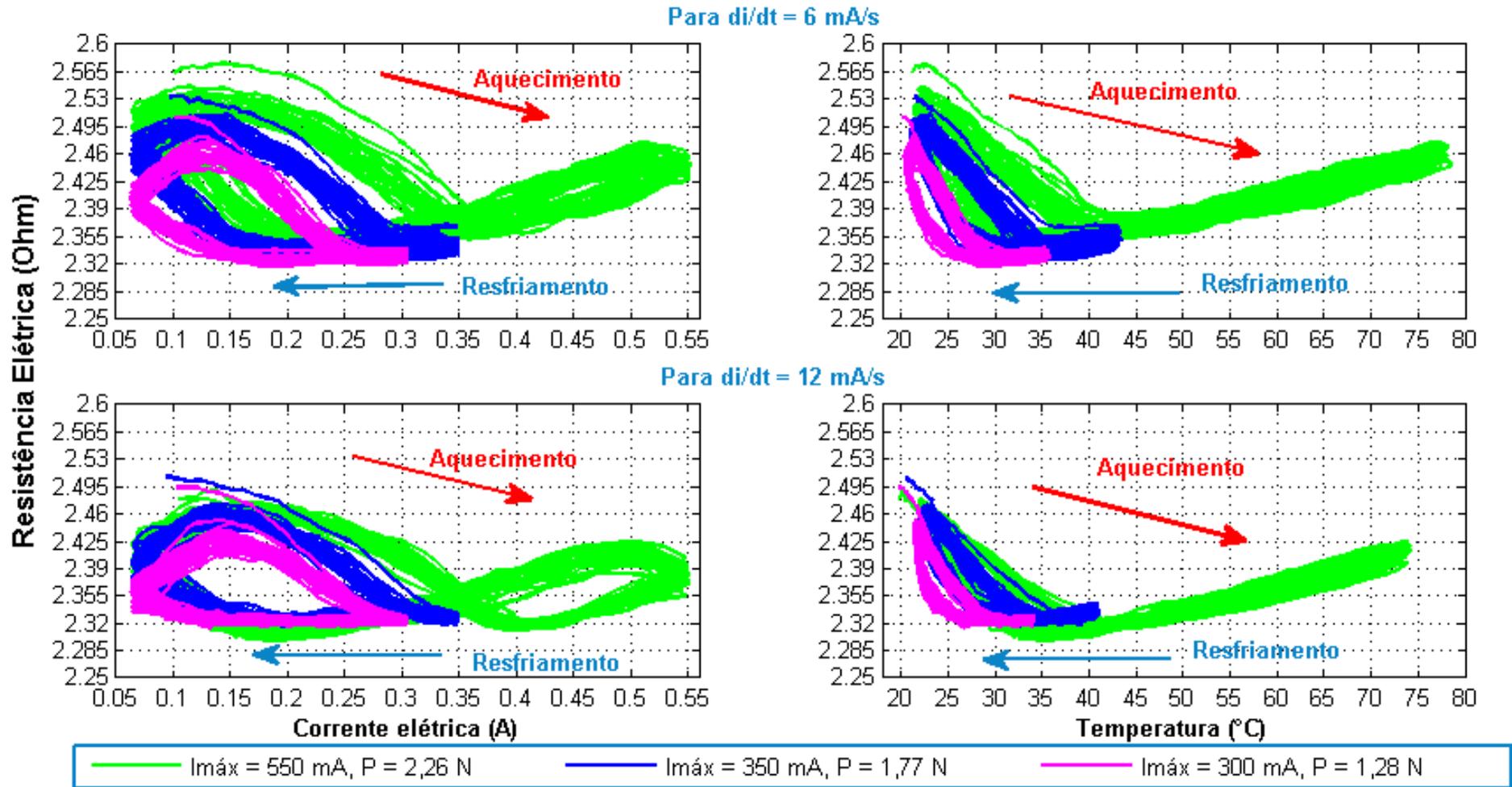
Figura 23: Comportamento da resistência elétrica e da temperatura no tempo para a mini mola de Ni-Ti para os níveis maiores de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

Este comportamento também pode ser observado a partir da Figura 24, que apresenta a evolução dos laços histeréticos da resistência elétrica em função da corrente elétrica e da temperatura para as três cargas mecânicas exploradas. Este resultado foi obtido para os primeiros 25 ciclos térmicos de trabalho mecânico.

Figura 24: Comportamento histerético da resistência elétrica da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis maiores de corrente elétrica.

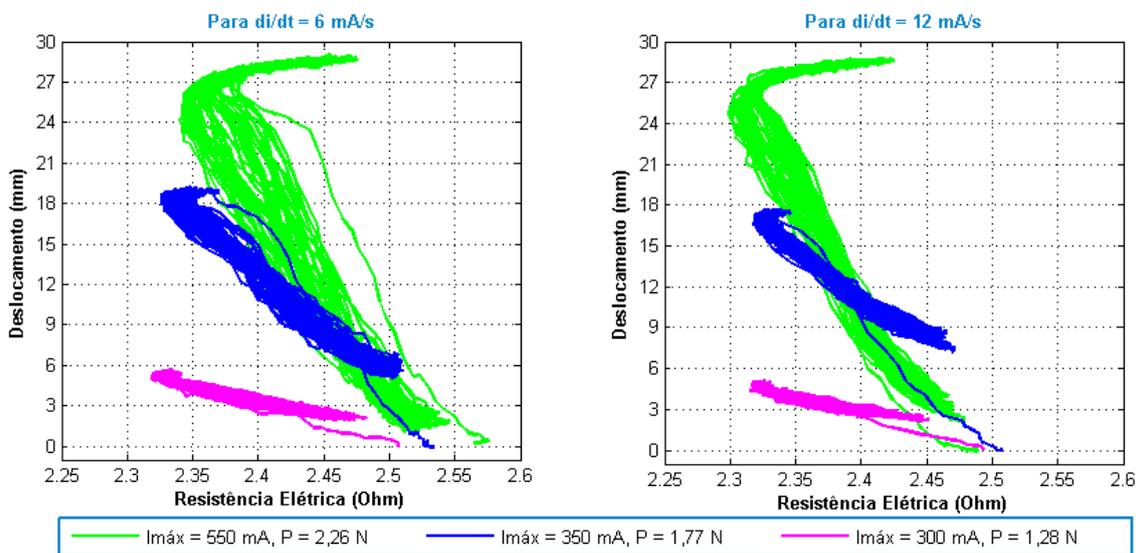


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 25 verifica-se o comportamento obtido para o deslocamento em função da resistência elétrica para as três cargas distintas e maiores níveis de corrente elétrica. É possível observar que, quanto maior a carga maior será a histerese dessa relação. Adicionalmente, para a taxa mais lenta de $di/dt = 6$ mA/s a histerese apresenta-se mais larga quando comparada com a taxa mais rápida, de $di/dt = 12$ mA/s. Em todos os resultados é possível observar uma região praticamente linear tanto no aquecimento quanto no resfriamento.

Além disso, verificou-se que para as cargas de 2,26 N e 1,77 N, para ambas as taxas (di/dt), houve também o aparecimento de uma segunda região linear, que correspondente a um superaquecimento, em que não há transformação de fase, mas apenas o aquecimento ou resfriamento da mini mola de LMF.

Figura 25: Comportamento do deslocamento da mini mola de LMF em função da resistência para as taxas de variação de corrente elétrica de 6 e 12mA/s e níveis maiores de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

5.2.2 PARA OS NÍVEIS INTERMEDIÁRIOS DE CORRENTE ELÉTRICA

Na Figura 26 apresenta-se o comportamento em histerese do deslocamento da mini mola com relação à corrente elétrica e a temperatura, obtidos para os primeiros 25 ciclos térmicos de trabalho mecânico, para os níveis intermediários de corrente elétrica aplicados nas três cargas mecânicas utilizadas.

Com a $di/dt = 6$ mA/s, foi observado que, para a carga de 2,26 N, a mini mola inicia a contração em torno de uma corrente de 140 mA, que corresponde à uma temperatura da ordem de 23,26 °C, e que antes dos 370 mA (aproximadamente 45°C) a mini mola de LMF começa a caminhar para a saturação. Já para a carga de 1,77 N, a contração é iniciada em torno de 120 mA (21,5°C) e a saturação ocorre a partir dos 300 mA (35,28°C). Finalmente, para 1,28 N tem-se aproximadamente os valores de 100 mA (20,8 °C) e 250 mA (28,88 °C) para ativação e saturação, respectivamente.

Já para a $di/dt = 12$ mA/s, quando a mini mola de LMF se encontra submetida a carga de 2,26 N o início da contração se dá em 170 mA (22,85 °C) e a saturação em 410 mA (44,8 °C). Para 1,77 N a contração se inicia em 160 mA (22,8 °C) e a saturação ocorre para 310 mA (32,75 °C), e por último, para a carga 1,28 N, o início da contração é em 140 mA (21,74 °C) e da saturação em 260 mA (27,6 °C). Estes valores encontram-se resumidos na Tabela 3.

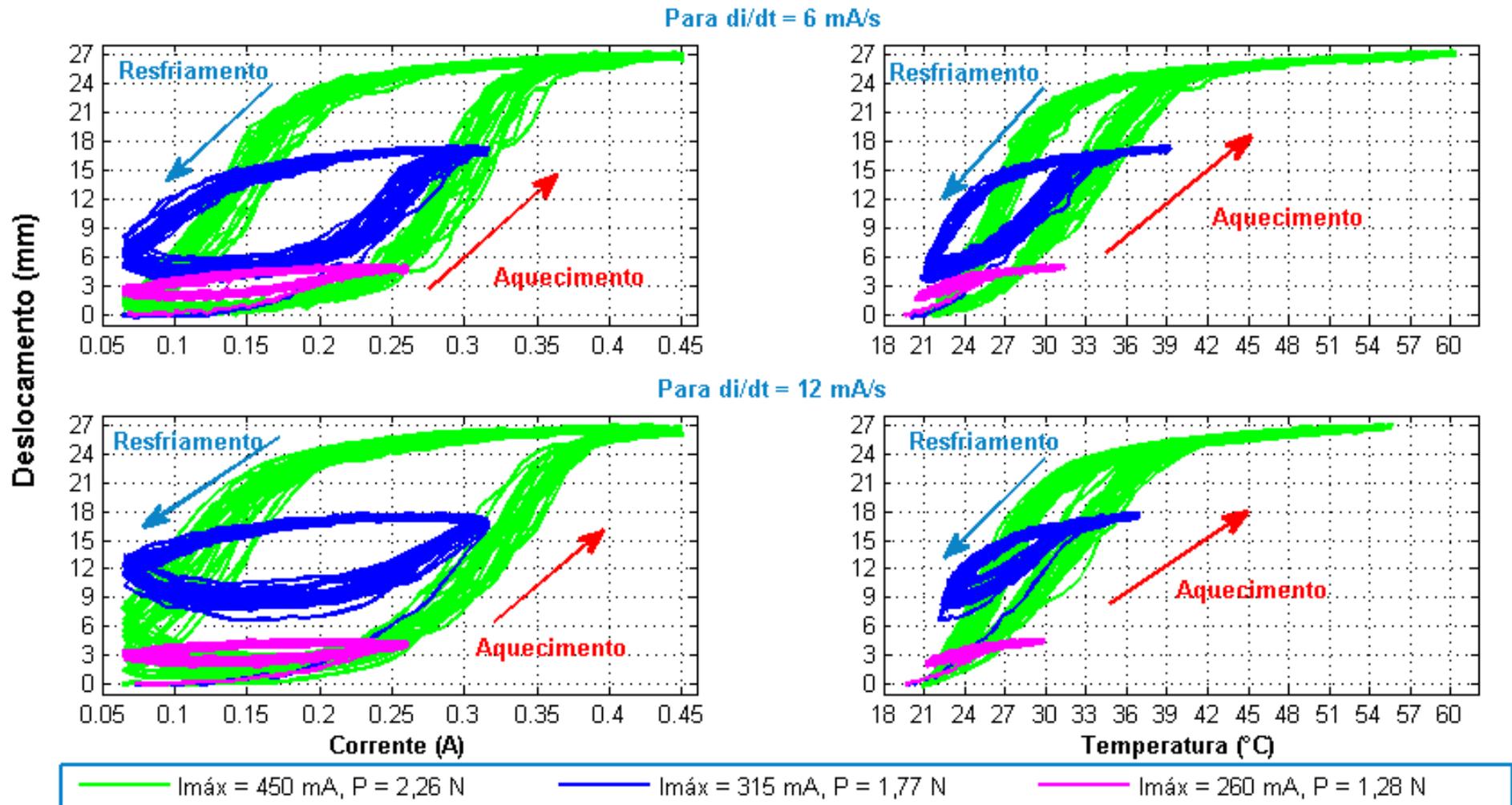
Tabela 3: Valores das correntes elétricas e temperaturas nas regiões de ativação e saturação para os níveis intermediários de corrente elétrica e ambas taxas de variação.

Nível de Corrente Elétrica	Carga (N)	di/dt (mA/s)	Região de Ativação		Região de Saturação	
			Corrente Elétrica (mA)	Temperatura (°C)	Corrente Elétrica (mA)	Temperatura (°C)
Níveis intermediários de Corrente Elétrica	1,28	6	100	20,8	250	28,88
		12	140	21,74	260	27,6
	1,77	6	120	21,5	300	35,28
		12	160	22,8	310	32,75
	1,962	6	140	23,26	370	45,05
		12	170	22,85	410	44,8

Fonte: Autoria Própria.

Observando uma vez mais a Figura 26 é possível concluir que, assim como já mostrado na literatura para fios finos de LMF (NASCIMENTO, 2002), as temperaturas de transformação da mini mola de LMF aumentam com a carga aplicada.

Figura 26: Comportamento histerético do deslocamento da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis intermediários de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 4 estão listadas as DTs para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os níveis intermediários de corrente elétrica. Os valores das médias das DTs apresentados nesta tabela, do mesmo modo que no caso anterior, não levam em consideração o primeiro ciclo, já que este se inicia a partir da condição de repouso (sob carga e na temperatura ambiente), sendo assim equivalente à DT recuperada. É possível observar que em todos os casos, as DTs para $di/dt = 6$ mA/s são maiores quando comparadas com $di/dt = 12$ mA/s.

Tabela 4: Valores de deformações termoelásticas para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os níveis intermediários de corrente elétrica.

DEFORMAÇÃO TERMOELÁSTICA (DT, em mm)								
Ciclos		1	5	10	15	20	25	Média
2,26N	6 mA/s	27,09	26,34	26,36	25,96	26,39	26,97	26,40
450 mA	12 mA/s	26,98	23,98	24,06	24,17	24,72	24,83	24,35
1,77N	6 mA/s	17,34	13,49	13,02	12,92	12,04	13,17	12,93
315 mA	12 mA/s	17,33	7,8	9,45	9,83	9,33	9,94	9,27
1,28 N	6 mA/s	4,92	3,04	2,96	3,02	3,23	3,25	3,10
260 mA	12 mA/s	4,47	2,33	2,11	2,17	1,84	2,4	2,17

Fonte: Autoria Própria

Na Figura 27 apresenta-se o comportamento da resistência elétrica absoluta para as três cargas mecânicas exploradas e níveis intermediários de corrente elétrica. Do mesmo modo que no caso anterior, verifica-se que o maior valor de resistência elétrica ocorre quando a mini mola está na temperatura ambiente e distendida sob carga mecânica em repouso (condição de referência), ou seja, o valor mais elevado do primeiro ciclo termomecânico.

Como já apresentado anteriormente, a resistência elétrica diminui de valor quando a mini mola está em processo de contração (mesmo que no aquecimento). A partir do momento que o aquecimento não provoca mais a contração, a resistência elétrica começa a aumentar (ainda no semi-ciclo de aquecimento), isso pode ser observado para a carga de 2,26 N. Para 1,77 N e $di/dt = 6$ mA/s esse efeito é quase

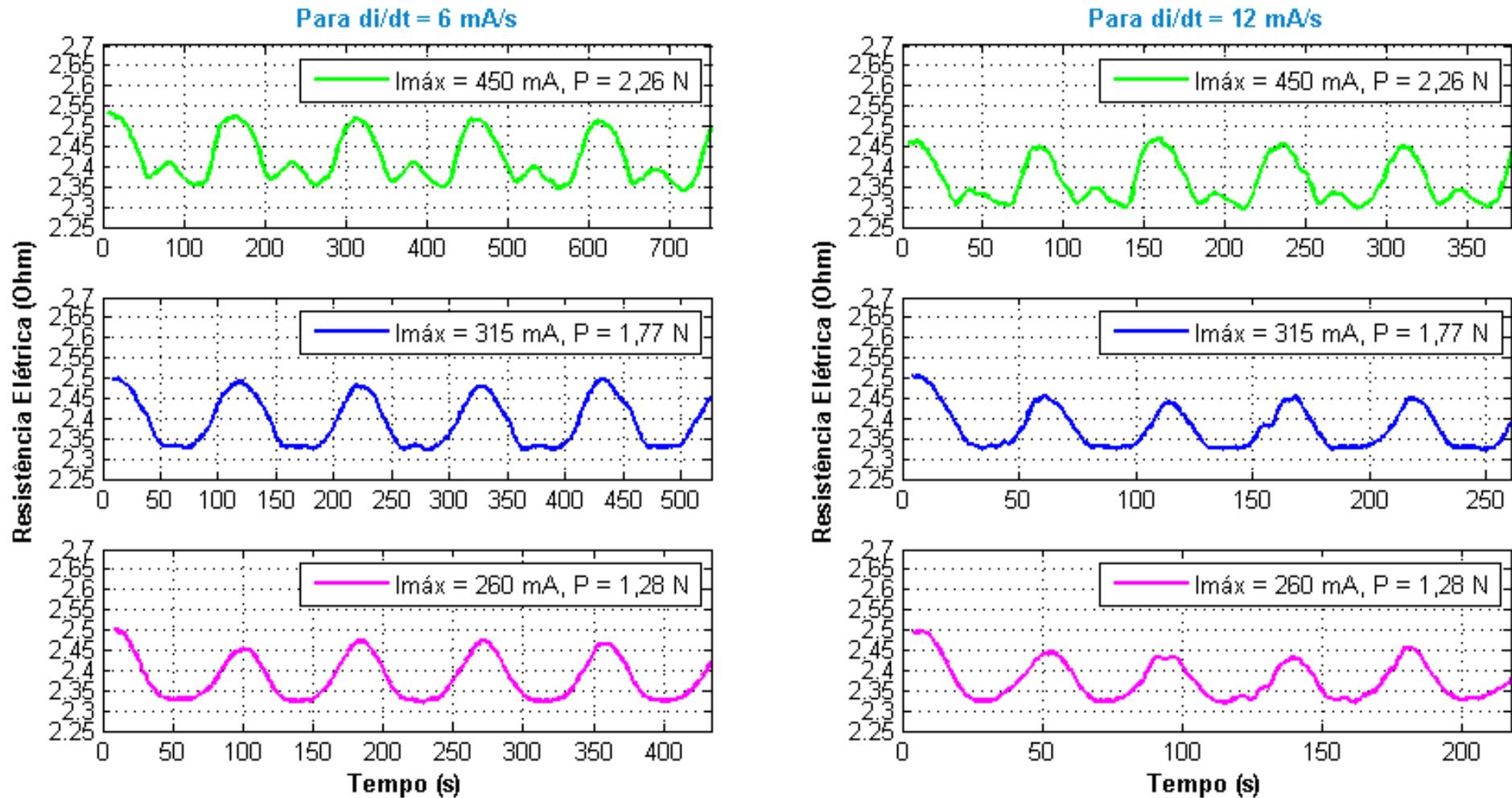
imperceptível, e para as demais situações a resistência elétrica fica, por um breve período, estabilizada, devido ao efeito do aquecimento anular o efeito da contração.

Quando a mini mola de LMF inicia o resfriamento (sem haver distensão ainda) a resistência elétrica começa a diminuir de valor, porém, quando se inicia o processo de distensão (ainda com o resfriamento) a resistência elétrica começa a aumentar, conforme pode ser observado para a carga de 2,26 N. Para 1,77 N e $di/dt = 6 \text{ mA/s}$ esse efeito é quase imperceptível, e para as demais situações a resistência elétrica fica por um breve período estabilizada, devido ao efeito do resfriamento anular o efeito da distensão.

Novamente, este fenômeno é explicado por que a contração da LMF (transformação da fase martensita para austenita, neste caso) causa a diminuição da resistência elétrica (mesmo que no processo de aquecimento), enquanto que apenas o aquecimento causa um aumento (FURST; SEELECKE, 2014). O comportamento oposto também é válido, ou seja, a distensão da mini mola (transformação da fase austenita para martensita) causa um aumento na resistência elétrica (mesmo que no processo de resfriamento), enquanto que apenas o resfriamento causa uma diminuição.

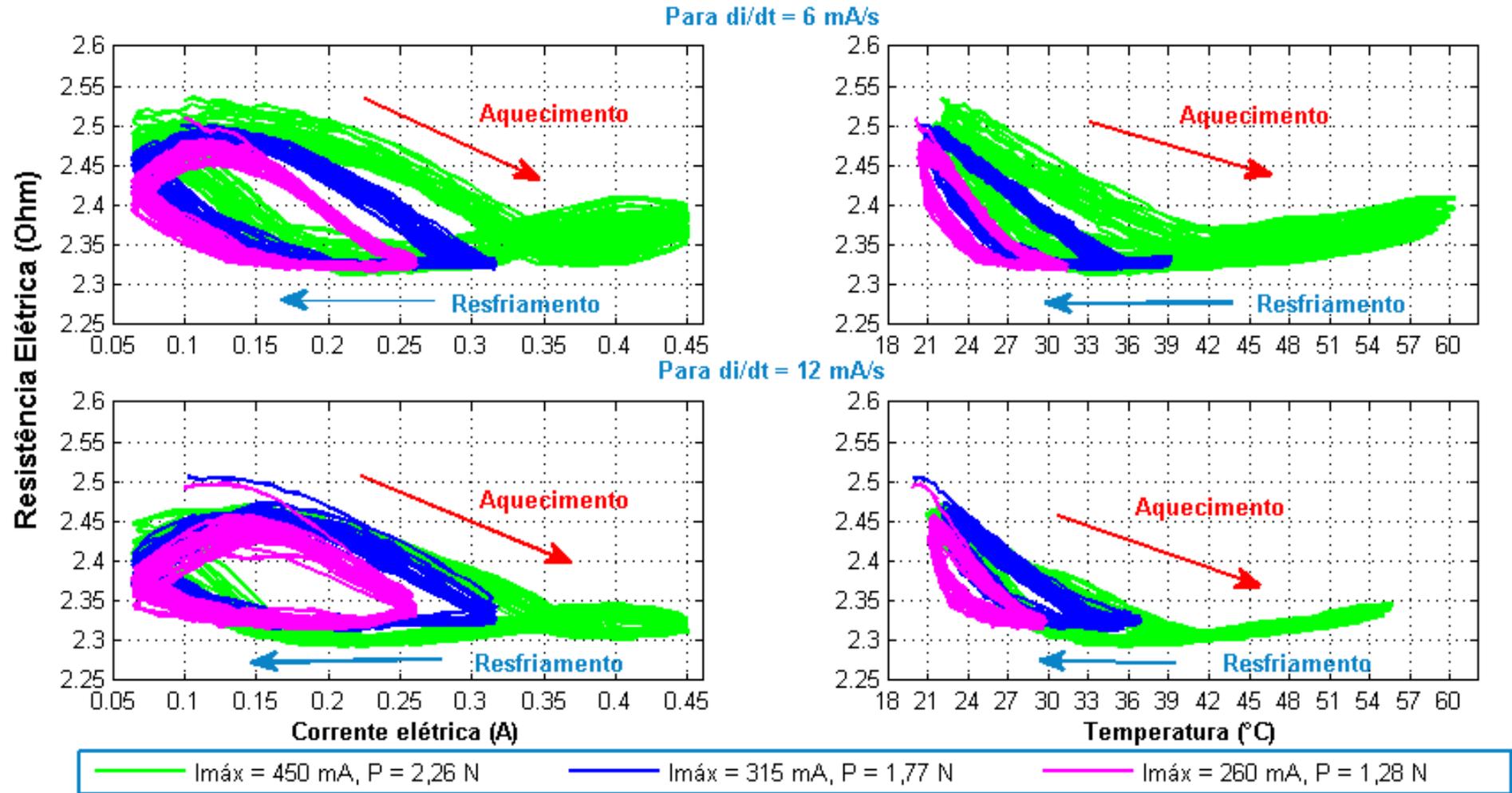
Este comportamento também pode ser observado a partir da Figura 28, a partir da qual é possível observar a evolução da resistência elétrica em função da corrente elétrica e da temperatura para as três cargas mecânicas exploradas, obtido para os primeiros 25 ciclos térmicos de trabalho mecânico.

Figura 27: Comportamento da resistência elétrica no tempo para a mini mola de Ni-Ti para os níveis intermediários de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

Figura 28: Comportamento histerético da resistência elétrica da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis intermediários de corrente elétrica.

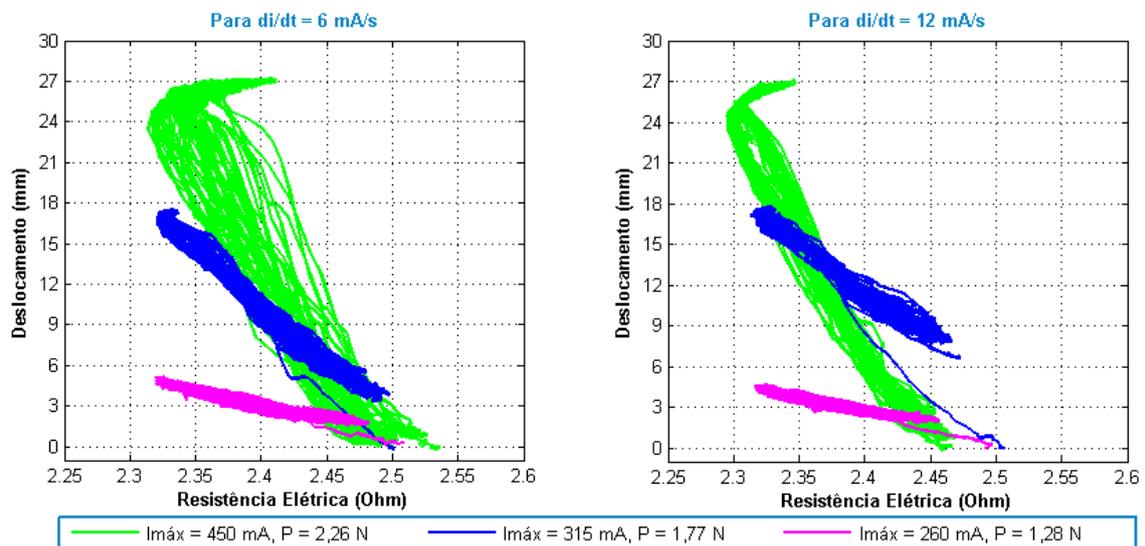


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 29 visualiza-se o comportamento obtido para o deslocamento em função da resistência elétrica para as três cargas distintas e níveis intermediários de corrente elétrica. Novamente, é possível observar que quanto maior a carga maior será a histerese dessa relação. Além disso, para a taxa mais lenta, de $di/dt = 6$ mA/s, a histerese apresenta-se mais larga quando comparada com a taxa mais rápida, de $di/dt = 12$ mA/s. Em todos os resultados é possível observar uma região linear no aquecimento e outra no resfriamento, também praticamente sem histerese para as cargas de 1,28 N e 1,4715 N.

Além disso, verificou-se que para a carga mais alta, de 2,26 N, em ambas as taxas, houve também o aparecimento da segunda região linear, que correspondente a um superaquecimento em que não há transformação de fase, mas apenas o aquecimento ou resfriamento da mini mola de LMF.

Figura 29: Comportamento do deslocamento da mini mola de LMF em função da resistência para as taxas de variação de corrente elétrica de 6 e 12mA/s e níveis intermediários de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

5.2.3 PARA OS NÍVEIS MENORES DE CORRENTE ELÉTRICA

Na Figura 30 é possível visualizar, agora para os menores níveis de correntes elétrica e ambas as taxas de variação, o comportamento histerético do deslocamento da mini mola em relação à corrente elétrica e a temperatura, obtidos para os primeiros 25 ciclos térmicos de trabalho mecânico.

Com a $di/dt = 6$ mA/s, foi observado que, para a carga de 2,26 N, a mini mola inicia a contração em torno de uma corrente de 140 mA, que corresponde à uma temperatura da ordem de 24,32 °C, e que antes dos 350 mA (aproximadamente 42,5 °C) a mini mola de LMF começa a caminhar para a saturação. Já para a carga de 1,77 N, a contração se inicia em torno de 120 mA (24,32 °C) e a saturação a partir dos 275 mA (35,35 °C). E, finalmente, para 1,28 N tem-se aproximadamente os valores 100 mA (20,72 °C) e 220 mA (26,46°C) para ativação e saturação, respectivamente.

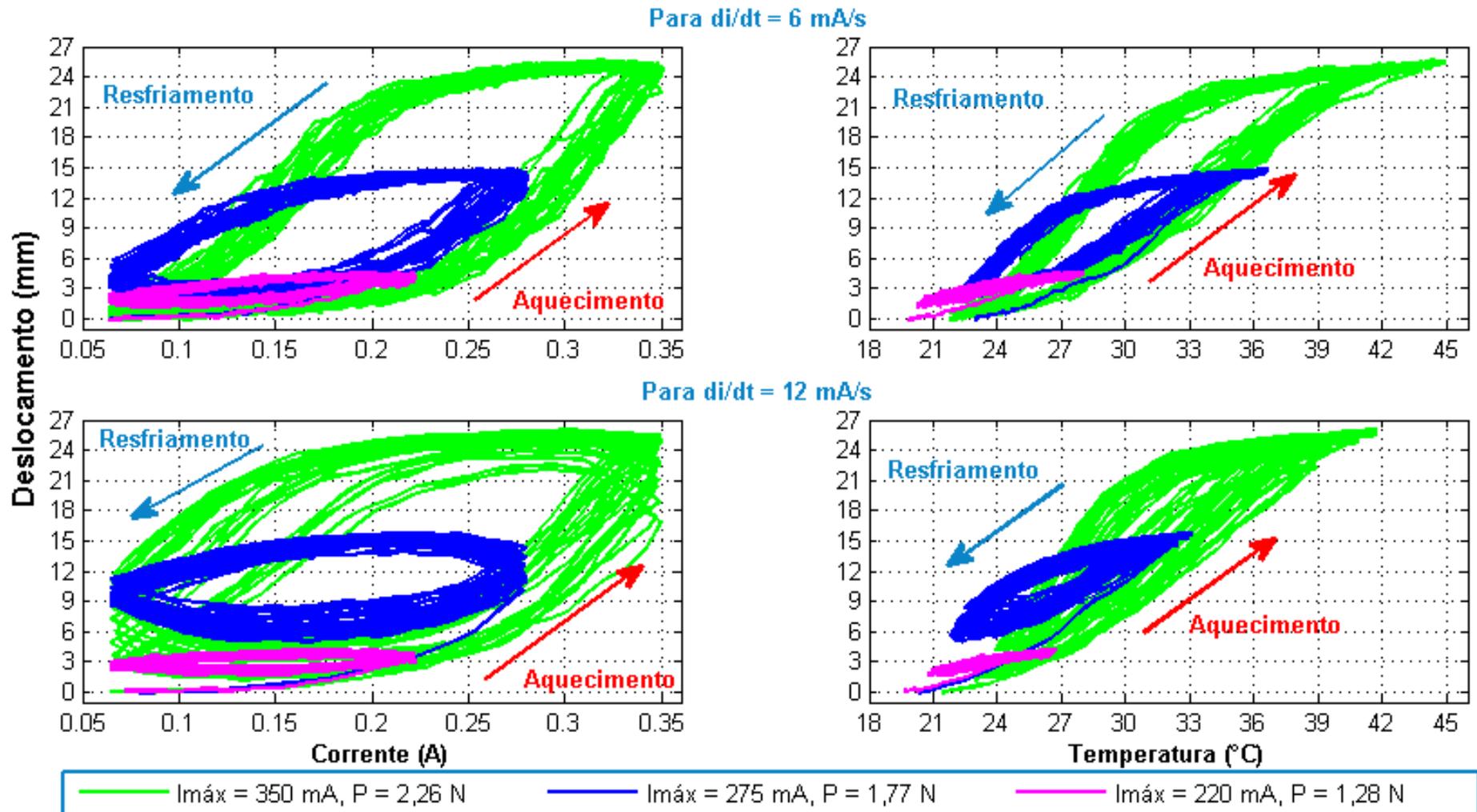
Já para a $di/dt = 12$ mA/s, quando a mini mola de LMF se encontra submetida a carga de 2,26N, o início da contração ocorre em 170 mA (24,73 °C) e para esse nível de carga o deslocamento não chega a saturar. Para 1,77 N a contração se inicia em 160 mA (22,75 °C) e também não entra em saturação. Por último, para a carga 1,28 N o início da contração se dá em 140 mA (21,47 °C) e da saturação em 230 mA (25,05 °C). Na Tabela 5 encontram-se resumidos estes valores.

Tabela 5: Valores das correntes elétricas e temperaturas nas regiões de ativação e saturação para os menores níveis de corrente elétrica e ambas as taxas de variação de corrente.

Nível de Corrente Elétrica	Carga (N)	di/dt (mA/s)	Região de Ativação		Região de Saturação	
			Corrente Elétrica (mA)	Temperatura (°C)	Corrente Elétrica (mA)	Temperatura (°C)
Menores níveis de Corrente Elétrica	1,28	6	100	20,72	220	26,46
		12	140	21,47	220	25,05
	1,77	6	120	24,32	275	35,35
		12	160	22,75	X	X
	1,962	6	140	24,32	350	42,5
		12	170	24,73	X	X

Fonte: Autoria Própria.

Figura 30: Comportamento histerético do deslocamento da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis menores de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 6 estão listadas as DTs para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os menores níveis de corrente elétrica. Novamente, os valores das médias das DTs apresentados nesta tabela não leva em consideração o primeiro ciclo, já que este se inicia a partir da condição de repouso (sob carga e na temperatura ambiente), sendo assim equivalente à DT recuperada. É possível observar que em todos os casos, as DTs para $di/dt = 6$ mA/s são maiores quando comparadas com $di/dt = 12$ mA/s.

Tabela 6: Valores de deformações termoelásticas para os ciclos 1, 5, 10, 15, 20 e 25 para os menores níveis de corrente elétrica.

DEFORMAÇÃO TERMOELÁSTICA (DT, em mm)								
Ciclos		1	5	10	15	20	25	Média
2,26N	6 mA/s	25,03	24,34	23,82	24,56	24,26	24,48	24,30
	12 mA/s	25,27	21,39	20,87	21,54	21,99	23,00	21,76
1,77N	6 mA/s	14,65	11,71	11,69	12,26	12,13	12,09	11,98
	12 mA/s	14,89	8,28	9,21	8,68	8,38	9,93	8,9
1,28 N	6 mA/s	4,47	2,84	2,91	3,13	2,69	2,76	2,87
	12 mA/s	4,19	2,55	2,16	1,44	2,21	2,12	2,10

Fonte: Autoria Própria

Observando ainda a Figura 30 é possível verificar, da mesma forma que para os outros níveis de corrente elétrica, que para cargas mecânicas maiores, o laço de histerese encontra-se deslocado na direção do aumento de corrente elétrica/temperatura. Este comportamento corresponde a um aumento das temperaturas de transformação em função do carregamento mecânico, e é típico das LMF, sendo descrito por uma lei de Clausius-Clayperon modificada para o caso destes materiais (OTSUKA; WAYMAN, 1998).

Quando se tem apenas a curva deslocamento *versus* corrente elétrica tem-se uma falsa impressão do real comportamento da mini mola, já que esta curva mostra em alguns pontos que com o aumento da corrente elétrica o atuador estaria se alongando, ao invés de se contrair. Logo, constata-se que o sensor de temperatura é de fundamental importância para revelar o real comportamento da mini mola de Ni-Ti, ou seja, a partir do momento que se inicia o aquecimento o material responde instantaneamente.

Estes comportamentos também podem ser visualizados para os outros níveis de corrente elétrica, porém estes níveis não apresentaram superaquecimento da mini mola de LMF.

Na Tabela 7 estão listados os valores médios para as temperaturas críticas, deformações termoelásticas e histereses térmicas para as cargas mecânicas de 2,26 N e 1,77 N e $di/dt = 6$ mA/s e os valores correspondentes à mini mola sem carga (ensaio do DSC). Não foi possível obter esses resultados para a carga de 1,28 N, pelo fato dessa carga aplicada não ser suficiente para promover uma grande quantidade de martensita induzida por tensão no interior do material da mini mola, mas é suficiente para confirmar o fenômeno do efeito memória de forma durante a ciclagem térmica.

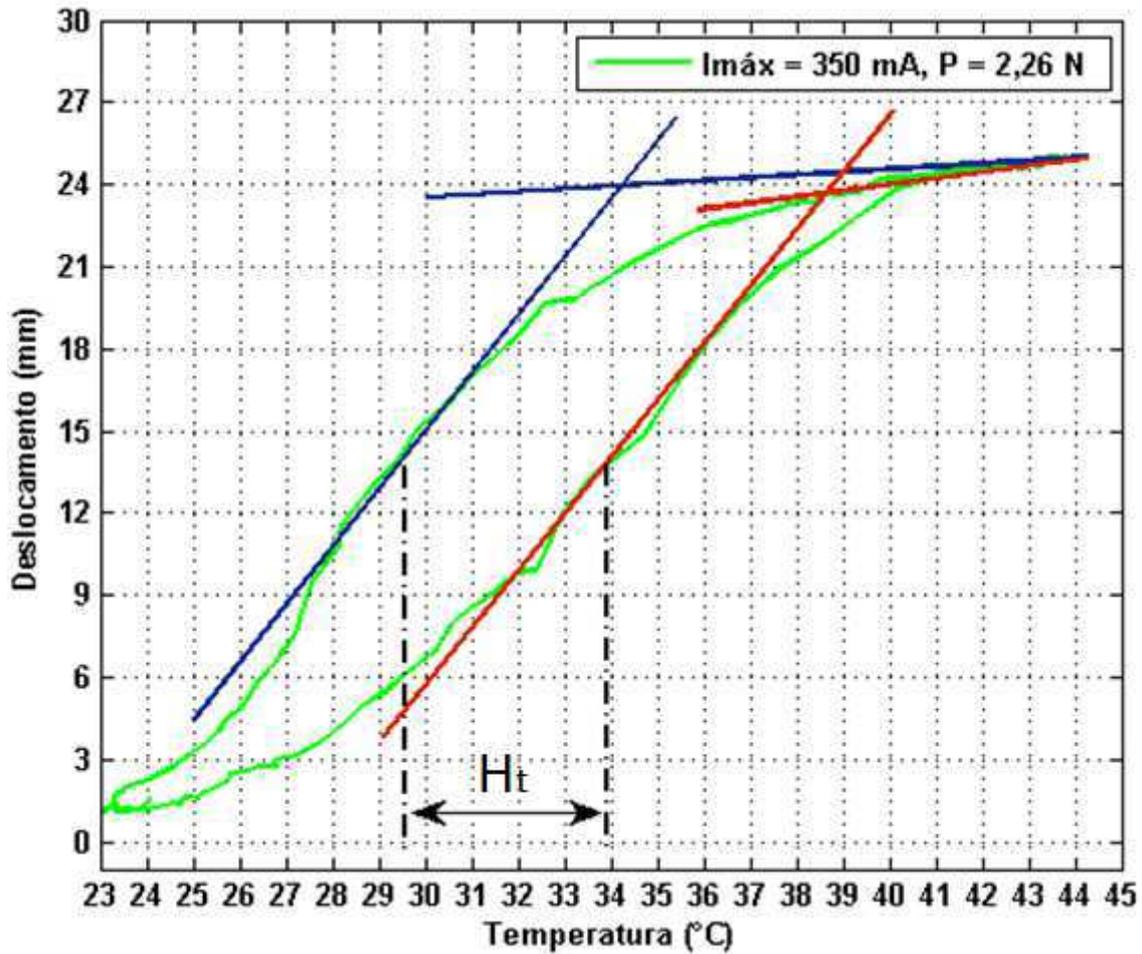
Tabela 7: Temperaturas críticas, deformação termoelástica e histerese térmica das mini molas para 6 mA/s.

Carga	M_s^σ (°C)	A_f^σ (°C)	H_t (°C)	DT (mm)
1,77 N	27,6	33,2	5,5	11,98
2,26 N	31,6	39,9	6,0	24,30
0 N (DSC)	12,39	16,18	5,73	X

Fonte: Autoria própria

Na Figura 31 ilustra-se o método das tangentes aplicado a um dos ciclos térmicos para a carga de 2,26 N mostrando como foram encontrados os valores de temperaturas de transformação e da histerese térmica da tabela anterior. Para todos os outros ciclos foi aplicada essa mesma técnica.

Figura 31: Representação das temperaturas críticas e da histerese térmica.



Fonte: Autoria Própria

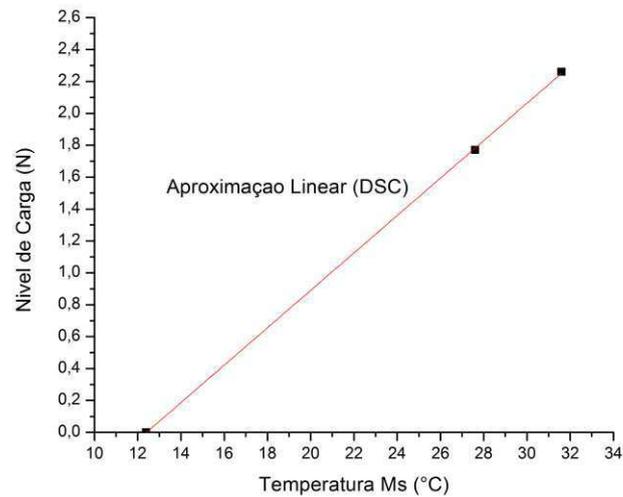
Como essa relação de aumento das temperaturas críticas com o aumento das cargas é linear, foi possível estimar o coeficiente de aumento de M_s^σ e de A_f^σ a partir de uma aproximação linear dos valores da Tabela 7. Na Figura 32 é possível observar estas aproximações. A partir daí tem-se:

$$C_{M_s} = 0,1172 \frac{N}{^\circ C}$$

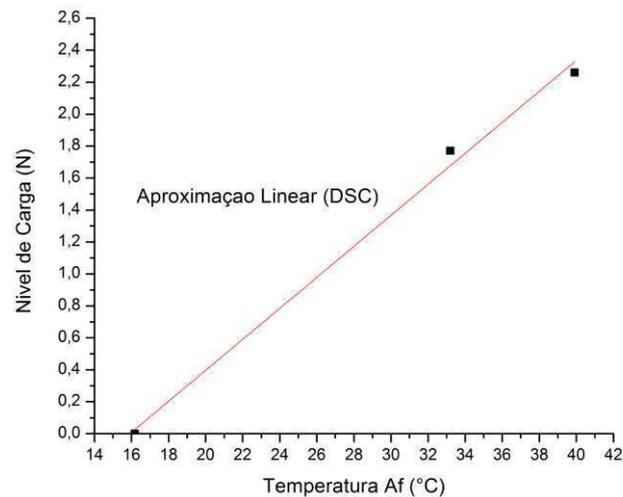
$$C_{A_f} = 0,0969 \frac{N}{^\circ C}$$

Figura 32: Coeficiente de aumento de M_s^σ e de A_f^σ a partir de uma aproximação linear.

a)



b)



Fonte: Autoria Própria

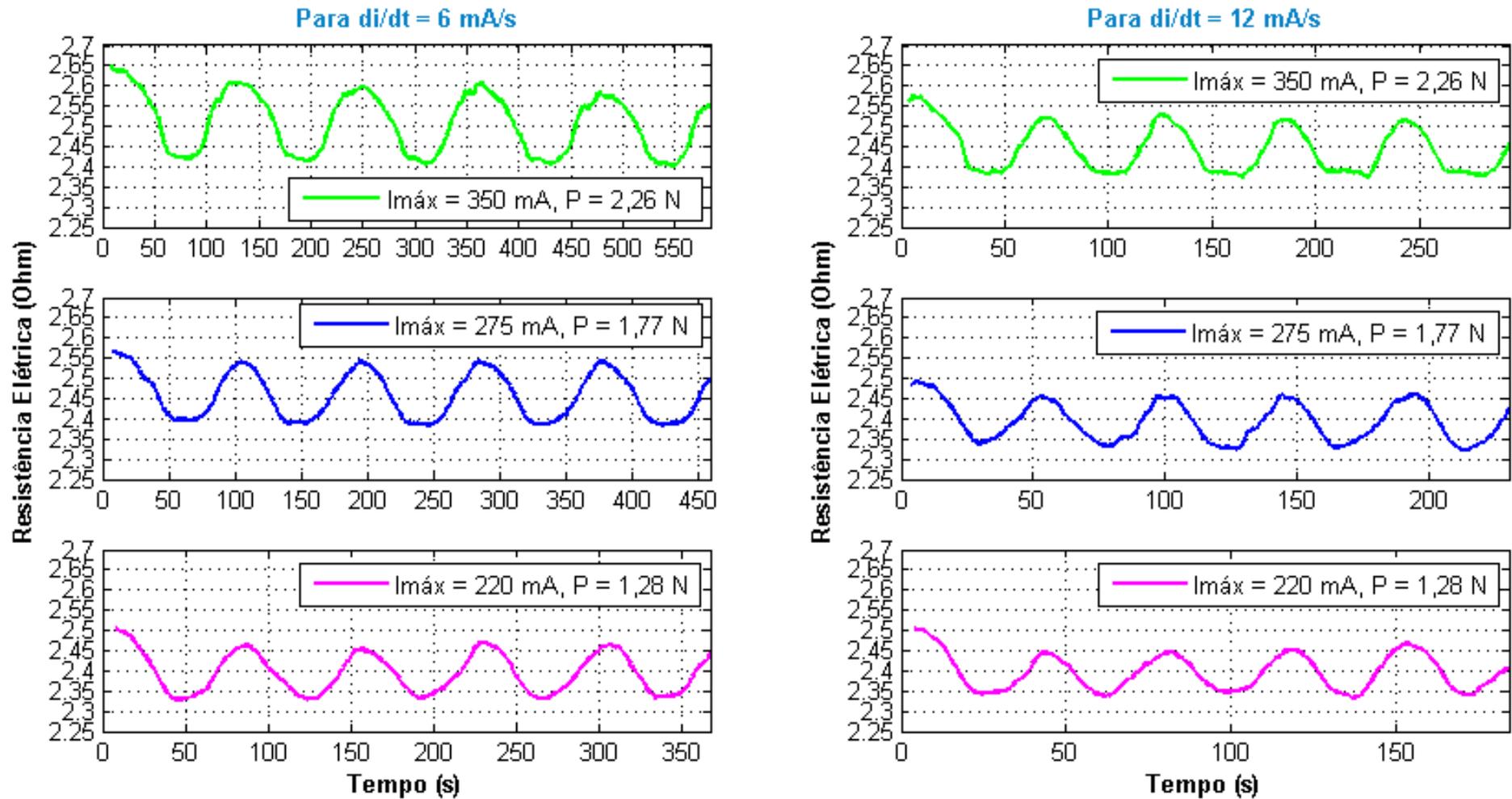
Na Figura 33 apresenta-se o comportamento da resistência elétrica absoluta para cada uma das situações e níveis menores de corrente elétrica. Verifica-se, novamente, que o maior valor de resistência elétrica ocorre quando a mini mola está na temperatura ambiente e sob carga mecânica em repouso, ou seja, o valor mais elevado do primeiro ciclo termomecânico.

A resistência elétrica diminui de valor quando a mini mola se encontra em processo de contração (no aquecimento) e aumenta quando em processo de distensão (no resfriamento).

Da mesma maneira que para os demais níveis de corrente, este fenômeno é explicado por que a contração da LMF (transformação da fase martensita para austenita, neste caso) causa a diminuição da resistência elétrica. O comportamento oposto também é válido, ou seja, a distensão da mini mola (transformação da fase austenita para martensita) causa um aumento na resistência elétrica (FURST; SEELECKE, 2014).

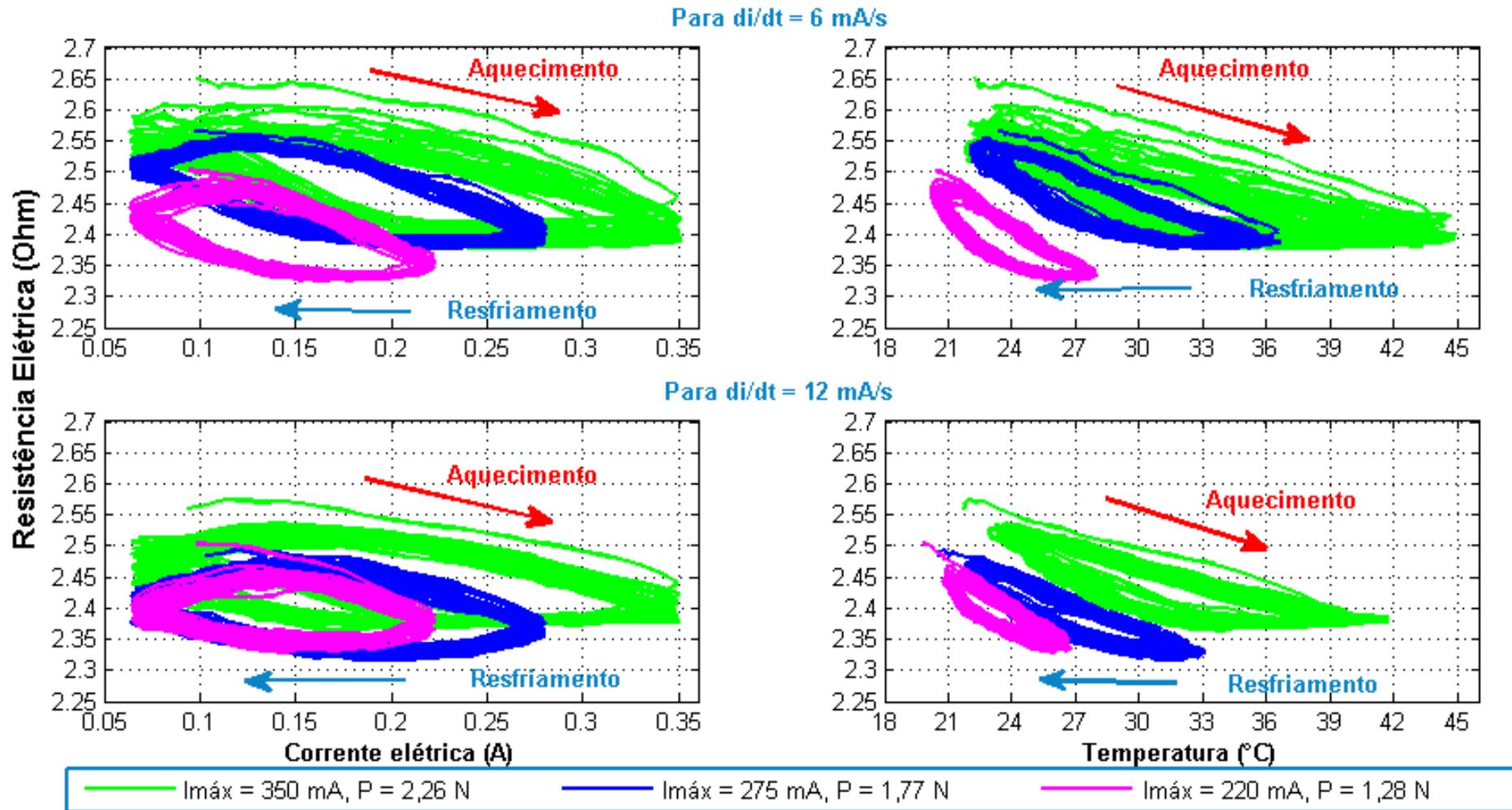
Este comportamento também pode ser observada a partir da Figura 34, a partir da qual é possível observar a evolução da resistência elétrica em função da corrente elétrica e da temperatura para as três cargas mecânicas exploradas, obtido para os primeiros 25 ciclos térmicos de trabalho mecânico.

Figura 33: Comportamento da resistência elétrica no tempo para a mini mola de Ni-Ti para os níveis menores de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

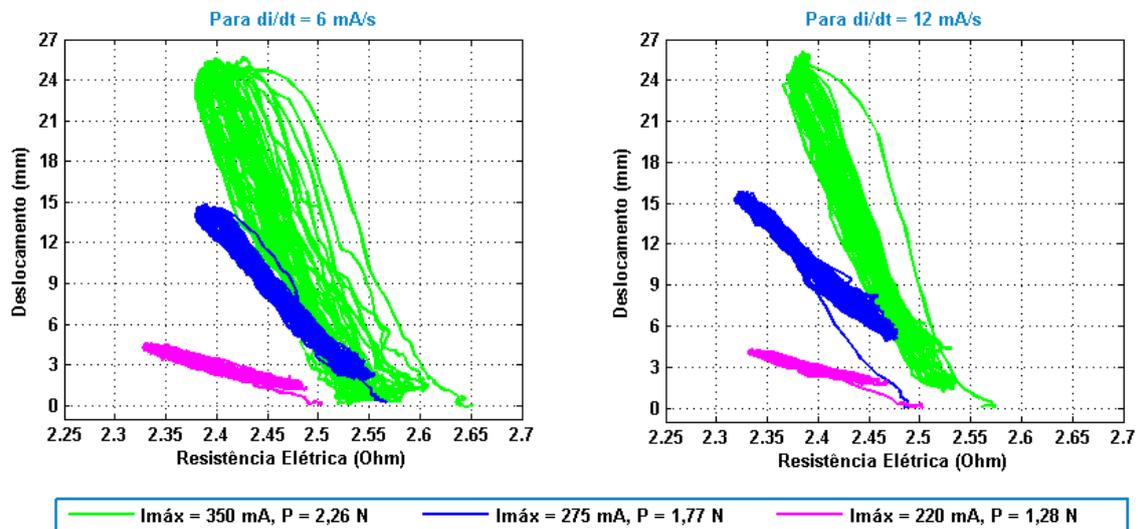
Figura 34: Comportamento histerético da resistência elétrica da mini mola de LMF em relação à corrente elétrica e temperatura para os níveis menores de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

A partir da observação da Figura 35 é possível avaliar o comportamento do deslocamento em função da resistência elétrica para as três cargas distintas e menores níveis de corrente elétrica. Essa relação foi usada recentemente em uma aplicação de dispositivo médico (FURST; SEELECKE, 2012). Constata-se um comportamento quase linear e praticamente sem histerese, sendo possível observar que quanto maior a carga aplicada maior será a histerese dessa relação. Adicionalmente, para a taxa $di/dt = 6$ mA/s a histerese apresenta-se mais larga quando comparada com a taxa mais rápida, de $di/dt = 12$ mA/s. Em todos os resultados é possível observar uma região linear no aquecimento (contração) e outra no resfriamento (distensão), praticamente sem histerese para as cargas de 1,28 N e 1,77 N.

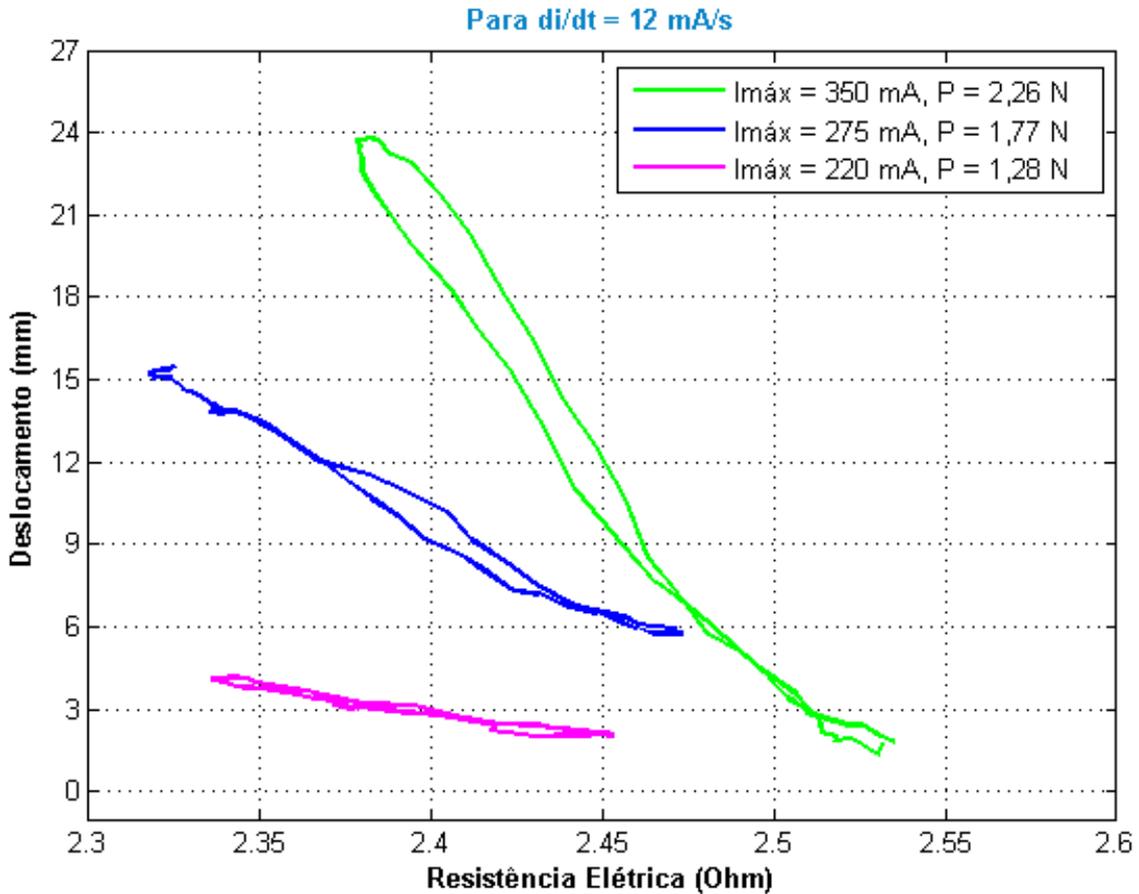
Figura 35: Comportamento do deslocamento da mini mola de LMF em função da resistência para as taxas de variação de corrente elétrica de 6 e 12mA/s e níveis menores de corrente elétrica.



Fonte: Autoria Própria

Foi constatado também que quanto menor a carga mecânica a qual a mini mola de LMF está submetida, menor será a histerese dessa relação, permitindo o controle de algum mini sistema eletromecânico que incorpore as mini molas estudadas nesta pesquisa (por exemplo, uma aplicação na robótica). Para isso seria necessário calcular o coeficiente de inclinação da reta correspondente à relação linear deslocamento *versus* resistência elétrica. No caso da carga de 1,28 N para uma $di/dt = 12$ mA/s, esse coeficiente tem o valor de -22,12 mm/ohm, calculado a partir da média do coeficiente angular de cada um dos ciclos. Esse resultado significa que uma variação de 0,045 ohm na resistência elétrica corresponde a um deslocamento de 1 mm na mini mola. Na Figura 36 ilustra-se essa relação para apenas um ciclo de trabalho termomecânico.

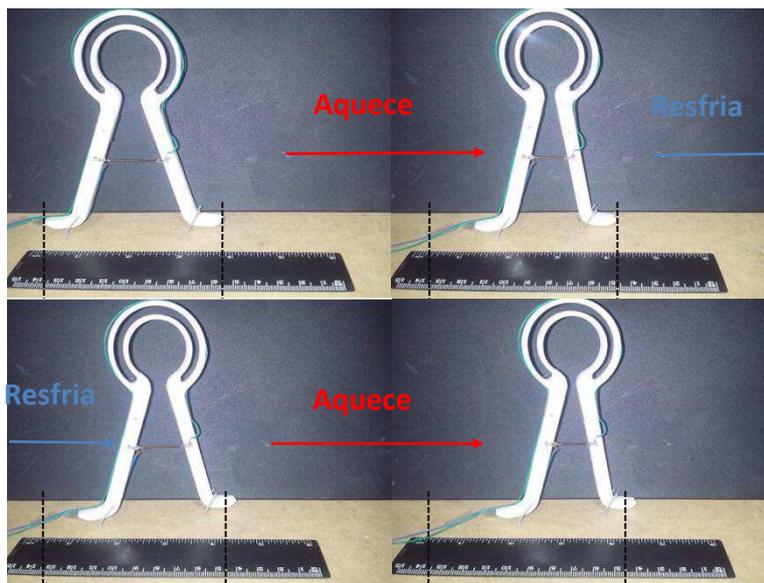
Figura 36: Relação do deslocamento em função da resistência elétrica para apenas um ciclo de trabalho termomecânico.



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 37 apresenta-se o protótipo de um robô *Inchworm ABS-SMA*, uma das aplicações em desenvolvimento no contexto do projeto *SMART Robots*, em que se vem utilizando as mini molas de LMF Ni-Ti estudadas nessa pesquisa. Espera-se que a relação linear e não histerética entre deslocamento e resistência elétrica das mini molas Ni-Ti possa contribuir para o desenvolvimento de um sistema de controle para essas estruturas.

Figura 37: Protótipo de robô *Inchworm* ativado por mini molas de LMF Ni/Ti em desenvolvimento no LaMMEA/CCT/UFCG.



Fonte: LaMMEA/UFCG.

6 CONCLUSÕES

Para todos os ensaios realizados, os valores das deformações termoelásticas e da variação da resistência elétrica para uma taxa mais lenta, di/dt de 6 mA/s, são sempre maiores quando comparados com a taxa mais rápida, $di/dt = 12$ mA/s, embora a taxa mais rápida apresente valores de histerese menores. Sendo assim, constata-se uma importante influência da taxa de variação da corrente elétrica na resposta em resistência elétrica e em deslocamento por EMF sob carga das mini molas estudadas.

Embora haja um aumento na contração máxima da mini mola de LMF com o aumento da corrente elétrica/temperatura, justifica-se a utilização dos níveis menores de corrente elétrica, já que para os outros níveis houve superaquecimento do atuador, ou seja, a partir de certo valor de corrente elétrica/temperatura não há mais realização de trabalho mecânico, ou esse trabalho realizado é mínimo.

No estudo do comportamento das LMF em geral, a resistência elétrica é uma propriedade de bastante interesse, pois apresenta valores distintos para cada fase de transformação (austenita e martensita), o que significa que esse valor reflete a quantidade de martensita (ou austenita) para determinadas condições (temperaturas e cargas, por exemplo). Foi possível constatar, observando o comportamento da resistência elétrica em função da corrente elétrica e da temperatura, que para os três níveis de carregamento mecânico e ambas as taxas de variação da corrente elétrica, a curva em função da temperatura apresenta uma histerese mais estreita, além de exibir uma região linear durante o aquecimento, o que torna esse comportamento mais suscetível à realização de um controle. Como também, para cargas mecânicas mais elevadas, o laço de histerese posicionou-se deslocado na direção do aumento de corrente elétrica/temperatura.

Finalmente, a relação deslocamento *versus* resistência elétrica exibiu um comportamento praticamente linear no aquecimento e no resfriamento, com uma histerese estreita. Essa linearidade praticamente não histerética é bastante interessante, pois pode permitir o controle da posição da mini mola de LMF apenas monitorando a resistência elétrica, independentemente de o atuador estar sendo aquecido ou resfriado em um determinado instante. No que diz respeito ao nível de carga mecânica aplicado, foi observado que para cargas menores a histerese dessa relação foi menor quando

comparada as cargas maiores. Dessa forma, para cargas abaixo da carga nominal indicada para a mini mola (1,962 N) e para os níveis de corrente elétrica mais baixos, que aqui foram experimentados, constatou-se resultados mais suscetíveis à realização de controle para uma aplicação na área da robótica, por exemplo.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados deste trabalho de pesquisa, constata-se a possibilidade de dar prosseguimento ao estudo sobre o comportamento eletro-termomecânico de mini molas superelásticas de Nitinol[®]. As principais atividades de pesquisa que podem ser desenvolvidas são:

- Desenvolvimento de uma estratégia de modelagem matemática para estimar o comportamento eletromecânico das mini molas de LMF;
- Aplicação das mini molas de LMF para a construção de protótipos de robôs fabricados por impressão 3D;
- Estudo do controle de uma estrutura robótica acionada por mini molas de LMF usando o comportamento linear não histerético da relação entre deslocamento e resistência elétrica.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGANUMA, T. A. N.; YO, M. A. K.; EKI, T. A. U. **A New , Automatic Hydrothermal Fluid Sampler Using a Shape-Memory Alloy**. Journal of Oceanography, v. 54, p. 241–246, 1998.

AN, SM; RYU, JUNGHYUN; CHO, M; CHO, KJ. **Engineering Design Framework for a Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator Using a Static Two-State Model**. Smart Materials and Structures, v. 21, n. 5, p. 055009, 1 maio 2012.

BUEHLER, W. J.; WANG, F. E. **A Summary of Recent Research on the Nitinol Alloys and their Potential Application in Ocean Engineering**. Ocean Engineering, v. 1, p. 105–120, 1968.

CALLISTER, W. D. J. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7ª edição. USA: John Wiley & Sons, INC, 2007.975 p

CROSS, W. B.; KARIOTIS, A. H.; STIMLER, F. J. **Nitinol Characterization Study**. Ohio, 1969.

DUERIG, TW; MELTON, KN; STOCKEL, D; WAYMAN, CM. **Engineering Aspects of Shape Memory Alloys**. London: Butterworth-Heinemann; 1990.

FARIA, C. T. DE. **Controle da Variação do Arqueamento de um Aerofólio Utilizando Atuadores de Memória de Forma..** Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da UNESP. Departamento de Engenharia Mecânica. Ilha Solteira - SP, 2010.

FURST, S. J.; SEELECKE, S. **Modeling and Experimental Characterization of the Stress, Strain, and Resistance of Shape Memory Alloy Actuator Wires with Controlled Power Input**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 23, n. 11, p. 1233–1247, 2012.

FURST, S. J.; SEELECKE, S. **Fabrication and Characterization of a Dual-Joint Smart Inhaler nozzle Actuated by Embedded SMA Wires**. Smart Materials and Structures, v. 23, n. 3, p. 035008, 1 mar. 2014.

OLIVEIRA, C. A. do N. **Caracterização Termoelástica de Atuadores Helicoidais da Liga Cu-Zn-Al com Memória de Forma**. Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação da UFPE. Departamento de Engenharia Mecânica. Recife - PE, 2007.

GRASSI, E. N. D.; ALLYSSON, D. O. R.; BARBOZA, K. R. A.; DE ARAÚJO, C. J. **Caracterização Termomecânica de Micro-Molas Superelásticas de SMA**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM. São Luiz - MA, 2012.

GRASSI, E. N. D. **Comportamento Termomecânico de Minimolas Superelásticas de NiTi: Influência de Tratamentos Térmicos**. Dissertação submetida ao Programa de

Pós Graduação da UFCG. Departamento de Engenharia Mecânica. Campina Grande - PB, 2014.

HUTAPEA, PARSAORAN; KIM, JINHO; GUION, ANDREW; HANNA, CHARLIE; HEULITT, NOAH. **Development of a Smart Wing**. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, v. 80, n. 4, p. 439–444, 2008.

JACKSON, C. M.; WAGNER, H. J.; WASILEWSKI, R. J. **55-Nitinol-The Alloy with a Memory: It's Physical Metallurgy Properties, and Applications**. NASA SP-5110. NASA Special, 1972.

JANI, JARONIE MOHD; LEARY, MARTIN; SUBIC, ALEKSANDAR; GIBSON, MARK A. **A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities**. Materials & Design, v. 56, p. 1078–1113, abr. 2014.

JUNIOR, J. L. D. S. **Comportamento Termoelástico de Atuadores Termoconformados com Fio de Liga de Ti-Ni com Memória de Forma**. Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação da UFPE. Departamento de Engenharia Mecânica. Recife - PE, 2010.

KOH, J.-S.; CHO, K.-J. **Omega-Shaped Inchworm-Inspired Crawling Robot with Large-Index-and-Pitch (LIP) SMA Spring Actuators**. IEEE/Asme Transactions on Mechatronics, n. 2, p. 1–11, 2013.

LIMA, W. M. **Plataforma para Análise Comportamental de Atuadores de Ligas com Memória de Forma e para o Controle de Deformação de uma Barra Flexível** Walber Medeiros Lima. Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação da UFCG. Departamento de Engenharia Elétrica. Campina Grande - PB, 2008.

DELAEY, L.; KRISHNAN, R. V.; TAS, H.; WARLIMONT, H. **Review Thermoelasticity, Pseudoelasticity and The Memory Effects Associated with Martensitic Transformations Part 1 Structural and Microstructural Changes Associated with the Transformations**. Journal of Materials Science, v. 9, p. 1521–1535, 1974.

NASCIMENTO, M. M. S. F. **Contribuição ao Estudo da Histerese em Ligas com Memória de Forma**. Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação da UFCG. Departamento de Engenharia Elétrica. Campina Grande - PB, 2002.

OTSUKA, K.; REN, X. **Physical Metallurgy of Ti-Ni-Based Shape Memory Alloys**. Progress in Materials Science, v. 50, p. 511–678, 2005.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. **Shape Memory Materials**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998. 284 p.

PEQUENO, A. A. P. **Aplicação de Métodos de Controle em uma Estrutura Ativa de Viga Engastada com Atuador de Liga com Memória de Forma** Aplicação de Métodos de Controle em uma Estrutura Ativa de Viga Engastada com Atuador de Liga com Memória de Forma. Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação da UFCG. Departamento de Engenharia Elétrica. Campina Grande - PB, 2012.

ROMANO, R.; TANNURI, E. A. **Modelagem e Validação Experimental de um Atuador Baseado em Liga de Memória de Forma.** Revista Controle e Automação, v. 19, n. 1, p. 13, 2008.

SEIGLER, THOMAS MICHAEL. **Dynamics and Control of Morphing Aircraft.** Dissertação submetida Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Mechanical Engineering, 2005.

SILVA, N. **Estudo do Comportamento Termomecânico de uma Liga Ni-Ti com Memória de Forma Usando Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) de uma Liga Ni-Ti com Memória de Forma.** Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação da UFCCG. Departamento de Engenharia de Materiais. Campina Grande - PB, 2009.

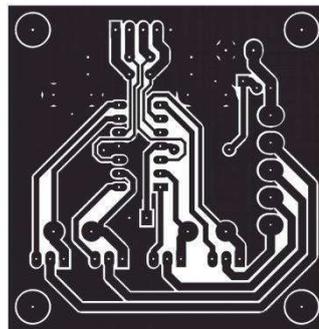
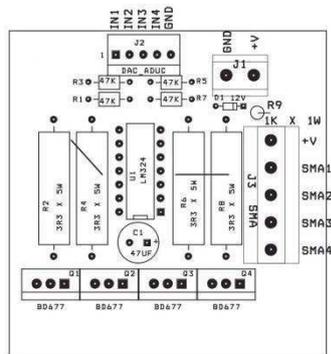
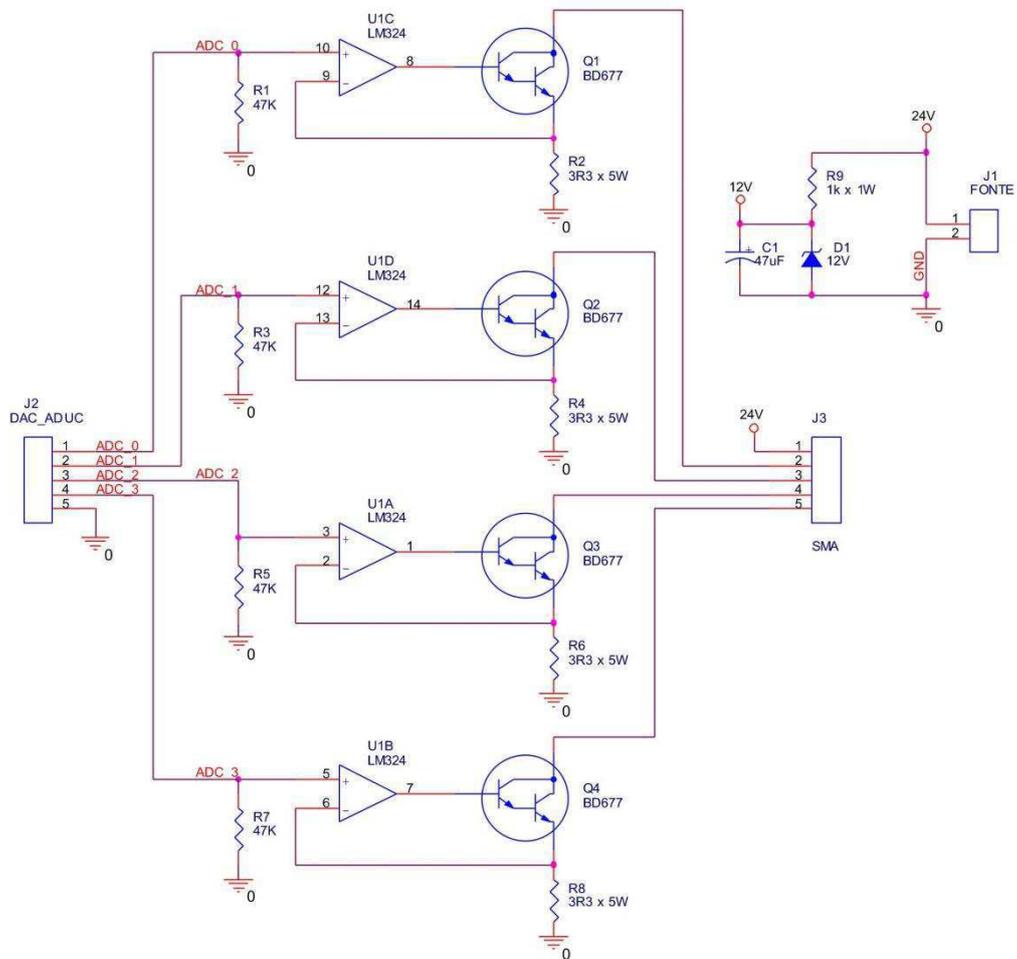
SIONG LOH, C.; YOKOI, H.; ARAI, T. **New Shape Memory Alloy Actuator: Design and Application in the Prosthetic Hand.** Conference proceedings : Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference, v. 7, n. 16360118, p. 6900–6903, 2005.

SONG, G.; MA, N. **Robust Control of a Shape Memory Alloy Wire Actuated Flap.** Smart Materials and Structures, v. 51, 2007. N51-N57 p

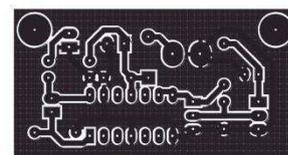
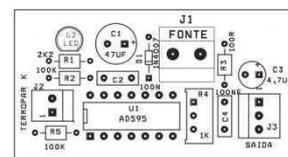
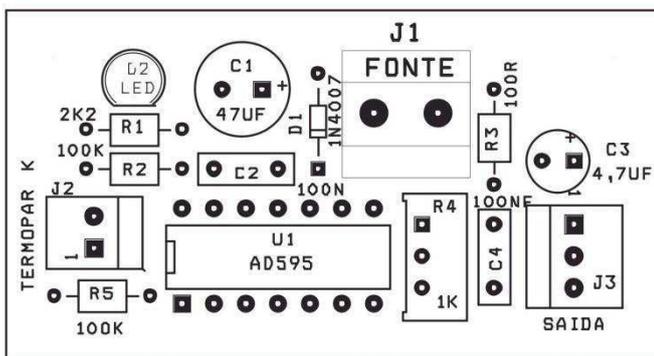
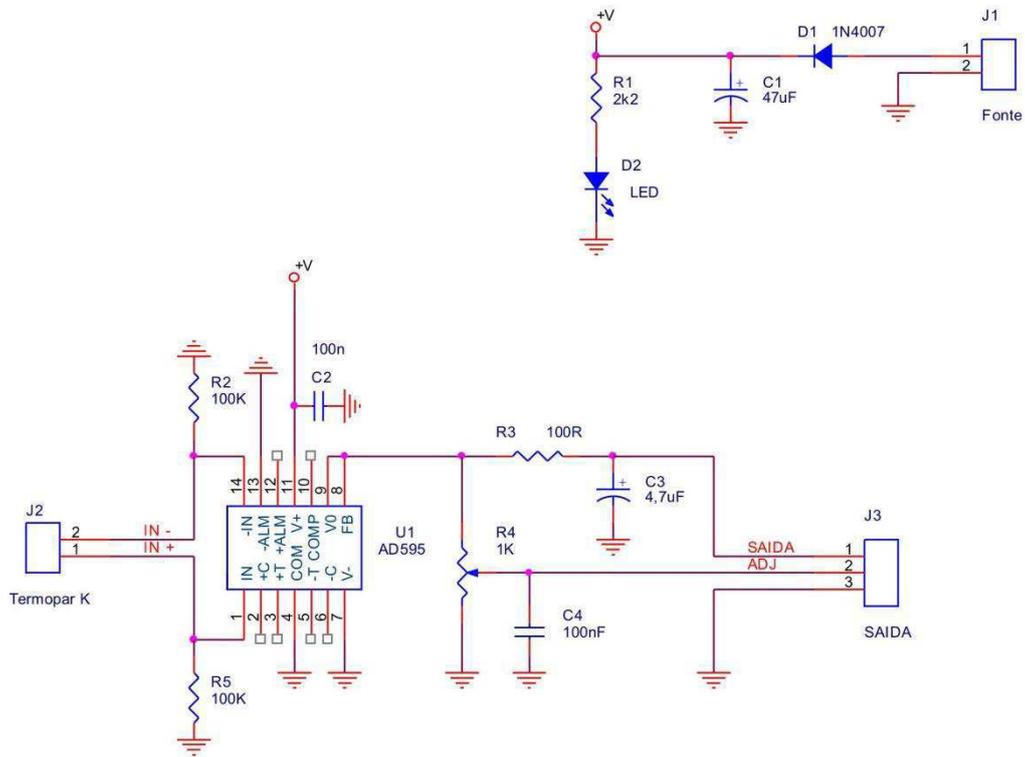
YAMAUCHI, K.; OHKATA, I.; TSUCHIYA, K.; MIYAZAKI, S. **Shape Memory and Superelastic Alloys: Technologies and Applications.** USA: Woodhead Publishing, 2011. 223 p.

ZAKERZADEH, M. R.; SAYYAADI, H. **Precise Position Control of Shape Memory Alloy Actuator Using Inverse Hysteresis Model and Model Reference Adaptive Control System.** Mechatronics, v. 23, n. 8, p. 1150–1162, dez. 2013.

APÊNDICE A – CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DO SINAL DA CORRENTE ELÉTRICA NA LMF (*DRIVER DE CORRENTE DE LMF*)



APÊNDICE B – CIRCUITO PARA CONDICIONAMENTO DO SINAL DO MICROTHERMOPAR TIPO K (*DRIVER DE TEMPERATURA*)

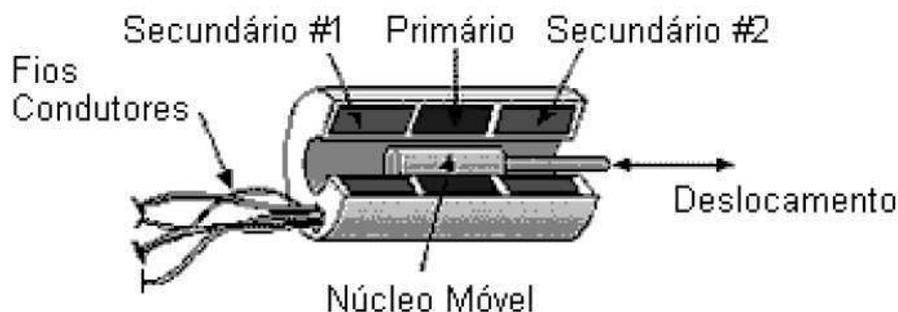


APÊNDICE C – TRANSFORMADOR DIFERENCIAL VARIÁVEL LINEAR (LVDT)

C.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O LVDT é um dispositivo que produz um sinal elétrico na saída, proporcional ao deslocamento do núcleo. Consiste de um enrolamento no primário e dois enrolamentos idênticos no secundário, espaçados simetricamente sobre um cilindro, conforme mostrado na Figura 38.

Figura 38: Diagrama esquemático de um LVDT



Fonte: (NASCIMENTO, 2002)

A excitação do dispositivo (e_{ex}) é normalmente uma tensão senoidal com a amplitude de 3 a 15 Vrms e uma frequência de 60 Hz à 20 kHz.

Os enrolamentos do secundário são idênticos e a tensão induzida tem a mesma frequência da tensão de excitação, portanto, a amplitude varia com a posição do núcleo. Os secundários são conectados em série e com polaridade oposta, o sinal na saída do LVDT é a diferença entre as tensões induzidas, sendo assim, existe uma posição nula na qual a tensão de saída é igual a zero.

O movimento do núcleo causa um aumento da indutância mútua para um enrolamento e uma diminuição na indutância mútua para o outro, portanto, a tensão de saída torna-se uma função quase linear da posição do núcleo (haste do LVDT), para um intervalo considerável em relação à posição nula.