



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Doutorado

**DESENVOLVIMENTO DE INDUTOR VARIÁVEL
COM FIO COM MEMÓRIA DE FORMA**

por

Evandro Alves Torquato Filho

JOÃO PESSOA - PARAÍBA

MAIO DE 2016

EVANDRO ALVES TORQUATO FILHO

DESENVOLVIMENTO DE INDUTOR VARIÁVEL COM FIO COM MEMÓRIA DE FORMA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Simplicio Arnaud da Silva

JOÃO PESSOA - PARAÍBA

MAIO, 2016

Desenvolvimento de indutor variável com fio com memória de forma

Evandro Alves Torquato Filho

Tese aprovada em 25/05/2016 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:

Prof. Dr. Simplício Arnaud da Silva

Orientador

PPGEM/CT/UFPB

Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

Examinador Interno

PPGEM/CT/UFPB

Prof. Dr. Rodinei Medeiros Gomes

Examinador Interno

PPGEM/CT/UFPB

Prof. Dr. Alexandre César de Castro

Examinador Externo

DEE/CEAR/UFPB

Prof. Dr. Alberdan Santiago de Aquino

Examinador Externo

Instituto Federal da Paraíba - IFPB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado a capacidade de alcançar com êxito mais uma etapa na minha vida, proporcionado a abertura de um novo horizonte de conhecimento que levarei comigo por toda a vida.

Agradeço ao professor Dr. Simplício Arnaud da Silva por ter me aceitado como seu orientando, e por me ajudar durante toda a pesquisa, solucionando problemas acadêmicos.

Ao professor Dr. Cícero da Rocha Souto pelo acompanhamento durante todo o estudo, assim como sua total confiança em mim depositada durante toda a jornada, acreditando sempre que lograríamos êxito com este trabalho. O meu mais sincero e verdadeiro obrigado.

Aos meus pais que sempre apoiaram e incentivaram minha evolução na carreira acadêmica. De forma especial, agradeço a minha noiva, Patrícia Helena Alves da Silva, que sempre esteve ao meu lado nas dificuldades encontradas, me motivando a continuar, e compreendendo os momentos de ausência devido às etapas de desenvolvimento do trabalho no laboratório.

Aos integrantes do Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LaSEA) e Laboratório de Instrumentação e Controle (LINC) da UFPB. Enfim, a todos que de forma direta ou indireta me auxiliaram para que fosse possível a concretização desta pesquisa.

Finalmente agradeço ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, que através do auxílio financeiro permitiu que a pesquisa tivesse prosseguimento.

DESENVOLVIMENTO DE INDUTOR VARIÁVEL COM FIO COM MEMÓRIA DE FORMA

RESUMO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) fazem parte de uma classe de materiais ativos ou inteligentes por possuírem uma característica especial denominada de Efeito Memória de Forma (EMF) que pode ser ativado por um campo térmico. Por serem geralmente ligas metálicas estão no grupo dos materiais condutores e apresentam propriedades eletromagnéticas quando circulados por uma corrente elétrica. Se configurado geometricamente como um indutor e estimulado com uma corrente alternada possibilita a indução magnética variável proporcionada pelo fluxo magnético no interior das espiras. Aproveitando a característica termomecânica de mudança de forma e o efeito físico de indução magnética, este trabalho apresenta um estudo do desenvolvimento de um indutor variável com liga com memória de forma de NiTi. O estudo se baseou na variação da indutância pela variação geométrica das espiras construídas com fio com memória de forma e mantendo a permeabilidade magnética do núcleo constante. Foram observadas variações na indutância magnética devido à variação de temperatura provocada por corrente elétrica, demonstrando uma possível relação entre as temperaturas de transformação de fase do material. Para a coleta dos resultados experimentais foram desenvolvidos alguns indutores com LMF com núcleo de ferrite. São apresentados resultados da variação da indutância relacionados com a variação do comprimento e temperatura do indutor de LMF.

Palavras chaves: Liga com memória de forma, indução magnética, temperaturas de transformação de fase.

DESENVOLVIMENTO DE INDUTOR VARIÁVEL COM FIO COM MEMÓRIA DE FORMA

ABSTRACT

The Shape Memory Alloys (SMA) is part of an active material class due to a special characteristic, called Shape Memory Effect (SME) that can be activated by a thermal field. In general these materials are made by metallic alloys and belong to a group of conducting materials with electromagnetic properties when circulated by an electric current. If geometrically configured as an inductor and stimulated with an alternating current allows the variable magnetic induction provided by the magnetic flux inside the coil. Using the thermomechanical shape change and the magnetic induction characteristics, this paper presents a study and development of a variable inductor with an alloy Ni-Ti. This study is based in inductance variation through geometric variation of coils made of shape memory wire and keeping the magnetic permeability constant. It was also observed variations in magnetic inductance due to change in temperature through electrical current, showing a possible close relationship with the phase transformation temperature of the material. To collect the experimental results were necessary the development of SME inductors with ferrite nucleus. Results are presented for the inductance variation related to length and temperature variation of a SMA inductor.

Keywords: Shape memory alloy, magnetic induction, displacement sensor

Sumário

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| Sumário | 7 |
| Lista de Figuras | 9 |
| Capítulo 1 | 13 |
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL | 16 |
| 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS | 16 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 17 |
| Capítulo 2 | 18 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 2.1 ATUADORES LINEARES COM MEMÓRIA DE FORMA | 18 |
| 2.2 RELAÇÃO ENTRE INDUTÂNCIA E A MEMÓRIA DE FORMA | 20 |
| Capítulo 3 | 24 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 24 |
| 3.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA | 24 |
| 3.1.1 MATERIAIS ATIVOS | 24 |
| 3.1.2 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA | 26 |
| 3.1.3 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA | 27 |
| 3.1.4 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA | 30 |
| 3.1.5 SUPERELASTICIDADE | 31 |
| 3.1.6 COMPORTAMENTO CÍCLICO | 32 |
| 3.1.7 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA | 34 |
| 3.1.8 HISTERESE | 35 |
| 3.2 MOLAS HELICOIDAIS | 36 |
| 3.3 INDUTÂNCIA | 39 |
| 3.3.1 CIRCUITO <i>RL</i> | 42 |
| 3.3.2 DIFERENÇA DE FASE | 43 |
| Capítulo 4 | 46 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 46 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 46 |
| 4.2 A MOLLA HELICOIDAL | 46 |

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| 4.3 BANCADA DE TESTES..... | 47 |
| 4.3.1 CATRACA..... | 48 |
| 4.3.2 INDUTOR VARIÁVEL | 49 |
| 4.3.3 CIRCUITO ELÉTRICO..... | 51 |
| 4.3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS..... | 52 |
| 4.4 METODOLOGIA | 53 |
| Capítulo 5..... | 59 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 59 |
| Capítulo 6..... | 68 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 68 |
| Capítulo 7..... | 69 |
| 7. APÊNDICES..... | 69 |
| 7.1 ATRASOS DE FASE GERADOS PELA INDUTÂNCIA..... | 69 |
| 7.2 ALGORITMOS USADOS PARA CÁLCULO DE INDUTÂNCIA..... | 75 |
| 7.3 IMAGENS DA BANCADA DE TESTES..... | 79 |
| Capítulo 8..... | 81 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |

Lista de Figuras

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Atuador com Memória de Forma (Adaptada de Paiva, 2014)..... | 19 |
| Figura 2.2 – Dispositivo robótico rastejante inspirado no movimento das largatas através de atuadores com LMF. (Adaptada de Koh et al, 2013) | 19 |
| Figura 2.3 – Dispositivo desenvolvido para escavação geológica para explorações planetárias. (Adaptada de Benafan et al, 2015)..... | 20 |
| Figura 2.4 – Sensor de posição. (Adaptada de Legrand, 2003)..... | 21 |
| Figura 2.5 – Dispositivo desenvolvido para medição de pressão através da variação da indutância. (Adaptada de D. de Cos et al, 2004) | 21 |
| Figura 2.6 – Micro atuador de LMF, sistema ressonante. (Adaptada de Mohamed S. M. A. et al 2013) | 22 |
| Figura 2.7 – Dispositivo desenvolvido para medição de indutância através da variação do deslocamento de uma mola helicoidal. (Adaptada de Kim et al, 2013) | 22 |
| Figura 3.1 – Densidade de Energia de Atuação. (Adaptada de Lagoudas, 2008) | 25 |
| Figura 3.2 – Frequência de Atuação. (Adaptada de Lagoudas, 2008)..... | 25 |
| Figura 3.3 – Transformação induzida através da mudança de temperatura. (Adaptada de Lagoudas, 2008) | 27 |
| Figura 3.4 – Transformação induzida através da aplicação de uma carga. (Adaptada de Lagoudas, 2008) | 28 |
| Figura 3.5 – Após cessar a aplicação da carga o material se mantém da mesma forma e com o aquecimento até uma temperatura superior a A_f obtemos a fase austenítica. (Adaptada de Lagoudas, 2008)..... | 28 |
| Figura 3.6 – Transformação induzida através da aplicação de tensão e diminuição da temperatura. (Adaptada de Lagoudas, 2008)..... | 29 |
| Figura 3.7 – Transformação Superelástica. (Adaptada de Lagoudas, 2008)..... | 29 |
| Figura 3.8 – Diagrama tensão-deformação do efeito superelástico. (Adaptada de Lagoudas, 2008) | 30 |
| Figura 3.9 – Efeito de Memória de Forma em liga NiTi. (Adaptada de Lagoudas, 2008) | 31 |
| Figura 3.10 – Comportamento Superelástico. (Adaptada de Lagoudas, 2008)..... | 32 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.11 – Carga Térmica Cíclica com Carregamento Constante. (Adaptada de Lagoudas, 2008) | 33 |
| Figura 3.12 – Cíclico do Comportamento Superelástico. (Adaptada de Lagoudas, 2008) | 33 |
| Figura 3.13 – Calorimetria Diferencial de Varredura. (Adaptada de Lagoudas, 2008). 34 | |
| Figura 3.14 – Ilustração do operador de Preisach. | 35 |
| Figura 3.15 – Mola Helicoidal..... | 37 |
| Figura 3.16 – Dois circuitos arbitrários, um dos quais é percorrido por uma corrente. (Machado, 2002)..... | 39 |
| Figura 3.17 – Circuito Simples, fonte variável de força eletromotriz em paralelo com um indutor. | 41 |
| Figura 3.18 – Solenóide de raio r . (Adaptada de Machado, 2002)..... | 41 |
| Figura 3.19 – Circuito RL | 43 |
| Figura 3.20 – Atraso de fase entre a tensão de entrada e a resposta..... | 44 |
| Figura 3.21 – Indutor Real..... | 45 |
| Figura 4.1 – Bancada de Testes. | 48 |
| Figura 4.2 – Catraca responsável por proporcionar o deslocamento do indutor variável. | 48 |
| Figura 4.3 – Aparato desenvolvido em ferrite para acondicionamento da mola helicoidal. | 49 |
| Figura 4.4 – Estrutura desenvolvida para acomodar o aparato em ferrite..... | 50 |
| Figura 4.5 – Montagem completa do dispositivo indutor..... | 50 |
| Figura 4.6 – Circuito RCL..... | 51 |
| Figura 4.7 – Interface do LabVIEW..... | 52 |
| Figura 4.8 – Indutor Comercial. | 53 |
| Figura 4.9 – Medidor LCR versus Medição Experimental. | 55 |
| Figura 4.10 – Função de primeiro grau que melhor se adéqua aos dados. | 58 |
| Figura 5.1 – Variação da Indutância após a mola helicoidal sofre deslocamento..... | 60 |
| Figura 5.2 – Temperatura versus Corrente. | 60 |
| Figura 5.3 – Resistência elétrica da Liga com Memória de Forma..... | 61 |
| Figura 5.4 – Indutância medida durante experimento (Experimento 01)..... | 63 |
| Figura 5.5 – Indutância medida durante experimento (Experimento 02)..... | 63 |
| Figura 5.6 – Indutância medida durante experimento (Experimento 03)..... | 64 |
| Figura 5.7 – Calorimetria Diferencial de Varredura..... | 64 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.8 – Variações ocorridas no atraso de fase relacionado à indutância (Experimento 01)..... | 65 |
| Figura 5.9 – Variações ocorridas no atraso de fase relacionado à indutância (Experimento 02)..... | 66 |
| Figura 5.10 – Variações ocorridas no atraso de fase relacionado à indutância (Experimento 03)..... | 66 |
| Figura 7.1 – Uso do software LabView para aquisição de dados, juntamente com a Placa da National Instruments. Duas fontes de alimentação (CC e CA) da Agilent. Dispositivo no qual é acondicionado o indutor. | 79 |
| Figura 7.2 – Protoboard conectado ao indutor variável. | 79 |
| Figura 7.3 – Catraca usada para realizar o deslocamento geométrico da mola de LMF. | 80 |
| Figura 7.4 – Acondicionamento do indutor envolto por ferrita..... | 80 |

Lista de Tabelas

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 4.1 – Valores nominais e os valores medidos pelo medidor LCR..... | 53 |
| Tabela 4.2 – Comparação entre os valores encontrados através do experimento e os valores medidos pelo LCR. | 56 |
| Tabela 4.3 – Valores corrigidos usando a função linear encontrada. | 57 |
| Tabela 5.1 – Valores de Indutância para corrente contínua de 0,5 A; 1,0 A; 1,5 A; 2,0 A e 2,5 A. | 59 |
| Tabela 5.2 – Valores medidos de resistência elétrica durante aquecimento e resfriamento de LMF através da aplicação de corrente. | 62 |
| Tabela 7.1 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante aquecimento da LMF por corrente. | 69 |
| Tabela 7.2 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante resfriamento da LMF. | 70 |
| Tabela 7.3 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante aquecimento da LMF por corrente. | 71 |
| Tabela 7.4 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante resfriamento da LMF. | 72 |
| Tabela 7.5 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante aquecimento da LMF por corrente. | 73 |
| Tabela 7.6 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante resfriamento da LMF. | 74 |

Lista de Símbolos

| | |
|----------|-------------------------------------------------------|
| A_f | Temperatura Final de Transformação para Austenita |
| A_i | Temperatura Inicial de Transformação para Austenita |
| C | Capacitor |
| EMF | Efeito Memória de Forma |
| f | Frequência do sinal alternado |
| i | Corrente elétrica fornecida pela fonte de tensão |
| I_{cc} | Fonte de corrente contínua |
| l | Comprimento do indutor |
| L | Indutância |
| L_M | Indutância Medida |
| LMF | Liga com Memória de Forma |
| M_f | Temperatura Final de Transformação para Martensita |
| M_i | Temperatura Inicial de Transformação para Martensita |
| N | Número de Espiras |
| r | Raio do indutor |
| R | Resistência em série com o indutor |
| R_L | Resistência interna do indutor |
| V | Diferença de potencial fornecida pela fonte de tensão |
| V_1 | Tensão de entrada no indutor |
| V_2 | Resposta ao sinal de entrada no indutor com atraso |
| V_{ca} | Fonte de tensão alternada |

| | |
|---------------|----------------------------------------|
| V_L | Diferença de potencial sobre o indutor |
| X_L | Reatância indutiva |
| ε | Deformação sofrida pela mola |
| φ | Ângulo de fase |
| ϕ | Fluxo magnético |
| μ_0 | Permeabilidade magnética do vácuo |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (LMF) fazem parte de uma classe de materiais conhecida como materiais inteligentes. Tal classificação se deve as suas propriedades termomecânicas, ou seja, ao ser introduzida a ação de um campo térmico tem-se como resposta um campo mecânico. O uso das LMF já é bastante difundido nas mais diversas áreas da engenharia, inclusive na medicina, para o caso das ligas com memória de forma biocompatíveis.

Uma aplicação bastante difundida em acionamentos lineares é na construção de atuadores com o uso de molas helicoidais. Molas helicoidais fabricadas com ligas com memória de forma representam uma grande capacidade de deslocamento em relação à um atuador com apenas um fio, além da capacidade de aplicação de tensão, tornando-se uma aplicação com vários pontos positivos.

No que se refere a sensoriamento do deslocamento, sempre há a necessidade de um dispositivo a parte que seja capaz de fazer tal medição. No entanto, molas helicoidais se atravessadas por uma corrente alternada adquire propriedades magnéticas de indução, característica essa que é puramente geométrica, ou seja, dependendo da variação dos parâmetros geométricos da mola tem-se uma variação na indutância magnética.

O conceito apresentado demonstra uma possibilidade muito interessante, a não necessidade de um dispositivo sensor para a medição do deslocamento realizado por uma mola helicoidal, ou seja, o próprio atuador pode se comportar como sensor de deslocamento, com apenas o uso de um circuito capaz de calcular a indutância e fazer a relação direta com o comprimento da mola.

Outro ponto de bastante interesse está relacionado às temperaturas de transformações de fase, nas quais ocorre uma mudança da estrutura cristalina do material, e, possivelmente, na permeabilidade magnética da Liga com Memória de

Forma ocasionando variações também na indutância magnética; conseqüentemente permitindo uma verificação das temperaturas de fase.

A indução eletromagnética vem sendo bastante estudada desde a década de 1830, na realização de diversas experiências, sendo seus pioneiros Michael Faraday, na Inglaterra, e Joseph Henry, nos Estados Unidos. Eles observaram que através da variação do campo magnético uma força eletromotriz era induzida em uma espira. Atualmente os motores de indução magnética são os maiores representantes no uso de indutores, sendo levado em consideração o parâmetro de indução magnética, um fator importante na construção dos mesmos.

Portanto, a utilização das características magnéticas e as propriedades termomecânicas das LMF no desenvolvimento de um atuador capaz de se comportar, também, como sensor de deslocamento são de grande valia para criação de novos sistemas de atuação, mostrando-se bastante inovadora. E o uso da indutância magnética como indicador das temperaturas de transformação de fase facilitaria bastante a aquisição de tais valores devido a simplicidade do experimento realizado.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento e caracterização teórica e experimental de um elemento com memória de forma com características indutivas vislumbrando aplicações em sensores e/ou atuadores inteligentes e na aquisição de propriedades físicas do material.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Caracterizar materiais com memória de forma;
- Desenvolver dispositivos mecânicos para caracterização do dispositivo indutor;
- Desenvolver simulações relacionadas com o sensor/atuador proposto;
- Implementação experimental.

1.3 JUSTIFICATIVA

As ligas com memória de forma (LMF) são materiais ativos, relativamente novos, e com uma boa quantidade de estudos presentes na literatura científica. Por esse motivo tem despertado bastante interesse na comunidade acadêmica em explorar e conhecer melhor o material e encontrar aplicações práticas para tal. Como são materiais metálicos as aplicações mecânicas podem ser inúmeras e variadas especialmente em atuadores de força e de movimento. Entretanto, o controle e sensoriamento de atuadores lineares com molas fabricadas a partir de ligas com memória de forma ainda são complexos e sem a devida precisão para medição, sendo necessários maiores estudos nesse aspecto.

Outro aspecto que deve ser analisado é o processo de aquisição dos valores de temperaturas para a transformação de fase, ou seja, da estrutura cristalina do material. As temperaturas citadas são verificadas através da Calorimetria Diferencial de Varredura realizada através de um aparato tecnológico cujo preço é elevado, e para funcionamento é necessário o uso de nitrogênio líquido. O uso das variações observadas na indutância podem facilitar bastante esse processo.

Diante do exposto, um trabalho de tese vislumbrando aplicação prática do material com memória de forma irá acrescentar significativamente no contexto literário sobre o assunto.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ATUADORES LINEARES COM MEMÓRIA DE FORMA

A aplicação das ligas com memória de forma abrange diversos setores da indústria, temos como exemplos aplicações aeroespaciais na construção de aerofólios (Strelec et al, 2003) e outros sistemas de pequeno porte; utilização de tubos de torção com LMF para variar a torção das pás do rotor (Jacot et al, 2006); mecanismos de liberação para pequenos satélites (Willey, 2001), Têm-se também aplicações médicas e odontológicas devido a biocompatibilidade das ligas NiTi (Shabalovskaya, 1995) e (Ryh, 1999). No controle de vibração em estruturas civis (Saadat et al, 2002), na indústria do petróleo para proteção do equipamento de perfuração (Anderson et al, 1999), etc.

Atuadores LMF construídos a partir de fios tensionados apresentarem uma elevada relação força-massa, mas seu curso muitas vezes se torna insatisfatório se comparado aos atuadores convencionais, Reynaerts e Brussel (1998), Spinella e Dragoni (2009). Uma abordagem típica para superar esta limitação consiste na adoção de molas helicoidais de LMF, com capacidade de aumentar o curso e reduzir o comprimento do atuador em relação ao fio tensionado.

Molas de LMF constituem um tipo importante de atuador em diferentes tipos de aplicação, no entanto, o comportamento termomecânico complexo da LMF na forma helicoidal faz da sua modelagem uma tarefa difícil, algumas abordagens foram elaboradas a partir do modelo de Fremond (1987) e (1996) como demonstradas por Paiva e Savi (2006) e Lagoudas (2008). Outra abordagem foi proposta por Dong et al (2008) que desenvolveram um modelo de elementos finitos.

Hodgson e Brown (2000) desenvolveram atuadores com memória de forma, como o visto na Figura 2.1, tem em sua estrutura básica uma mola feita de uma liga com memória de forma balanceada contra uma mola feita de um material convencional,

como o aço. Com o aquecimento do dispositivo a mola feita de uma liga com memória de forma sofre uma transformação em sua estrutura cristalina e é capaz de vencer a resistência imposta pela mola convencional, causando a movimentação do pistão em uma das direções; após ocorrer o resfriamento do atuador, a mola convencional comprime a mola com memória de forma, movimentando o pistão em direção oposta.

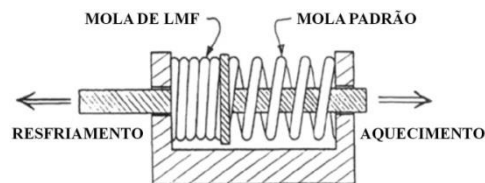


Figura 2.1 - Atuador com Memória de Forma (Adaptada de Paiva, 2014)

É possível citar o uso das ligas com memória de forma em aplicações com atuadores em vários artigos presentes na literatura, a seguir têm-se alguns exemplos: controle de uma atuador com LMF através de um sistema de compensação da histerese (Majina et al, 2001), o controle de posição de uma atuador com LMF através da resistência elétrica (Ma et al, 2004), estudos com o de An et al (2012) que define como devem ser feitas as escolhas parâmetros geométricos do atuador obedecendo o nível de aplicação de força.

Gurung e Banerjee (2016) desenvolveram um sistema de medição do deslocamento de uma mola helicoidal através da resistência elétrica usando EKF (Extended Kalman Filter). Cui et al (2010) e Furst et al (2016) realizaram um estudo sobre o comportamento da liga com memória de forma a medida que havia uma variação na resistência elétrica do material, com o objetivo de usar dados adquiridos do próprio sistema para desenvolver um auto-sensoriamento.

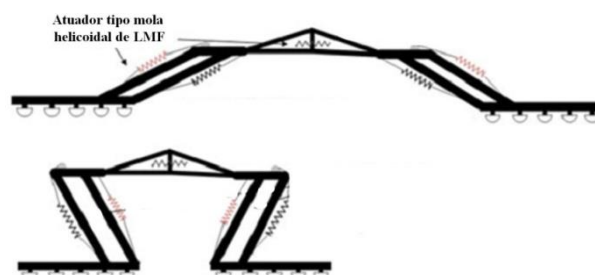


Figura 2.2 – Dispositivo robótico rastejante inspirado no movimento das largatas através de atuadores com LMF. (Adaptada de Koh et al, 2013)

A aplicação de atuadores lineares também está presente em trabalhos desenvolvidos na robótica, como um dispositivo rastejante inspirado no movimento das lagartas através de atuadores com LMF, Koh et al (2013).

Sfakiotakis et al (2015) desenvolveu um estudo semelhante na construção de um braço robótico nadador. Têm-se aplicações também na criação de vestuários inteligentes, para geração de calor, com o objetivo proporcionar conforto ao usuário, Yoo et al (2006). Na área de comunicação, no desenvolvimento de antenas adaptativas, cujo comprimento pode ser variado usando as propriedades termomecânicas das ligas com memória de forma, Mazlouman et al (2011). Há estudos inclusive para a exploração planetária, na construção de maquinário para escavação geológica, Benafan et al (2015).

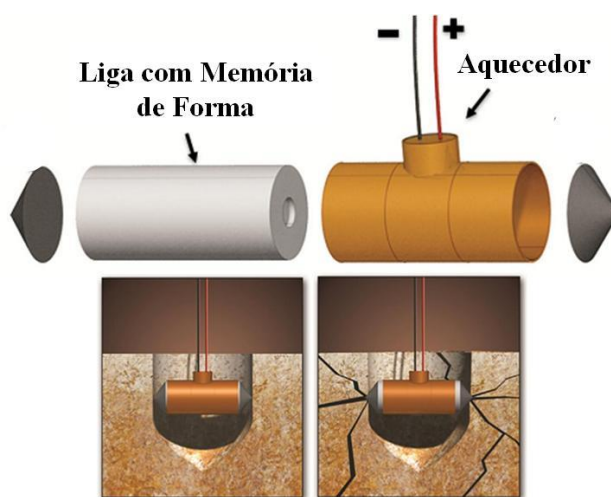


Figura 2.3 – Dispositivo desenvolvido para escavação geológica para explorações planetárias.
(Adaptada de Benafan et al, 2015)

2.2 RELAÇÃO ENTRE INDUTÂNCIA E A MEMÓRIA DE FORMA

As aplicações relacionadas a propriedades magnéticas estão presentes nas mais diversas áreas de atuação, sendo uma das mais importantes, o controle de motores de indução magnética, nos quais a indutância é um dos parâmetros usados no desenvolvimento de tais estudos, como os de Mazouz et al (2014), Yamamoto et al (2010), Cai e Deng (2012).

Bertrand Legrand et al (2003) propõe um sensor de posição através da variação da indutância do sistema mostrado na Figura 2.4.

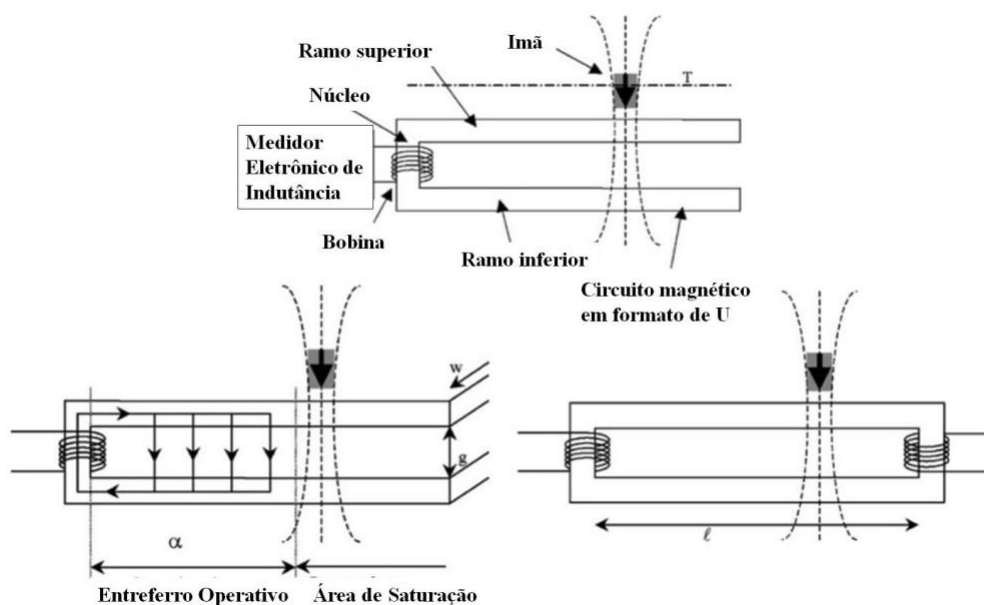


Figura 2.4 – Sensor de posição. (Adaptada de Legrand, 2003)

Através da medição da indutância é possível saber a posição do ímã que gera o campo magnético, que por sua vez, limita a indutância magnética de cada bobina. Portanto, um sensor de posição, pois quando o ímã se encontra próximo a bobina tem-se um valor pequeno de indutância, e o oposto ocorre quando o ímã se afasta da bobina. D. de Cos et al (2004) demonstraram um sistema composto por uma membrana que através da variação de pressão empurra um núcleo de ferrite para o interior de um bobina fixa, produzindo uma variação na indução magnética, como mostra a Figura 2.5.

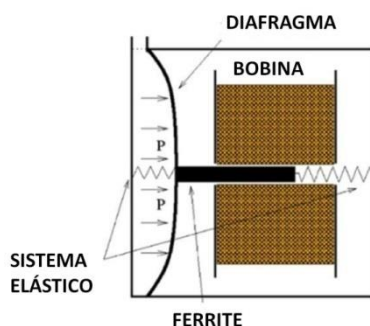


Figura 2.5 – Dispositivo desenvolvido para medição de pressão através da variação da indutância. (Adaptada de D. de Cos et al, 2004)

O sistema é usado como sensor, ou seja, a variação de indutância medida depende da variação de pressão. Mohamed S. M. A., et al (2013) utilizou liga com memória de forma num circuito ressonante, e o aquecimento da LMF foi desenvolvido através da aplicação de uma campo magnético na estrutura mostrada na Figura 2.6, que é uma antena em formato espiral, o aquecimento gera alterações no formato da antena.

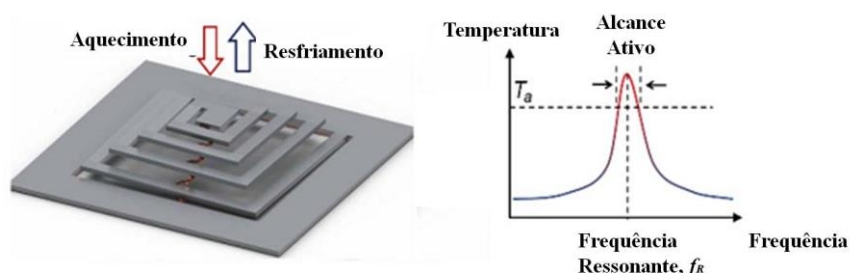


Figura 2.6 – Micro atuador de LMF, sistema ressonante. (Adaptada de Mohamed S. M. A. et al 2013)

Hongjip Kim et al (2012) demonstraram em seu trabalho o uso das características indutivas presentes em uma mola fabricada a partir de ligas com memória de forma para o controle de posição do atuador, ou seja, eles encontram a constante de tempo do circuito vinculada a presença da indutância que varia devido ao comprimento da mola. E é através de uma célula de carga que a mola é estendida alterando suas características indutivas e por meio de uma câmara de aquecimento, o sistema é testado em várias temperaturas, mostrando uma boa repetibilidade.

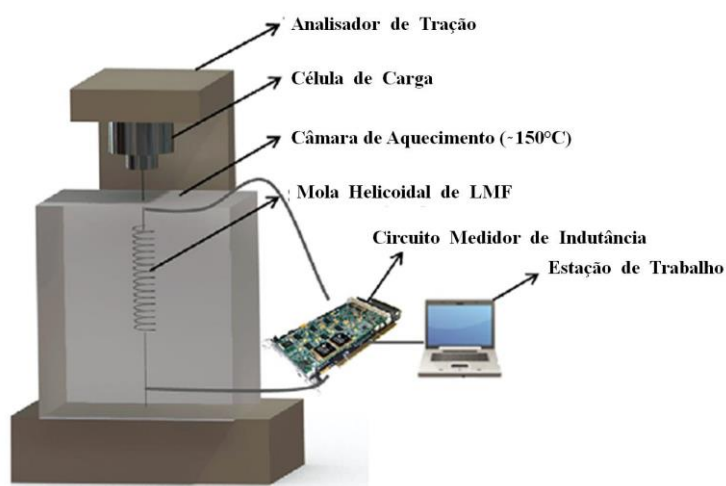


Figura 2.7 – Dispositivo desenvolvido para medição de indutância através da variação do deslocamento de uma mola helicoidal. (Adaptada de Kim et al, 2013)

Em nosso trabalho um estudo semelhante é realizado. No entanto, usamos características relacionadas ao atraso na resposta ao sinal de entrada aplicado, atraso esse causado pela presença do indutor. E o aquecimento é feito através da aplicação de corrente contínua.

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Ligas de memória de forma (LMF) são metais que “memorizam” a sua forma original. O estudo da história e do desenvolvimento da LMF pode fornecer uma visão sobre um material envolvido em tecnologia de ponta. As diversas aplicações para esta liga fizeram-lhe cada vez mais importante e visível no mercado mundial.

A liga de níquel-titânio tem sido a mais usada nas LMF. Outras LMF incluem ligas de cobre-alumínio-níquel, cobre-zinco-alumínio e ferro-manganês-silício (BORDEN, 1991). As ligas com memória de forma são apenas uma categoria entre os diversos tipos de materiais ativos.

3.1.1 MATERIAIS ATIVOS

Existem diversos tipos de materiais ativos, como foi citado acima; as ligas com memória de forma, que exibem um acoplamento direto, ou seja, ao ser introduzida a ação de um campo mecânico temos como resposta um campo não-mecânico e vice-versa. Como exemplo, tem-se as LMF, ao ser aplicado um campo térmico, ou seja, energia na forma de calor (campo não-mecânico), a resposta é a variação na deformação do material (campo mecânico).

Para que seja possível o uso desses tipos de materiais é necessária a análise do seu comportamento. Dois requisitos imprescindíveis são a densidade de energia de atuação (trabalho disponível por unidade de volume) e a frequência de atuação. Sendo um material ideal o qual apresenta valores altos nessas duas características. Na Figura

3.1 tem-se um gráfico que mostra essa densidade de energia de atuação relacionando tensão e deformação para alguns materiais.

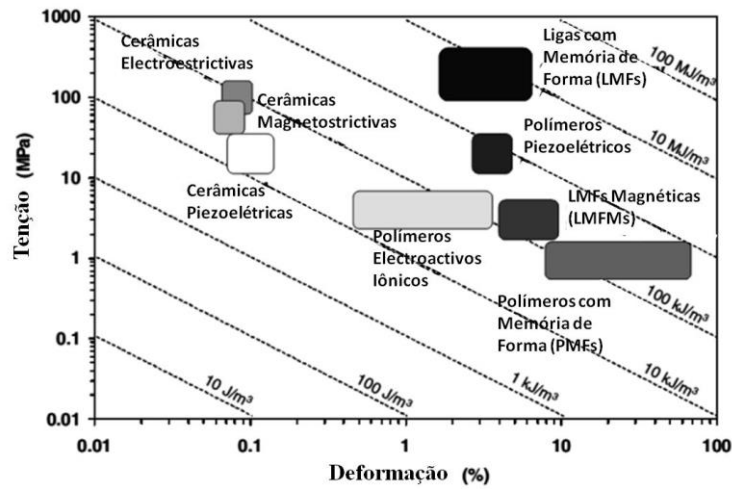


Figura 3.1 – Densidade de Energia de Atuação. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

Como verificado por meio do gráfico a liga com memória de forma apresenta o melhor valor entre os materiais apresentados. Na Figura 3.2 é apresentada a frequência de atuação para diversos materiais.

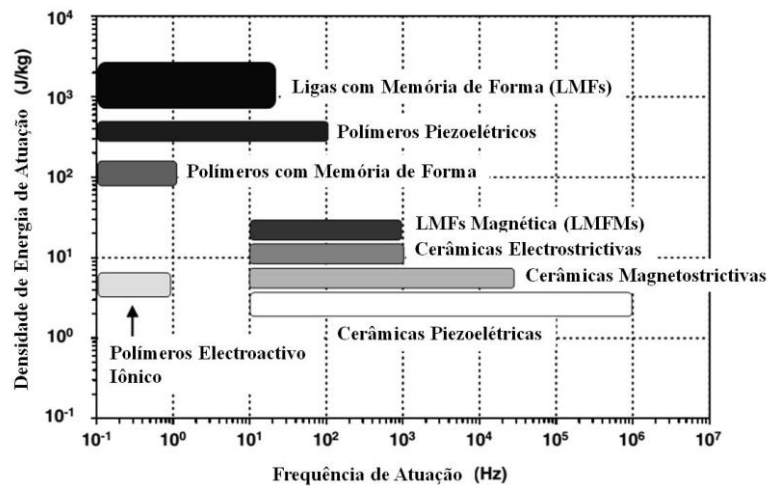


Figura 3.2 – Frequência de Atuação. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

Através desse gráfico também é possível ver o alto valor para densidade de energia de atuação da liga com memória de forma, a qual apresenta uma frequência de atuação entre 0,1 Hz e 20 Hz. Observa-se uma melhor frequência de atuação nas ligas

com memória de forma magnética, chegando até 1000 Hz, mas que ao mesmo tempo apresenta uma queda na densidade de energia de atuação.

3.1.2 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

O primeiro passo para a descoberta das ligas com memória de forma foi dado por Adolf Martens em 1890 quando descobriu a martensita em aços, sendo a transformação martensítica o fenômeno mais estudado no início de 1900, considerado um processo irreversível. A transformação reversível (transformação martensítica termoelástica) só foi introduzida em 1948 por Kurdjumov e Khandros.

As aplicações só foram descobertas em 1963 por Buehler e colegas de trabalho ao investigarem materiais úteis para a blindagem de calor. Eles perceberam que o material possuía boas características mecânicas, como foi observado nas Figuras 3.1 e 3.2, e uma capacidade de recuperação de sua forma. A liga NiTi foi então chamada de nitinol em referência ao Naval Ordnance Laboratory (NOL).

O que estava em questão era a memorização da forma original. Frederick E. Wang, um especialista em física de cristais metálicos identificou as mudanças estruturais, pesquisando as estruturas atômicas, fato que contribuiu para compreensão das propriedades que estas ligas possuem (KAUFFMAN; MAYO, 1993).

Ele descobriu que o nitinol muda de fase ainda no estado sólido. Estas mudanças são conhecidas como martensíticas e austeníticas, envolvendo o rearranjo da posição de partículas dentro da estrutura cristalina do sólido (KAUFFMAN; MAYO, 1993). Essas transformações de fase ocorrem numa certa temperatura. Uma liga na fase martensita ao ser aquecida, geralmente de algumas dezenas de graus centígrados, transforma-se em austenita e ao ser resfriado ocorre a transformação reversa de austenita para martensita.

Dentro da faixa normal de temperatura de operação, as ligas com memória de forma possuem duas fases; para baixas temperaturas tem-se a martensita (M) com estrutura cristalina geralmente cúbica e para altas temperaturas tem-se a austenita (A) com estrutura cristalina tetragonal, ortorrômbica ou monoclínica.

Pode-se ainda classificar a martensita em martensita com deformação (twinned, M^t) que possui 24 variantes, com orientações cristalográficas diferentes e martensita sem deformação (detwinned, M^d).

A fase austenita é uma fase relativamente dura e possui estrutura geralmente cúbica e simétrica. Nessa fase, as ligas apresentam relativo alto módulo elástico (HESSELBACH, 1995). A fase martensita é flexível sendo facilmente deformável e possui uma estrutura com pouca simetria (HESSELBACH, 1995).

3.1.3 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

A transformação martensítica, para a martensita com deformação, ocorre apenas com a variação de temperatura, existindo quatro temperaturas características.

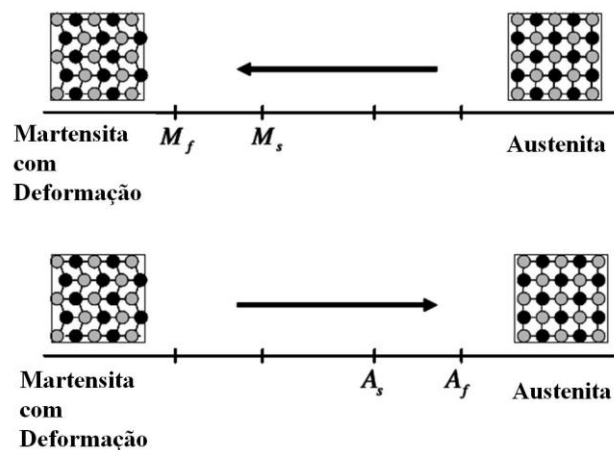


Figura 3.3 – Transformação induzida através da mudança de temperatura. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

Na transformação para frente tem-se a austenita. Reduzindo a temperatura até M_s inicia-se a transformação martensítica, a qual é finalizada ao chegar na temperatura M_f . No caso inverso, ou seja, quando se aquece a martensita com deformação até a temperatura A_s tem início a transformação, finalizando-se ao chegar na temperatura A_f . Pode-se ver esse processo na Figura 3.4.

Quando se aplica uma carga mecânica sobre a martensita com deformação a baixa temperatura, o material sofre uma mudança macroscópica em sua forma,

resultando na transformação para martensita sem deformação (Figura 3.4). Após cessar a aplicação da carga sobre o material, a deformação é mantida.

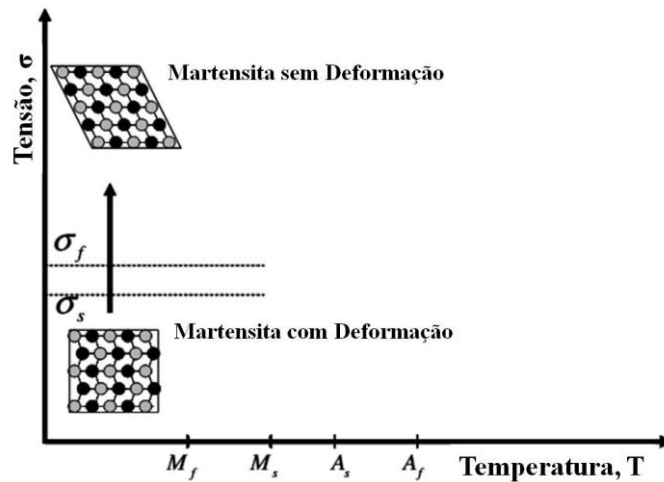


Figura 3.4 – Transformação induzida através da aplicação de uma carga. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

No entanto, o aquecimento da martensita sem deformação até uma temperatura superior a A_f resulta na transformação para austenita, recuperando sua forma original.

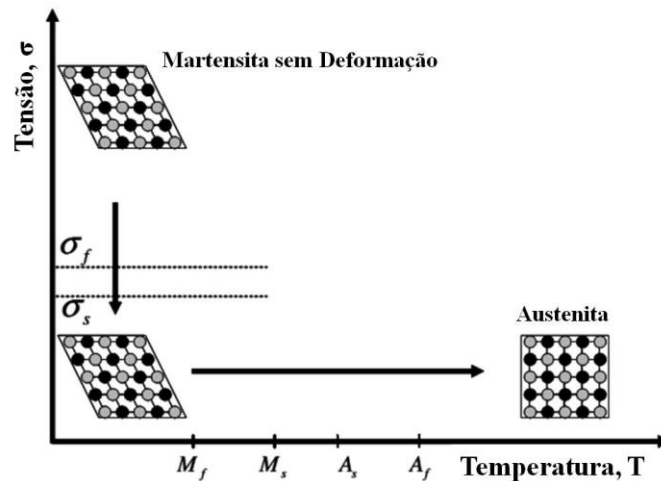


Figura 3.5 – Após cessar a aplicação da carga o material se mantém da mesma forma e com o aquecimento até uma temperatura superior a A_f obtemos a fase austenítica. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

Com a diminuição de temperatura até um valor menor que M_f obtem-se a martensita com deformação sem alteração na forma. O processo descrito é chamado de Efeito de Memória de Forma (SME). Da mesma forma que se têm quatro temperaturas

características, são obtidos dois valores de tensão importantes, tensão inicial (σ_s) e tensão final (σ_f), como é visto na Figura 3.5. Para o caso de aplicação de uma carga mecânica maior que σ_s sobre a austenita e em seguida diminuir a temperatura; nesse processo tem-se a formação direta da martensita sem deformação, com alteração em sua forma.

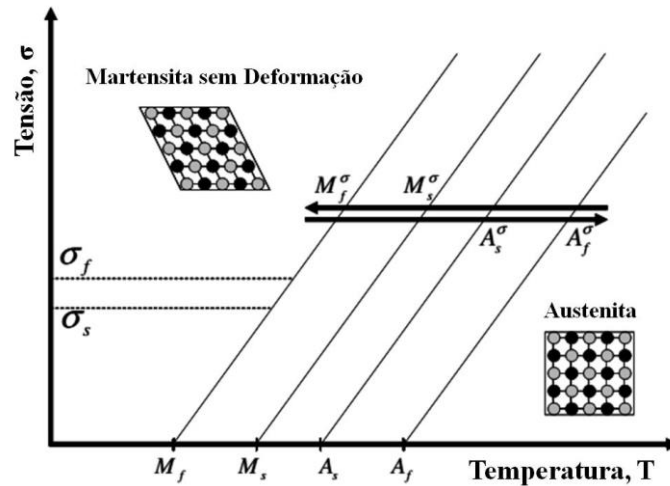


Figura 3.6 – Transformação induzida através da aplicação de tensão e diminuição da temperatura. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

É verificado, através da Figura 3.6, que esse processo ocorre nos dois sentidos, desde que seja aplicada uma tensão superior a σ_s , como dito anteriormente. Outro detalhe importante é que as temperaturas de mudança de fase são modificadas à medida que há uma variação na tensão aplicada sobre o material. As novas temperaturas serão $M_f^\sigma, M_s^\sigma, A_s^\sigma$ e A_f^σ .

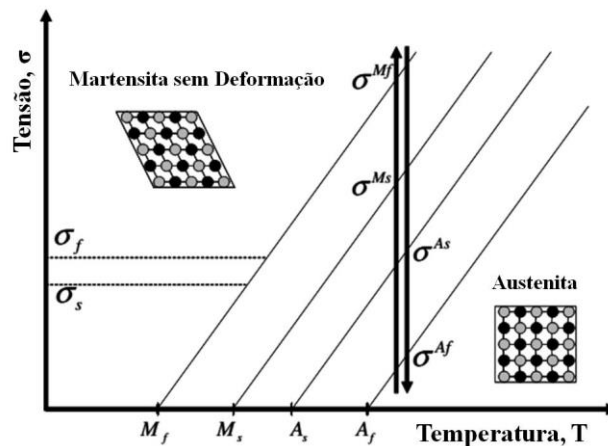


Figura 3.7 – Transformação Superelástica. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

A mesma transformação pode ser induzida pela aplicação de uma carga mecânica suficientemente grande sobre o material na fase austenítica, resultando na martensita sem deformação.

Com a retirada da carga ocorre a recuperação da forma original; todo esse processo ocorre nos dois sentidos desde que a temperatura seja superior a A_f . Este comportamento é chamado de efeito superelástico. Pode-se constatar o efeito através do diagrama tensão-deformação mostrado na Figura 3.8.

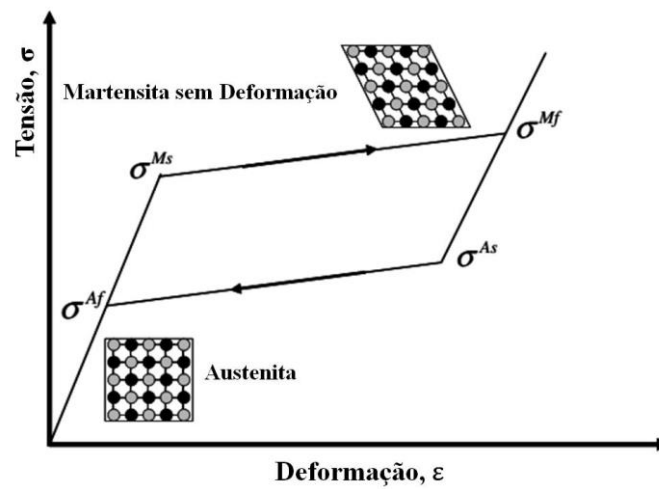


Figura 3.8 – Diagrama tensão-deformação do efeito superelástico. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

Os valores característicos de tensão são dados por: σ^{Ms} e σ^{Mf} para o processo de transformação de austenita para martensita sem deformação e para o processo inverso temos σ^{As} e σ^{Af} .

3.1.4 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

O efeito de memória de forma pode ser visualizado através do diagrama tensão-deformação-temperatura na Figura 3.9. Partindo do ponto A, o material na fase austenítica e ao diminuir a temperatura para um valor abaixo de M_f obtém-se a martensita com deformação no ponto B. Em seguida o material sofre um carregamento e é iniciado o processo de reorientação da sua estrutura cristalina, ao superar o nível de tensão σ_f é alcançada a martensita sem deformação, como visto no diagrama o material sofre uma deformação, sem causar uma deformação plástica permanente. Do ponto C ao

D ocorre o descarregamento e a estrutura permanece a mesma, martensita sem deformação, daí então é feito o aquecimento até a temperatura superior a A_f , ao mesmo tempo em que o material retorna à sua forma original, austenita.

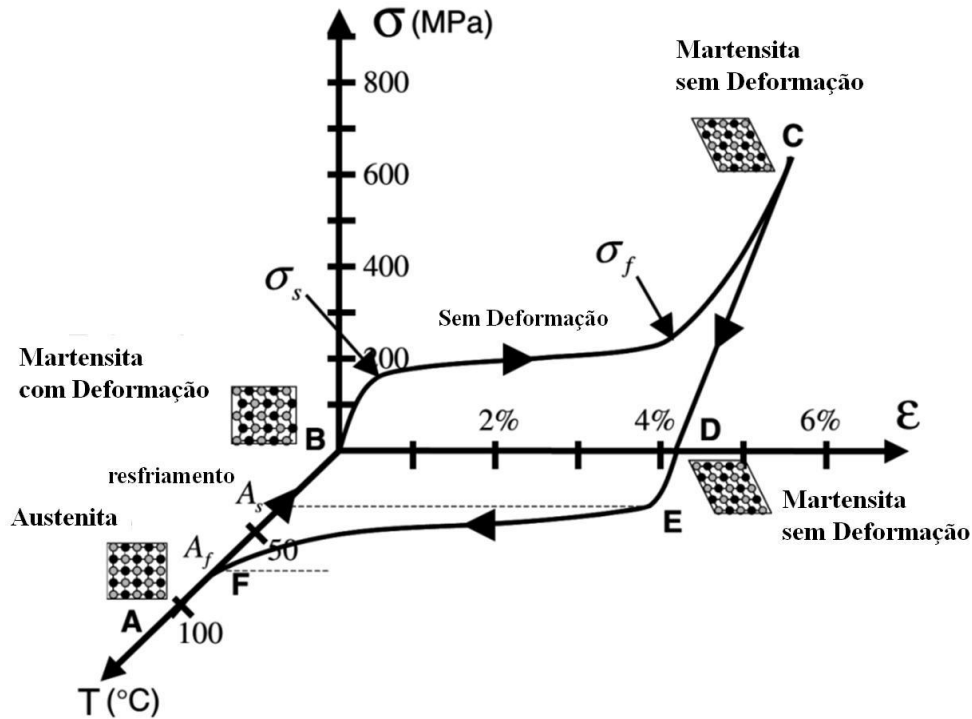


Figura 3.9 – Efeito de Memória de Forma em liga NiTi. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

3.1.5 SUPERELASTICIDADE

O comportamento Superelástico das LMF está associado com a transformação induzida através da aplicação de um carregamento e em seguida o descarregamento em uma temperatura superior a A_f .

Pode-se ver na Figura 3.10 a aplicação de uma tensão no ponto A, na fase austenítica, quando o nível de carregamento alcança o valor σ^{Ms} é iniciada a transformação martensítica e ao superar o valor de σ^{Mf} obtêm-se uma nova estrutura cristalina, ou seja, a martensita sem deformação. O material sofre uma grande deformação elástica.

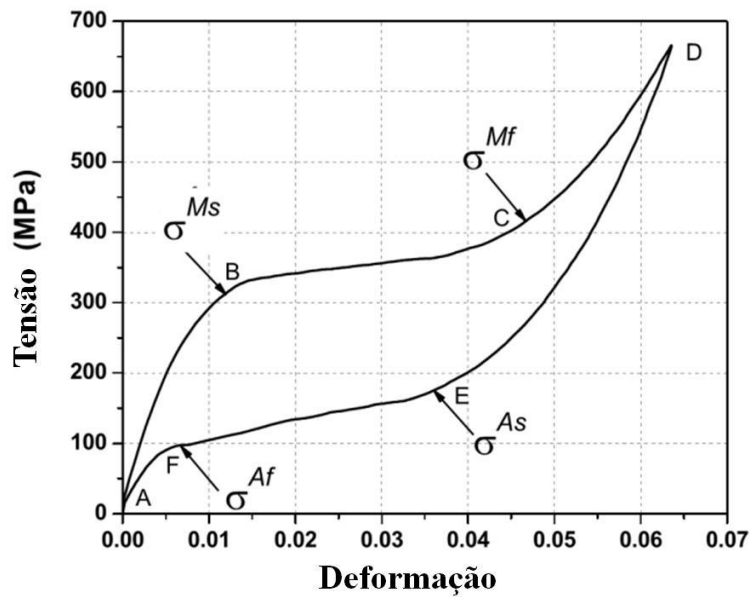


Figura 3.10 – Comportamento Superelástico. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

Partindo do ponto D temos o descarregamento, e por consequência a recuperação da deformação sofrida. A medida que o valor de tensão diminui temos uma outra transformação de fase, ou seja, quando o valor de tensão for menor que σ^{Af} obtem-se, novamente, a austenita. Esse processo é de grande importância quanto ao comportamento cíclico das ligas com memória de forma.

3.1.6 COMPORTAMENTO CÍCLICO

Vimos o comportamento do material para certo processo de carregamento e descarregamento. No entanto, se esse processo for repetido por várias vezes ocorrerá alterações microscópicas, gerando modificações macroscópicas permanentes.

Vamos considerar um processo cujo carregamento permanece constante e uma alteração cíclica na temperatura. Como pode-se ver na Figura 3.11, quando o material retorna a temperatura inicial, concluindo o primeiro ciclo, notamos uma alteração em seu valor de deformação. E ao serem realizados novos ciclos essa alteração na deformação diminui gradualmente até que praticamente deixa de existir.

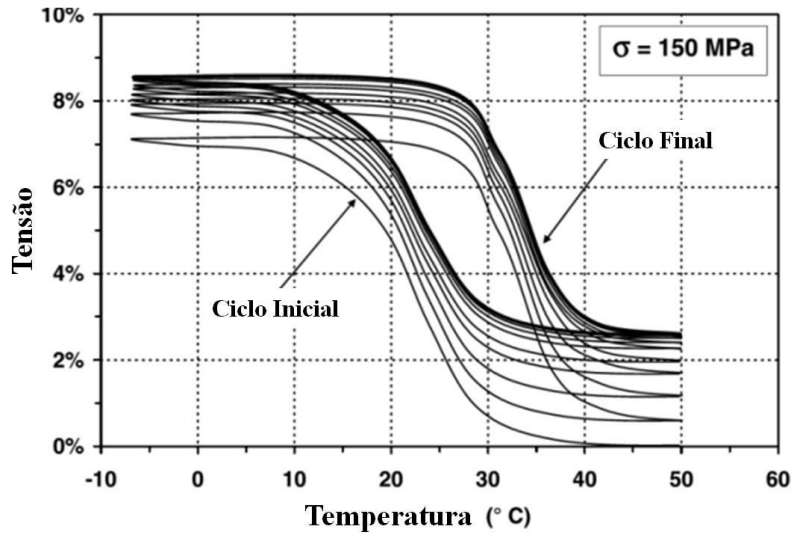


Figura 3.11 – Carga Térmica Cíclica com Carregamento Constante. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

Vamos considerar um processo cujo carregamento permanece constante e uma alteração cíclica na temperatura. Como se pode ver na Figura 3.11, quando o material retorna a temperatura inicial, concluindo o primeiro ciclo, notamos uma alteração em seu valor de deformação. E ao serem realizados novos ciclos essa alteração na deformação diminui gradualmente até que praticamente deixa de existir.

Um comportamento semelhante é observado no processo superelástico, no qual temos a temperatura mantida constante e superior à A_f , e variação no carregamento.

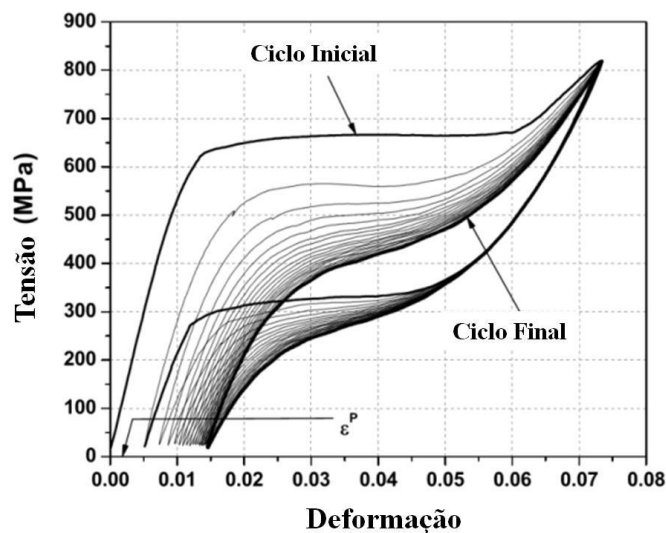


Figura 3.12 – Cíclico do Comportamento Superelástico. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

O entendimento do comportamento cíclico das ligas com memória de forma é importante o uso desse tipo de material na construção de atuadores mecânicos, pois é necessária que a deformação seja sempre a mesma para uma dada carga (tensão, temperatura) para que tenhamos uma boa confiabilidade na exatidão do atuador.

3.1.7 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA

A transformação de fase de austenita em martensítica, e vice-versa, está associado com a liberação e absorção de calor latente, as temperaturas relacionadas geralmente são determinadas usando a calorimetria diferencial de varredura. O processo consiste no aquecimento ou resfriamento de uma pequena amostra do material de forma gradual.

Para que o aquecimento ou resfriamento seja feito de forma gradual e constante é necessário que seja aplicada certa quantidade de calor sobre a amostra. Como é possível ver na Figura 3.13, durante o aquecimento existe um pico, e o mesmo ocorre para o resfriamento. Através desses picos pode-se encontrar os valores das temperaturas A_s , A_f , M_s e M_f , por meio de retas tangentes com relação às subidas e descidas dos picos como vistos na Figura 3.13.

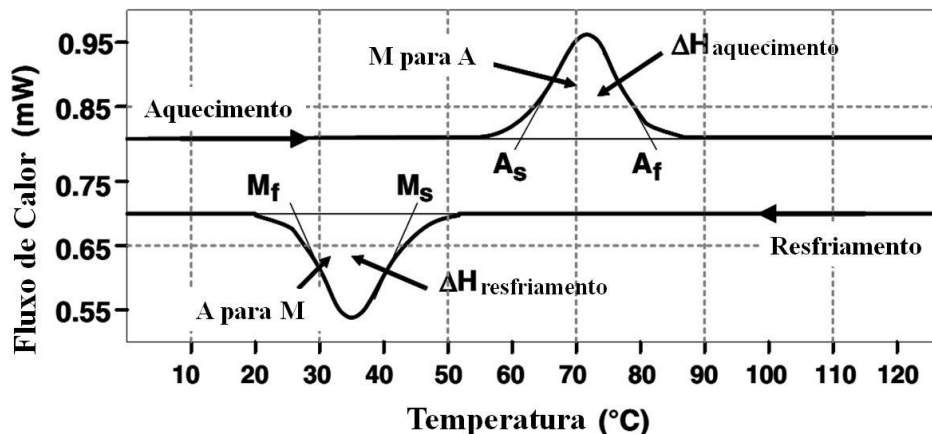


Figura 3.13 – Calorimetria Diferencial de Varredura. (Adaptada de Lagoudas, 2008)

A grande vantagem desse processo é o fato de usar uma pequena quantidade do material e a confiabilidade dos valores de temperatura encontrados durante a varredura.

3.1.8 HISTERESE

Histerese é um fenômeno frequentemente encontrado no desenvolvimento e controle de atuadores e sensores eletromecânicos. Este fenômeno é claramente observado em materiais especiais como os magnetostritivos, ferroelétricos, piezoelétricos e ligas de memória de forma. A grande importância de modelar precisamente o seu fenômeno, vem da necessidade de aplicar controles cada vez mais precisos em atuadores que utilizam tais materiais.

Especificamente, a LMF pode apresentar uma grande histerese em sua resposta termomecânica durante o ciclo de transformação de fase. Esta histerese é causada principalmente pela fricção associada com o movimento das interfaces de austenita-martensita e martensita-martensita com diferentes orientações cristalográficas (BO; LAGOUDAS, 1999). Isto pode ser visto em curvas quase estáticas de tensão-deformação e curvas de temperatura-deformação (JACKSON et al., 1972) e (WAYMAN, 1983). A histerese na LMF é influenciada pelo defeito local da estrutura, que pode ser afetado pelo carregamento cíclico (MIYAZAKI et al., 1986), portanto também depende do histórico do carregamento (BO; LAGOUDAS, 1999).

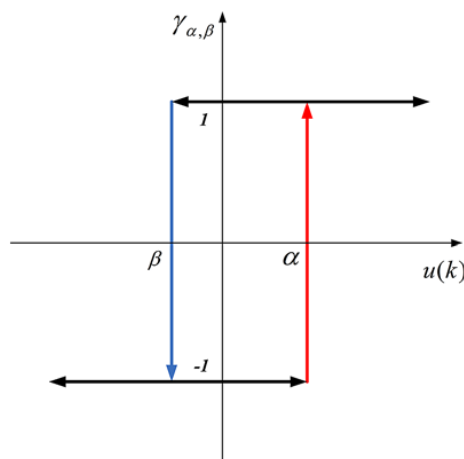


Figura 3.14 – Ilustração do operador de Preisach.

Há essencialmente dois grupos existentes de modelagem da descrição do comportamento da histerese das LMFs. O primeiro é uma aproximação baseada na termomecânica contínua, e a metodologia empregada neste tipo de modelo constitutivo pode ser comparada à teoria clássica da plasticidade, Sun et al (1991). O segundo é uma

aproximação baseada no trabalho de Preisach (1935), na modelagem da histerese ferromagnética, o material é considerado como um composto de um grande número de elementos histeréticos, e a resposta global do material é obtido pela superposição das respostas individuais destes elementos. Recentemente, seguindo o trabalho de Preisach, a teoria geral da representação matemática do operador de histerese tem sido estabelecida, Kranoselskii e Pokrovskii (1983) e Visintin (1994). Os modelos do segundo grupo são os mais usados para descrever materiais com histerese e tem sido amplamente usados para modelar a resposta histerética das LMFs, Webb e Kurdila (1997).

3.2 MOLAS HELICOIDAIS

As molas mais comuns utilizadas na engenharia são as helicoidais, planas, prato e as de tensão constante. As helicoidais são as mais utilizadas e podem ser vistas em veículos, suporte de máquinas ferramentas e outras diversas aplicações. Molas planas são aplicadas, principalmente, em veículos de carga, como carroceria de caminhões e caminhonetes. Molas prato podem ser utilizadas em aplicações especiais; um exemplo dessa utilização é a arruela cônica. Molas de tensão constante são fabricadas como uma fita de aço levemente curvada e enrolada em torno de um pino; a principal característica dessa mola é a força constante durante todo o seu desenrolamento. Neste estudo é dada ênfase à mola helicoidal de tração, tendo em vista que o trabalho foi desenvolvido utilizando este tipo de mola LMF.

Na Figura 3.15 é mostrada uma mola helicoidal onde uma força “F” é aplicada no sentido de extensão da mola de diâmetro médio “D”, construída de “N” espiras através de um fio de diâmetro “d”. A relação entre os diâmetros da mola e do fio é chamada de índice da mola “C”, que indica o quanto o fio deve ser curvado para formar uma mola de diâmetro médio requerido. Os fios têm maior rigidez no lado interno, pois o comprimento a ser torcido internamente é menor, o que aumenta a rigidez provocando um aumento na tensão mecânica da mola devido aos esforços que se somam no lado interno. Fatores de segurança para as causas do efeito de cisalhamento transversal e da curvatura da mola devem ser considerados através do fator de Wahl (1944). Sendo que

para a solicitação variável deve-se utilizar o fator K_w e para solicitações estáticas deve-se utilizar o fator K_s , Aguiar et al (2009). As equações são descritas a seguir.

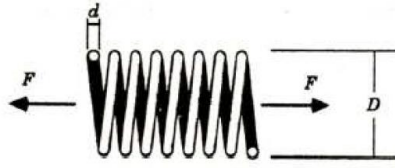


Figura 3.15 – Mola Helicoidal

$$K_w = \frac{4.C - 1}{4.C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (3.1)$$

$$K_s = 1 + \frac{0,615}{C} \quad (3.2)$$

No fator K_s de Wahl está embutido um fator de segurança de 23% sobre a carga estática. Na prática, este fator é estimado apenas no final dos cálculos com a comparação entre as tensões. Assim, Santos (2001) recomenda trocar o termo 0,615 para 0,5 na Equação 3.2.

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C} \quad (3.3)$$

A tensão de carregamento estático pode ser calculada por:

$$\tau = \frac{8.F.D}{\pi.d^3} \cdot K_s \quad (3.4)$$

Como:

$$C = \frac{D}{d} \quad (3.5)$$

Pode-se reescrever a equação para o cálculo do carregamento estático, como apresentado na Equação 3.6:

$$\tau = \frac{8.F.C}{\pi.d^2} \cdot K_s \quad (3.6)$$

Para carregamento de tensão dinâmica, tem-se:

$$\tau = \frac{8.F.D}{\pi.d^3} \cdot K_w = \frac{8.F.C}{\pi.d^2} \cdot K_w \quad (3.7)$$

O valor da deflexão de uma mola pode ser calculado a partir do método de Castigliano, onde:

$$\delta = \frac{8.F.D^3.N}{d^4.G} \quad (3.8)$$

Assim, a constante de mola k pode ser definida conforme a Equação (3.9).

$$k = \frac{G.d^4}{8.D^3.N} \quad (3.9)$$

Para um atuador com fio de LMF deve ser levado em consideração principalmente o diâmetro e o comprimento que determinam a força e o deslocamento respectivamente. No entanto, para se usar uma mola de LMF como atuador há duas abordagens diferentes que podem ser levadas em consideração.

A primeira seria considerar as equações da mola convencional alterando o módulo de cisalhamento pela austenita e a martensita, Otsuka e Wayman (1999). Vários pesquisadores têm utilizado esta abordagem de equações da mola convencional para projetar atuadores de mola de LMF. Kim et al (2006) aplicaram esta abordagem em um micro robô parecido com uma minhoca. Kho, An e Cho (2010) usaram a mesma abordagem para um dedo robótico de tamanho escalar.

Mesmo servindo como ponto de partida, esta abordagem de projeto utilizando a equação da mola convencional ignora o fato de um atuador de mola LMF poder deformar-se a uma tensão de cisalhamento entre 6% e 8% e ainda recuperar a sua forma original. A equação normal da mola está limitada à recuperação elástica da mola, o que significa uma deformação da tensão de cisalhamento de 1%. A equação não descreve o alongamento do atuador de mola pelo fato de não estar acoplada, sendo este o fator chave no EMF, AN et al (2012).

A segunda abordagem seria usar a caracterização experimental ao invés de um modelo que descreva o atuador de mola LMF. Menciassi et al (2004) usou esta aproximação para uma minhoca artificial e Trimmer et al (2006) também usou a aproximação para um softbot (um robô deformável).

A forma helicoidal faz com que o comportamento termomecânico seja distinto em relação à aplicação do fio, com isso, as técnicas de controle necessitaram de novos estudos conforme abordagem feita a seguir.

3.3 INDUTÂNCIA

A indução eletromagnética vem sendo bastante estudada desde a década de 1830, na realização de diversas experiências, sendo seus pioneiros Michael Faraday, na Inglaterra, e Joseph Henry, Nos Estados Unidos. Eles observaram que através da variação do campo magnético uma força eletromotriz era induzida em uma espira.

Inicialmente consideram-se dois circuitos arbitrários de contornos C_1 e C_2 , como mostrado na Figura 3.16. O circuito C_1 está sendo percorrido por uma corrente i_1 , e por conta disso é gerado um campo magnético \vec{B}_1 . Esse campo abrange também a área definida pelo circuito C_2 .

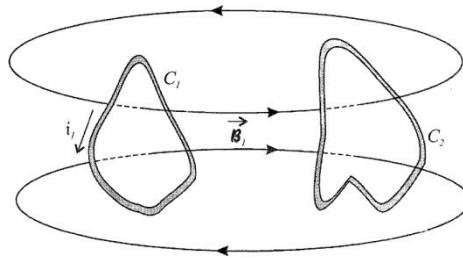


Figura 3.16 – Dois circuitos arbitrários, um dos quais é percorrido por uma corrente. (Machado, 2002)

Portanto, existe um fluxo magnético que atravessa o circuito C_2 , caso a corrente seja estacionária, o campo magnético será constante, pode-se calcular o campo magnético através da Lei de Biot-Savart,

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}, \quad (3.10)$$

somando as contribuições de todo o circuito,

$$\vec{B}_1 = \int d\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 i_1}{4\pi} \oint_{C_1} \frac{d\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}. \quad (3.11)$$

Percebe-se facilmente que o campo magnético \vec{B}_1 produzido pelo circuito C_1 é diretamente proporcional à corrente i_1 ,

$$B_1 \propto i_1. \quad (3.12)$$

O fluxo magnético de atravessa o circuito C_2 será constante se o campo magnético for constante, isto é, não ocorrerá o surgimento de um campo elétrico ou corrente induzida no circuito C_2 , pois é necessário que exista uma variação no fluxo magnético,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_{\vec{B}}}{dt}. \quad (3.13)$$

Caso a corrente i_1 seja variável, teremos um campo magnético também variável, ou seja, existirá um fluxo magnético através do circuito C_2 ,

$$\Phi_{1,2} = \int_{C_2} \vec{B}_1 \cdot \hat{n} dA. \quad (3.14)$$

O fluxo magnético também é diretamente proporcional a corrente. E usando uma constante de proporcionalidade,

$$\Phi_{1,2} = M_{1,2}i_1, \quad (3.15)$$

onde $M_{1,2}$ é a indutância mútua dos circuitos 1 e 2. Essa relação é de grande importância para sistemas formados por mais de um circuito. No entanto, vamos considerar nesse trabalho um sistema simples formado por apenas um circuito. Considere a seguinte sistema, um circuito formado por um solenóide ou uma bobina, e que por ele passa uma corrente i_1 variável, gerando um campo magnético em torno do circuito e por consequência um fluxo magnético variável. Esse fluxo magnético gerado pelo circuito produzirá uma força eletromotriz induzida sobre si mesmo.

Com isso, teremos uma relação bastante semelhante a anterior, cuja constante de proporcionalidade será o próprio valor de indutância da bobina,

$$\Phi_1 = Li_1 \Rightarrow \frac{d\Phi_1}{dt} = L \frac{di_1}{dt} \quad (3.16)$$

$$\varepsilon = -L \frac{di_1}{dt}, \quad (3.17)$$

outra forma de escrever a equação é através da lei de Faraday,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.18)$$

Num circuito simples, no qual existe apenas uma fonte variável de força eletromotriz em paralelo com um indutor, o campo elétrico gerado pela fonte é conservativo, \vec{E}_c . No entanto, o campo elétrico induzido magneticamente nas bobinas do indutor não é conservativo, \vec{E}_n .

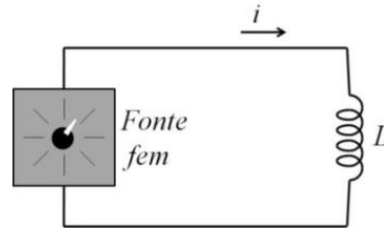


Figura 3.17 – Circuito Simples, fonte variável de força eletromotriz em paralelo com um indutor.

E em cada ponto do interior das bobinas temos que o valor do campo elétrico é nulo, portanto,

$$\vec{E}_c + \vec{E}_n = \mathbf{0} \Rightarrow \vec{E}_n = -\vec{E}_c, \quad (3.19)$$

$$\int \vec{E}_n \cdot d\vec{l} = -L \frac{di}{dt} \Rightarrow \int \vec{E}_c \cdot d\vec{l} = L \frac{di}{dt}, \quad (3.20)$$

$$\Delta V = L \frac{di}{dt}. \quad (3.21)$$

Vamos considerar um solenóide longo de raio r , comprimento l e N espiras, percorrido por uma corrente i , como mostrado na Figura 3.18,

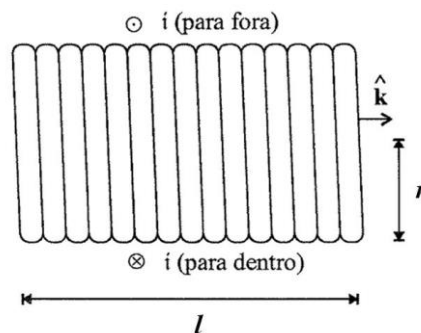


Figura 3.18 – Solenóide de raio r . (Adaptada de Machado, 2002)

Para um solenóide longo o campo magnético em seu interior é dado pela seguinte expressão,

$$\vec{B} = \frac{N\mu_0 i \hat{k}}{l}. \quad (3.22)$$

De posse do valor do campo magnético encontra-se o fluxo magnético através de uma espira de um solenóide,

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dA, \quad (3.23)$$

$$\Phi = \int_S \frac{N\mu_0 i \hat{k}}{l} \cdot \hat{k} dA, \quad (3.24)$$

$$\Phi = \frac{N\mu_0 i}{l} \int_S dA, \quad (3.25)$$

$$\Phi = \frac{N\mu_0 i}{l} \pi r^2. \quad (3.26)$$

Como o solenóide possui N espiras, o fluxo magnético total através do solenóide fica,

$$\Phi = \frac{N^2 \mu_0 \pi r^2 i}{l}, \quad (3.27)$$

$$L = \frac{d\Phi}{di} = \frac{d}{dt} \left(\frac{N^2 \mu_0 \pi r^2 i}{l} \right), \quad (3.28)$$

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \pi r^2}{l}. \quad (3.29)$$

Verifica-se então que ver a indutância é puramente geométrica, ou seja, depende apenas das características físicas do solenóide. Essa característica pode ser usada em atuadores com molas feitas de ligas com memória de forma, com a aplicação de uma diferença de potencial variável sobre a mola será gerado um fluxo magnético e por conseqüência, encontra-se o valor de indutância. E através da relação acima calcular o valor da deformação sofrida pela mola.

3.3.1 CIRCUITO *RL*

Considerando-se um circuito RL . Cujo indutor L é uma mola feita de liga com memória de forma. Como mostrado na Figura 3.19.

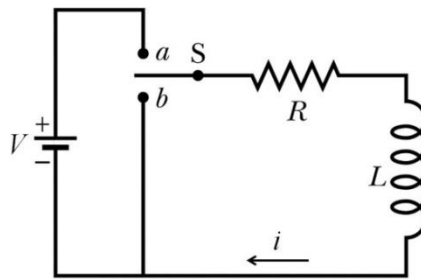


Figura 3.19 – Circuito RL

Sabemos através da lei das malhas de Kirchhoff, que calculando sucessivamente a diferença de potencial de cada elemento do circuito temos,

$$V = Ri + V_L, \quad (3.30)$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} \Rightarrow L \int di = \int V_L dt = \int (V - Ri) dt, \quad (3.31)$$

$$L = \frac{1}{i} \int (V - Ri) dt. \quad (3.32)$$

Numa situação real a medição é feita através de um sistema de aquisição de dados a tensão de entrada V , a tensão dissipada no resistor Ri . E conhecendo o valor de R , encontra-se a corrente i através da lei de Ohm, $i = V/R$. No entanto, esse método é muito sensível a presença de ruídos, dificultando bastante o cálculo de forma precisa do valor de indutância.

3.3.2 DIFERENÇA DE FASE

Sabemos também que circuitos com a presença de indutores sofrerão um atraso de fase entre na resposta do circuito com relação ao um sinal de entrada, ou seja, como vemos na Figura 3.20, o valor da indutância será responsável por um maior ou menor tempo de atraso, ou seja, o atraso de fase está diretamente relacionado ao valor de indutância magnética.



Figura 3.20 – Atraso de fase entre a tensão de entrada e a resposta.

Essa defasagem gerada devido a presença de um indutor no circuito pode ser escrita da seguinte forma:

$$\tan \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi fL}{R}, \quad (3.33)$$

onde X_L é a reatância indutiva e R a resistência vinculada ao próprio indutor, ou seja, através do cálculo do ângulo de fase é possível encontrar o valor da indutância.

$$L = \frac{R \tan \varphi}{2\pi f} \quad (3.33)$$

Esse método apresentou uma sensibilidade bem menor a ruídos, mostrando-se uma alternativa mais confiável para o cálculo de indutância. E tendo em mãos o valor da indutância L ; o número de espiras N ; a permeabilidade magnética do núcleo do indutor μ_0 , para o vácuo, podendo assumir outros valores caso o núcleo seja composto por algum outro material; e a área de seção transversal da mola dada por $A = \pi r^2$, onde r é o raio do solenóide, podemos encontrar o comprimento do indutor l ,

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \pi r^2}{l} \Rightarrow l = \frac{N^2 \mu_0 \pi r^2}{L} = \frac{2N^2 \mu_0 \pi^2 f r^2}{R \tan \varphi} \quad (3.34)$$

Fazendo esse procedimento em dois momentos diferentes, com valores de comprimento l_1 e l_2 , pode-se encontrar a deformação sofrida pela mola,

$$\varepsilon = l_2 - l_1, \quad (3.35)$$

Portanto, pode-se implementar esse método em um atuador como o descrito anteriormente.

O dispositivo seria basicamente composto pelo atuador, as ligações elétricas para a passagem da soma de duas correntes, uma das correntes deve ser alternada para o cálculo da indutância devido ao fluxo do campo magnético através das espiras da mola helicoidal, a outra corrente elétrica deve ser contínua para gerar o aquecimento do atuador com memória de forma, e o dispositivo eletrônico capaz de controlar a intensidade da corrente constante e da tensão variável aplicada entre os terminais da mola.

Outra característica importante que é necessário destacar é que para um indutor real deve-se fazer a consideração vista na Figura 3.21, ou seja, um indutor possui uma resistência interna intrínseca do mesmo, que foi denominada R_L .

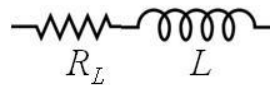


Figura 3.21 – Indutor Real.

Capítulo 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma têm sido largamente utilizadas em atuadores, como por exemplo, micro robôs (Wang et al, 2008), garras e mãos robóticas (Yang e Gu, 2002), (Zhong e Yeong, 2006) e (Silva, 2010). Em geral, os estudos de caracterização e modelagem de fio LMF têm sido conduzidos para movimentos de atuação em uma dimensão. No entanto, dando uma forma bidimensional ou tridimensional ao atuador pode ser possível aumentar, consideravelmente, o rendimento (Leester-Shädel et al, 2008), (LEE e KIM, 2008) e (Torres-Jara et al, 2010). Com uma mola de LMF é possível atingir de 200% a 1600% de deformação em comparação aos 5 % do fio de LMF (An et al, 2012), devido a sua geometria.

E em geral o sensoriamento usado para detectar o deslocamento efetuado por um atuador é feito com a utilização de um dispositivo a parte. Considerando o atuador linear do tipo mola helicoidal nesta pesquisa, foi desenvolvida uma metodologia que possibilitasse a calibração do deslocamento linear realizado pelo atuador através da variação de indutância, que está diretamente ligada à geometria da mola helicoidal.

4.2 A MOLA HELICOIDAL

A utilização do formato tipo mola helicoidal foi devido à grande capacidade de deformação se comparadas com outros atuadores lineares, levando em conta também as características de indução magnética relacionada à geometria. O diâmetro da mola escolhido foi de 10,00 mm, pois foi necessário acondicionar o núcleo de ferrita no

interior da mola; o núcleo de ferrita utilizado tem formato cilíndrico com diâmetro de 8,00 mm e comprimento de 160,00 mm.

O fio com memória de forma utilizado para o desenvolvimento do atuador foi de Níquel Titânio (NiTi) com diâmetro de 1,00 mm. A escolha do valor do diâmetro deve obedecer à seguinte relação: $(Diâmetro\ da\ Mola)/(Diâmetro\ do\ Fio)$, cujo valor da relação deve assumir valores maiores que 5 para que seja possível a construção da mola, e menores que 12, para que a mola não fique muito flexível, com baixa rigidez. No estudo realizado nesse trabalho, a relação entre os diâmetros assume valor igual à 10, atendendo as especificações descritas no “*Design Handbook: Engineering Guide to Spring Design*”.

A mola helicoidal possui 32 espiras distribuídas em um comprimento de 65,00 mm em seu estado de equilíbrio, podendo ser deslocada através do aparato desenvolvido para tal função que será descrito mais adiante. Para que a mola helicoidal adquirisse o efeito de memória de forma foi realizado um tratamento térmico, no qual a mola permaneceu durante 6 horas em um forno elétrico a temperatura constante de 450 °C, e resfriada na água em temperatura ambiente.

4.3 BANCADA DE TESTES

A bancada de testes é composta por duas fontes, a primeira, como é visto na Figura 4.1, corresponde a um gerador de funções responsável pela aplicação da corrente alternada que permite a geração do fluxo magnético. A outra fonte fornece a corrente contínua inserida para garantir o aquecimento as propriedades termomecânicas da liga NiTi. Tem-se ainda o sistemas de aquisição DAQ, cujos dados são processados pelo LabVIEW e analisados através do MatLab.

O circuito é formado apenas por um capacitor responsável pelo desacoplamento entre as fontes. Resistências elétricas usadas para aquisição do sinal com atraso de fase. E o dispositivo indutor, cujo valor de indutância pode ser variado devido a modificações em seu comprimento, tais modificações são feitas através do uso de uma catraca. Todos os componentes que integram a bancada de testes podem ser vistos na Figura 4.1.

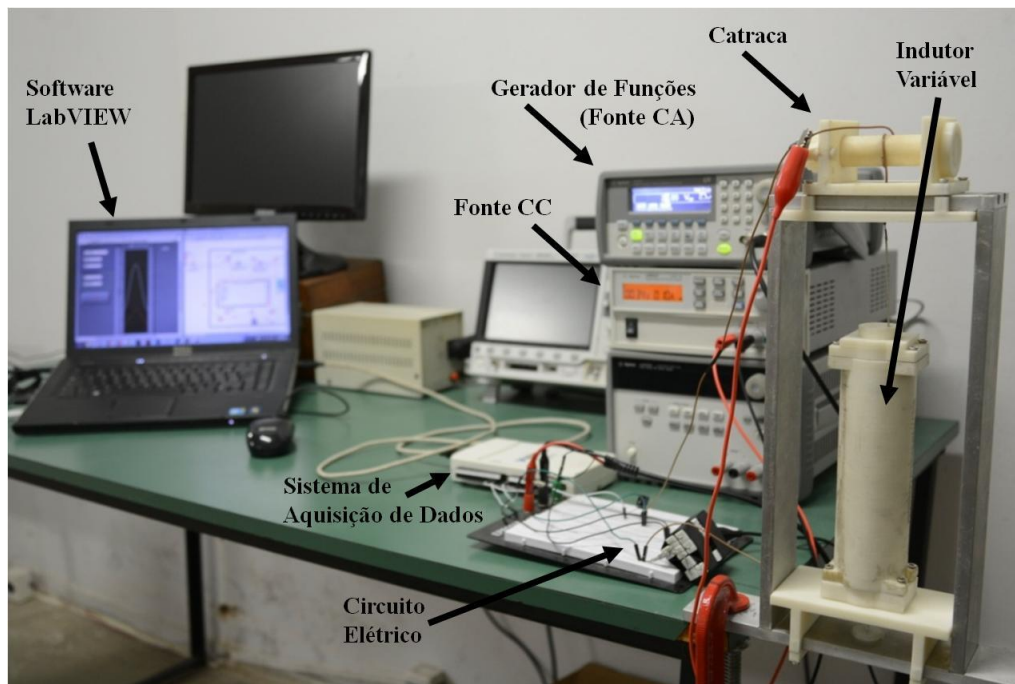


Figura 4.1 – Bancada de Testes.

4.3.1 CATRACA

A estrutura responsável pelo deslocamento realizado sobre a mola é vista na Figura 4.2. O qual é composto por uma catraca, capaz de estender a mola em passos de aproximadamente 2,61 mm, e com um giro completo realiza um deslocamento de $2 \cdot \pi \cdot r = 62,83 \text{ mm}$, o equivalente a 24 passos, no qual o parâmetro r está relacionado o raio do eixo visto na Figura 4.2, cujo valor é de 10,00 mm.

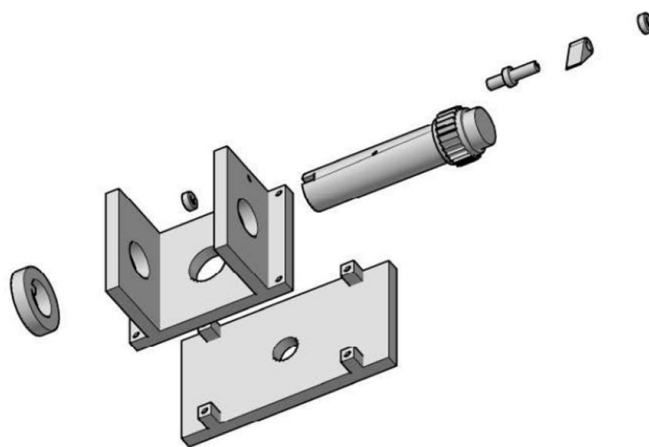


Figura 4.2 – Catraca responsável por proporcionar o deslocamento do indutor variável.

4.3.2 INDUTOR VARIÁVEL

O aparato que comporta o indutor helicoidal variável foi desenvolvido em material polimérico com uma impressora 3D com o objetivo de evitar qualquer efeito magnético sobre a mola, o que poderia ocasionar algum ruído na aquisição dos dados. No interior da estrutura, a mola foi encapsulada, ou seja, o indutor foi envolvido por ferrita; o motivo de tal escolha se deve ao fato de a ferrita permitir uma melhor passagem do fluxo magnético gerado pelas espiras do indutor ao serem percorridas por uma corrente alternada em altas frequências, e como consequência tem-se o aumento do valor de indutância medido devido a mudança do valor da permeabilidade magnética. Na Figura 4.3 podem-se observar alguns elementos da estrutura; no número 1 tem-se o indutor helicoidal de LMF, o número 2 representa um bastão cilíndrico de ferrite com diâmetro de 8,00 mm e comprimento 160,00 mm, o número 3 se trata de um tubo PVC e envolvendo esse tubo tem-se 10 anéis de ferrite representados pelo número 5, tais anéis possuem diâmetro externo de 35,00 mm, diâmetro interno de 22,00 mm e comprimento de 16,00 mm. Para que a mola ficasse encapsulada foi colocado dois discos de ferrite de diâmetro de 32,00 mm e espessura de 6,00 mm visto na figura com o número 4. Em tais discos foi necessário realizar um processo de desmagnetização, no qual os mesmos ficaram no forno elétrico por cinco horas numa temperatura de 1000 °C. Para a passagem dos fios foi feito um furo com diâmetro aproximado de 3,00 mm através de uma broca diamantada odontológica.

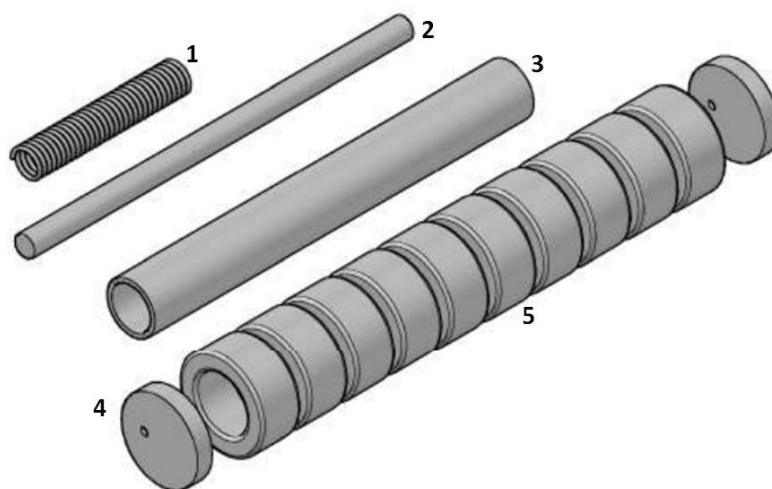


Figura 4.3 – Aparato desenvolvido em ferrite para acondicionamento da mola helicoidal.

E a estrutura mostrada na Figura 4.4 comporta e mantém fixos todos os itens mostrados na Figura 4.3.

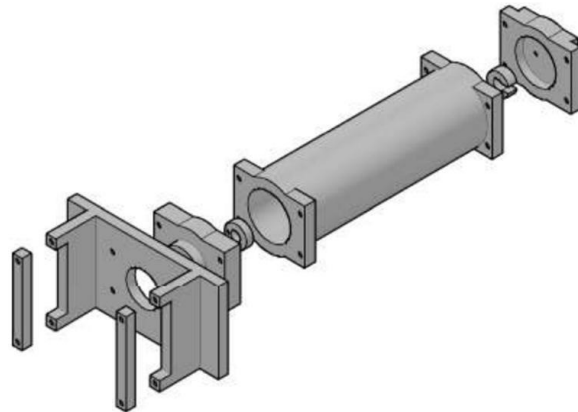


Figura 4.4 – Estrutura desenvolvida para acomodar o aparato em ferrite.

A estrutura permite que a mola seja estendida em 16 passos através da catraca, o que significa um deslocamento máximo de até 41,76 mm, ou seja, o indutor chega a um comprimento máximo de 106,76 mm. Durante tal deslocamento foi possível observar variações na indutância, de acordo com a já citada dependência geométrica da indutância em um indutor de formato helicoidal.

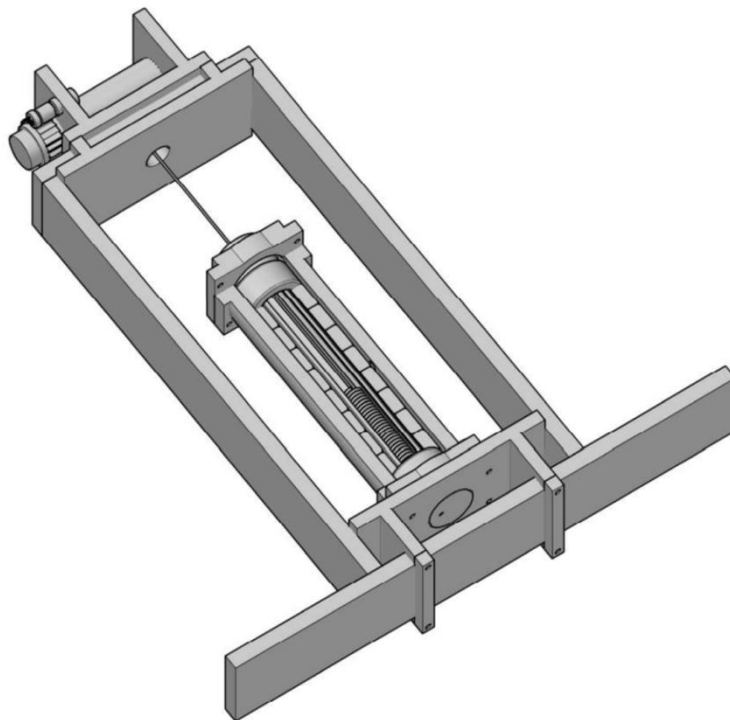


Figura 4.5 – Montagem completa do dispositivo indutor.

Na Figura 4.5 tem-se uma visão geral do indutor variável, é possível observar o interior do dispositivo indutor, e como são dispostas as ferritas, mostrando também a conexão entre a mola helicoidal e a catraca que é responsável pela variação no comprimento do indutor.

4.3.3 CIRCUITO ELÉTRICO

Conectado à mola têm-se 8 resistores de potência em paralelo cujo valor de resistência é de $10,00 \Omega$ cada. A escolha por um resistor de potência foi devido a corrente máxima suportada, no caso específico cada resistência tem capacidade para $1,00 \text{ A}$. Os resistores foram colocados em paralelo adquirindo uma resistência equivalente igual à aproximadamente $1,27 \Omega$ e tendo como função de resistência interna do indutor, na Figura 4.6 os resistores são representados apenas por R_L . A necessidade que tal resistência assuma esse valor é para que se assemelhe ao valor de resistência real do indutor, havendo uma divisão semelhante da tensão aplicada sobre os dois dispositivos.

Uma tensão alternada de aproximadamente $0,50 \text{ V}$ de pico-a-pico, cuja frequência do sinal aplicado é de $1,00 \text{ kHz}$ através de um gerador de funções com o objetivo de garantir as características indutivas do indutor variável. Simultaneamente foi aplicada sobre a mola helicoidal e os resistores de potência uma tensão contínua, através de uma Fonte CC, para garantir as propriedades termomecânicas da LMF, pois através do aquecimento a liga altera sua estrutura cristalina e adquire uma maior rigidez.

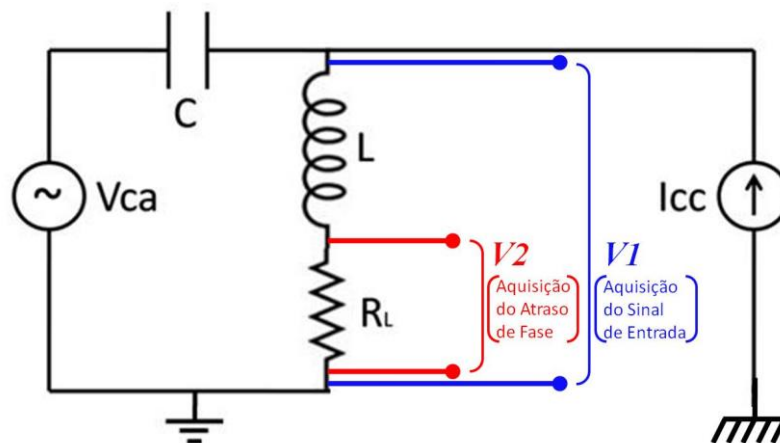


Figura 4.6 – Circuito RCL.

Para que as duas fontes de tensão fiquem desacopladas foi colocada na saída da fonte de tensão alternada um capacitor de 330,00 μF e as fontes foram aterradas separadamente como mostrado na Figura 4.6.

4.3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

Toda a aquisição dos dados foi feita usando um DAQ da National Instruments (NI USB-6215), usando apenas duas entradas, uma para a tensão alternada de entrada no circuito, e a outra entrada para aquisição do sinal que sofreu atraso devido ao efeito indutivo. As conexões realizadas podem ser vistas na Figura 4.6. A análise dos dados foi computada usando o MatLab, através do programa LabVIEW, cujo algoritmo é apresentado no Apêndice.

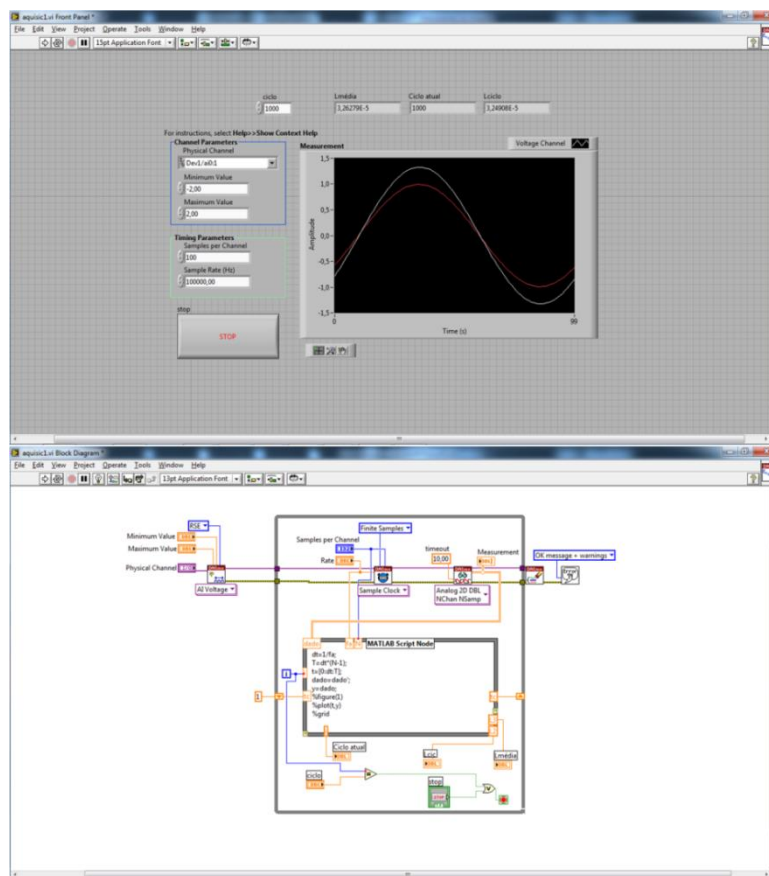


Figura 4.7 – Interface do LabVIEW.

4.4 METODOLOGIA

Com a estrutura montada, iniciou-se a aquisição de dados, que a princípio foram usados apenas indutores convencionais para verificar uma possível não linearidade com relação aos valores reais dos indutores. Durante o processo a fonte CC foi mantida em valor constante de 100 mA.



Figura 4.8 – Indutor Comercial.

Para verificar o valor real de cada indutor utilizado na fase de testes foi usado um LCR Meter da Agilent (U1731C), já que em escala industrial a fabricação desses indutores possui uma faixa de tolerância com relação à variação entre valor nominal e valor real.

| Nominal | Medidor LCR (Agilent U1731C) |
|---------------------|-----------------------------------------|
| 1,0 μH | 0,79 μH |
| 2,2 μH | 2,20 μH |
| 3,3 μH | 2,86 μH |
| 4,7 μH | 5,55 μH |
| 5,6 μH | 4,98 μH |
| 6,8 μH | 6,13 μH |
| 8,2 μH | 7,68 μH |
| 10,0 μH | 10,05 μH |
| 22,0 μH | 21,63 μH |
| 33,0 μH | 32,65 μH |
| 47,0 μH | 47,74 μH |
| 56,0 μH | 51,80 μH |
| 68,0 μH | 75,01 μH |
| 330,0 μH | 355,00 μH |
| 470,0 μH | 455,50 μH |
| 560,0 μH | 566,10 μH |
| 680,0 μH | 635,00 μH |

Tabela 4.1 – Valores nominais e os valores medidos pelo medidor LCR.

Com base nos valores encontrados acima, foi possível iniciar as medidas de indutância através do sistema de aquisição e análise dos dados. Para tal objetivo foi calculada a indutância magnética, usando a relação abaixo.

$$L = \frac{1}{i} \int (V - Ri) dt. \quad (4.1)$$

No entanto, foi verificado uma considerável sensibilidade ao ruído durante os experimentos, e tal característica também foi constatada na literatura científica (HASSANI *et al*, 2014), mostrando-se um caminho pouco confiável. Portanto, o método utilizado passou a ser o de atraso de fase, dado pela Equação 4.2.

$$L = \frac{R \tan \varphi}{2\pi f} \quad (4.2)$$

A análise dos sinais adquiridos, que correspondem ao sinal de entrada da tensão alternada e o sinal com atraso foi feita usando o método matemático de Mínimos Quadrados, que basicamente encontra a função polinomial mais adequada aos dados referentes aos sinais senoidais aplicados (uma função de sexta ordem). Em seguida são encontradas as raízes desse polinômio, as quais deveriam ser coincidentes, caso não houvesse o atraso entre os sinais.

Logo, através da diferença entre as raízes (D_r) presentes no intervalo de dados adquiridos foi possível encontrar o ângulo de fase usando uma regra de três simples. A frequência de aquisição foi de 100 kHz, ou seja, para cada cem pontos adquiridos tem-se um período completo para cada sinal.

$$\varphi = \frac{360^\circ}{100 \cdot D_r} \quad (4.3)$$

Em todos os casos foram obtidos duas raízes para cada sinal, ou seja, foram encontrados dois ângulos de fase φ_1 e φ_2 . O ângulo de fase usado foi a média aritmética dos dois ângulos encontrados.

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad (4.3)$$

A resistência interna de cada indutor foi encontrada através da utilização de um multímetro, gerando mais confiança na medida, ou seja, o programa desenvolvido no MatLab foi responsável apenas pela aquisição do termo relacionado ao atraso de fase.

A interpretação dos dados coletados foi realizada através do programa de matemática computacional MatLab. O algoritmo desenvolvido está no apêndice.

O algoritmo em um primeiro momento realiza apenas a leitura dos dados, em seguida são encontradas as duas funções mais adequadas ao sistema, uma para cada sinal adquirido. São calculadas as raízes, e então se separa as raízes de interesse, ou seja, as raízes presentes no intervalo de 100 pontos para cada varredura do sistema de aquisição. Através das raízes encontra-se os ângulos de fase que são essenciais para o cálculo de indutância.

Para cada medição realizada, a mesma se repete 200 vezes, com o objetivo de verificar a repetibilidade do sistema, os indutores foram inseridos no circuito da Figura 4.6 assumindo a posição do indutor L . O valor final foi a média aritmética desses 200 valores medidos. Os valores encontrados para cada um dos indutores convencionais são mostrados na Tabela 4.2. Devido a um atraso de varredura das entradas do sistema de aquisição, das quais são usadas as entradas AI0 e AI1, ocorre uma diferenciação nos valores de indutância medidos através do ângulo de defasagem com relação aos valores reais medidos pelo medidor LCR.

Através do gráfico da Figura 4.9 é possível observar que a variação entre os valores reais e os valores encontrados através da diferença de fase é linear.

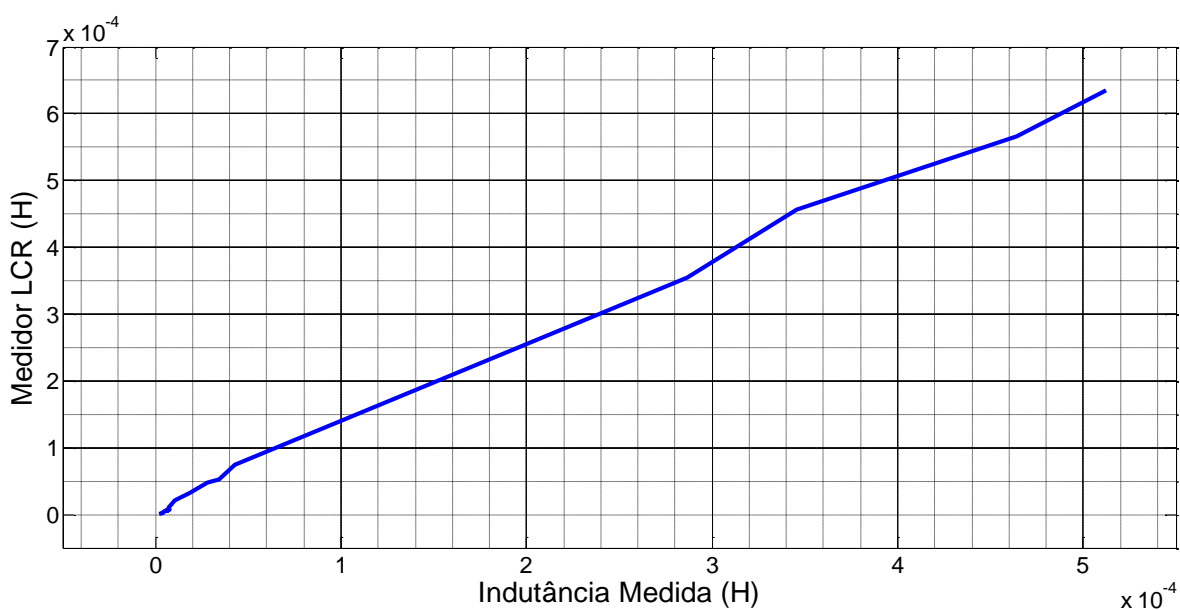


Figura 4.9 – Medidor LCR versus Medição Experimental.

Na Tabela 4.2 podem-se observar os valores encontrados para cada um dos indutores usados no desenvolvimento da metodologia. É observada uma diferenciação entre os valores do medidor LCR e os valores encontrados, mas como foi visto no gráfico da Figura 4.9 existe uma relação linear entres os valores.

| Nominal ($\times 10^{-6} H$) | Medidor LCR (Agilent U1731C) ($\times 10^{-6} H$) | $\frac{\tan \varphi}{2\pi f}$ ($\times 10^{-6} H/\Omega$) | $R_L (\Omega)$ | Indutância Medida ($\times 10^{-6} H$) |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------|
| 1,0 | 0,79 | 8,5885 | 0,25 | 2,1471 |
| 2,2 | 2,20 | 8,8065 | 0,45 | 3,9629 |
| 3,3 | 2,86 | 8,7475 | 0,44 | 3,8489 |
| 4,7 | 5,55 | 9,3617 | 0,57 | 5,3362 |
| 5,6 | 4,98 | 8,7343 | 0,76 | 6,6381 |
| 6,8 | 6,13 | 9,9614 | 0,55 | 5,4788 |
| 8,2 | 7,68 | 9,0654 | 0,86 | 7,7963 |
| 10,0 | 10,05 | 10,531 | 0,68 | 7,1608 |
| 22,0 | 21,63 | 15,449 | 0,68 | 10,506 |
| 33,0 | 32,65 | 18,886 | 0,98 | 18,508 |
| 47,0 | 47,74 | 22,669 | 1,23 | 27,883 |
| 56,0 | 51,80 | 25,362 | 1,34 | 33,985 |
| 68,0 | 75,01 | 33,740 | 1,27 | 42,850 |
| 330,0 | 355,00 | 57,992 | 4,94 | 286,48 |
| 470,0 | 455,50 | 43,141 | 8,01 | 345,56 |
| 560,0 | 566,10 | 52,858 | 8,78 | 464,09 |
| 680,0 | 635,00 | 64,710 | 7,92 | 512,50 |

Tabela 4.2 – Comparação entre os valores encontrados através do experimento e os valores medidos pelo LCR

Utilizando, novamente, o Método dos Mínimos Quadrados para gerar uma função de segundo grau que melhor descreve os dados do gráfico da Figura 4.9 e

chamando de L os valores corrigidos e L_M os valores medidos encontra-se a seguinte relação,

$$L = -296,4307 \times (L_M)^2 + 1,3747 \times (L_M) \quad (4.3)$$

Na Tabela 4.3 são colocados os valores encontrados de função descrita na Equação 4.3.

| Nominal ($\times 10^{-6} H$) | Medidor LCR (Agilent U1731C) ($\times 10^{-6} H$) | Indutância Encontrada ($\times 10^{-6} H$) |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1,0 | 0,79 | 2,950 |
| 2,2 | 2,20 | 5,443 |
| 3,3 | 2,86 | 5,287 |
| 4,7 | 5,55 | 7,327 |
| 5,6 | 4,98 | 9,112 |
| 6,8 | 6,13 | 7,523 |
| 8,2 | 7,68 | 10,700 |
| 10,0 | 10,05 | 9,829 |
| 22,0 | 21,63 | 14,410 |
| 33,0 | 32,65 | 25,341 |
| 47,0 | 47,74 | 38,100 |
| 56,0 | 51,80 | 46,377 |
| 68,0 | 75,01 | 58,362 |
| 330,0 | 355,00 | 369,496 |
| 470,0 | 455,50 | 439,644 |
| 560,0 | 566,10 | 574,139 |
| 680,0 | 635,00 | 626,674 |

Tabela 4.3 – Valores corrigidos usando a função linear encontrada.

No Figura 4.10 foi feito o comparativo entre a função encontrada através do Método dos Mínimos Quadrados e os dados coletados e analisados anteriormente, demonstrando bastante similaridade e nota-se também uma linearidade entre os valores coletados e os medidos usando medidor padrão LCR. Através dessa análise torna-se possível fazer a medição de outros indutores cujo valor é desconhecido, com maior confiança com relação ao valor encontrado.

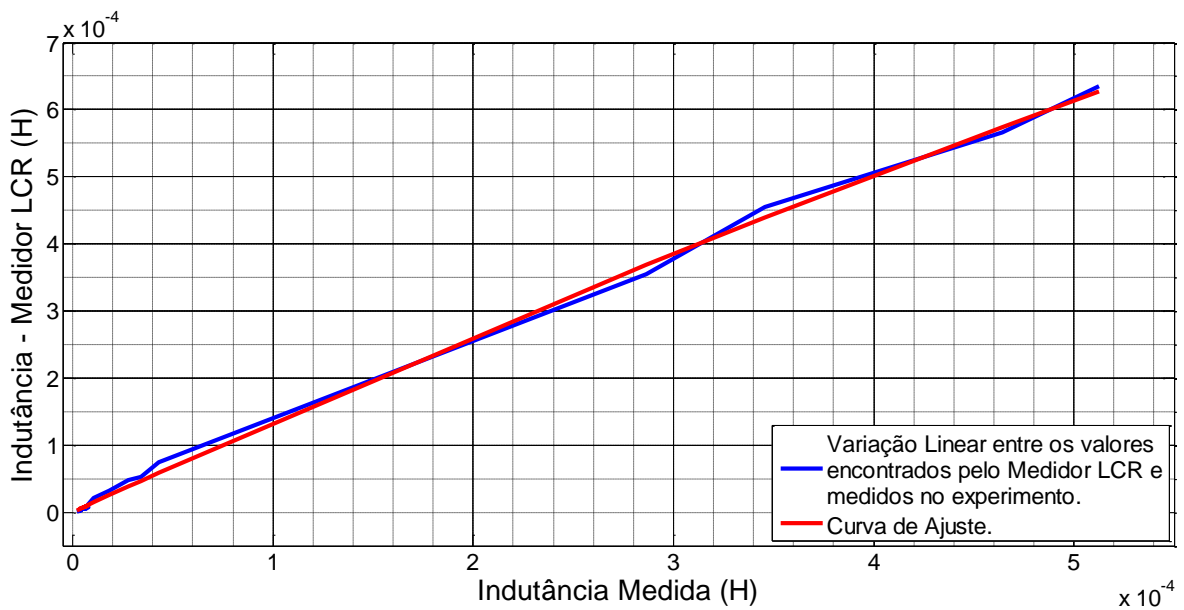


Figura 4.10 – Função de primeiro grau que melhor se adéqua aos dados.

Através dessa verificação é possível afirmar que a metodologia utilizada para a medição da indutância magnética é confiável, o que permite o avanço do estudo para indutores cujo valor ainda é desconhecido.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medições foram feitas de duas formas; em um primeiro momento, usando o circuito da Figura 4.6, foi aplicada um valor de corrente contínua, o qual se manteve fixo durante todo o experimento, o mesmo valeu para a tensão alternada aplicada, foi mantida constante para não ocorrer variações do fluxo magnético. Iniciando com a mola helicoidal em seu estado de repouso (65,00 mm), e em seguida a mola foi estendida aproximadamente 5,24 mm, até chegar num deslocamento de 85,94 mm, ou seja, a mola foi estendida 20,94 mm em passos de aproximadamente 5,24 mm. O experimento foi feito escolhendo cinco valores fixos de corrente contínua, os quais são: 0,50 A; 1,00 A, 1,50 A, 2,00 A e 2,50 A. Como pode ser visto na Tabela 5.1.

| Desloc. (mm) | Indutância (p/ Icc: 0,5A) ($\times 10^{-6} H$) | Indutância (p/ Icc: 1,0A) ($\times 10^{-6} H$) | Indutância (p/ Icc: 1,5A) ($\times 10^{-6} H$) | Indutância (p/ Icc: 2,0A) ($\times 10^{-6} H$) | Indutância (p/ Icc: 2,5A) ($\times 10^{-6} H$) |
|-----------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 65,00 | 133,12 | 140,59 | 179,25 | 171,65 | 171,27 |
| 70,24 | 131,50 | 139,71 | 186,41 | 171,54 | 170,34 |
| 75,48 | 130,56 | 138,43 | 172,51 | 171,11 | 169,60 |
| 80,72 | 130,31 | 135,26 | 171,88 | 170,13 | 169,39 |
| 85,94 | 129,38 | 134,56 | 171,05 | 169,30 | 165,43 |

Tabela 5.1 – Valores de Indutância para corrente contínua de 0,5 A; 1,0 A; 1,5 A; 2,0 A e 2,5 A.

Em todos os casos ocorreram variações no valor da indutância à medida que o comprimento do indutor era aumentado, havendo uma diminuição desses valores, o que era esperado pela teoria, já que a indutância é puramente geométrica e inversamente proporcional ao comprimento da mola helicoidal. No entanto, é possível observar que ocorreu também uma variação no valor de indutância de acordo com a corrente contínua que atravessava o indutor, demonstrando uma possível influência do material sobre a

mola, ou seja, com o aquecimento gerado pela corrente, e, conseqüentemente a transformação de fase, o que pode alterar a permeabilidade da LMF, variando também a indutância.

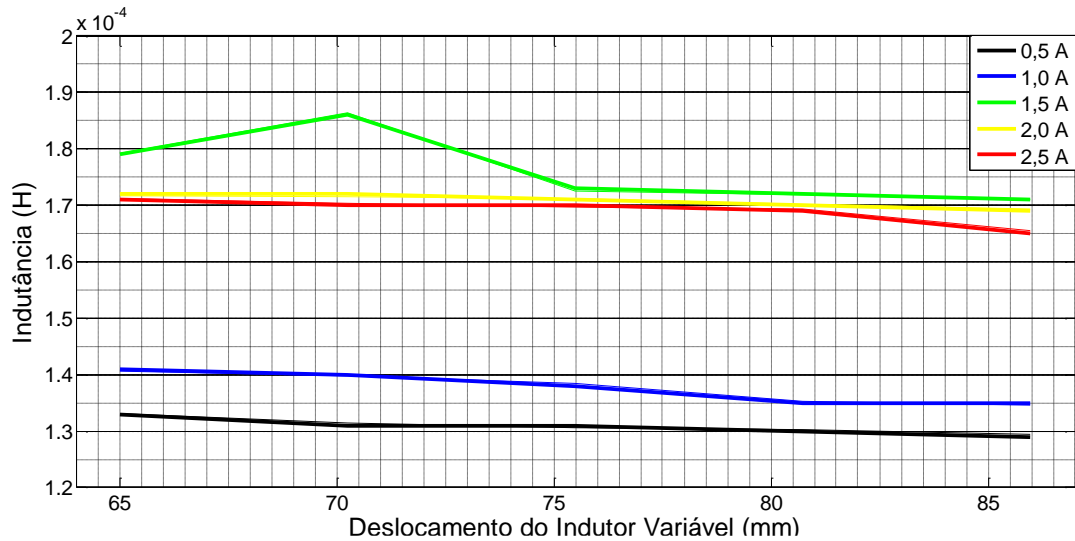


Figura 5.1 – Variação da Indutância após a mola helicoidal sofre deslocamento.

Após observação de tal aspecto foram realizados procedimentos para verificar tal dependência. Dessa vez foi mantido um deslocamento fixo enquanto a corrente era variada, mas para relacionar corrente e temperatura fez-se a medição apenas da temperatura com relação a corrente através de um termopar.

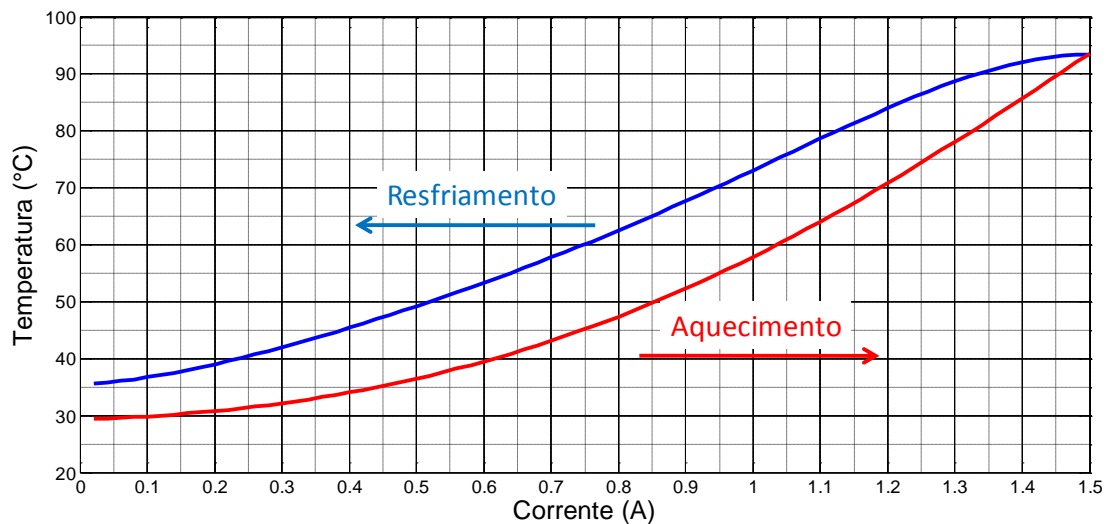


Figura 5.2 – Temperatura versus Corrente.

A escolha por fazer a medição da temperatura separadamente foi feita para evitar qualquer influência sobre a medição da indutância. Testes foram realizados para medição em conjunto e a influência foi detectada.

Em seguida foi encontrada a função que melhor realiza tal conversão entre temperatura e corrente, para o aquecimento:

$$-3.2271x^5 + 5.4410x^4 + 3.8457x^3 + 19.3056x^2 + 3.1908x + 29.3325$$

Para o resfriamento temos como função:

$$-28.4764x^5 + 88.5346x^4 - 105.8673x^3 + 77.4738x^2 + 6.0003x + 35.4310$$

Em paralelo foram realizadas medições da resistência elétrica da LMF. Através de tais medições foi possível traçar o gráfico da Figura 5.3.

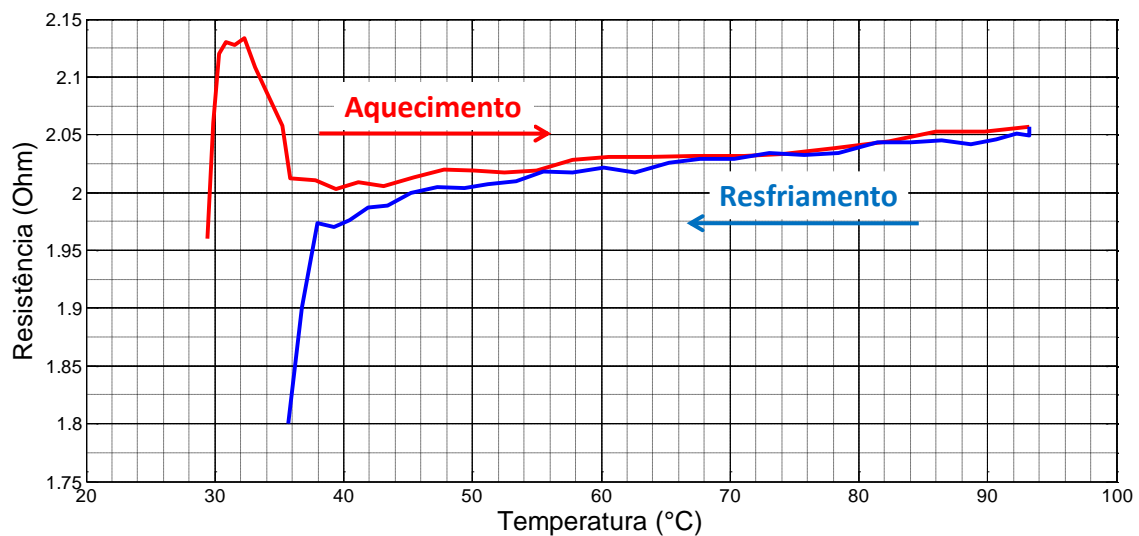


Figura 5.3 – Resistência elétrica da Liga com Memória de Forma.

Nota-se que ocorreu uma variação considerável da resistência elétrica nos primeiros instantes do aumento de temperatura, mas logo em seguida a resistência alcançou um comportamento estável, como é observado, também, na literatura (Brammajyosula et al, 2010).

Tabela com os valores de corrente elétrica, resistência elétrica e temperatura para a liga com memória de forma:

| Aquecimento | | | Resfriamento | | |
|--------------|--------------------------|------------------------------------|--------------|--------------------------|------------------------------------|
| Corrente (A) | Resistência (Ω) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | Corrente (A) | Resistência (Ω) | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) |
| 0,05 | 1,9600 | 29,438 | 0,05 | 1,8000 | 35,708 |
| 0,10 | 2,0600 | 29,832 | 0,10 | 1,9000 | 36,770 |
| 0,15 | 2,1200 | 30,310 | 0,15 | 1,9733 | 37,996 |
| 0,20 | 2,1300 | 30,876 | 0,20 | 1,9700 | 39,242 |
| 0,25 | 2,1280 | 31,530 | 0,25 | 1,9760 | 40,460 |
| 0,30 | 2,1333 | 32,270 | 0,30 | 1,9867 | 41,876 |
| 0,35 | 2,1086 | 33,132 | 0,35 | 1,9886 | 43,370 |
| 0,40 | 2,0850 | 34,068 | 0,40 | 2,0000 | 45,208 |
| 0,45 | 2,0578 | 35,206 | 0,45 | 2,0044 | 47,284 |
| 0,50 | 2,0120 | 35,830 | 0,50 | 2,0040 | 49,402 |
| 0,55 | 2,0109 | 37,792 | 0,55 | 2,0073 | 51,180 |
| 0,60 | 2,0033 | 39,408 | 0,60 | 2,0100 | 53,346 |
| 0,65 | 2,0092 | 41,110 | 0,65 | 2,0185 | 55,500 |
| 0,70 | 2,0057 | 43,086 | 0,70 | 2,0171 | 57,754 |
| 0,75 | 2,0133 | 45,442 | 0,75 | 2,0213 | 60,170 |
| 0,80 | 2,0200 | 47,782 | 0,80 | 2,0175 | 62,614 |
| 0,85 | 2,0188 | 50,140 | 0,85 | 2,0259 | 65,292 |
| 0,90 | 2,0178 | 52,512 | 0,90 | 2,0289 | 67,638 |
| 0,95 | 2,0189 | 54,968 | 0,95 | 2,0295 | 70,314 |
| 1,00 | 2,0280 | 57,790 | 1,00 | 2,0340 | 73,044 |
| 1,05 | 2,0305 | 60,598 | 1,05 | 2,0324 | 75,742 |
| 1,10 | 2,0309 | 63,756 | 1,10 | 2,0345 | 78,446 |
| 1,15 | 2,0313 | 67,246 | 1,15 | 2,0435 | 81,412 |
| 1,20 | 2,0317 | 71,048 | 1,20 | 2,0433 | 86,018 |
| 1,25 | 2,0336 | 74,072 | 1,25 | 2,0448 | 86,424 |
| 1,30 | 2,0384 | 78,080 | 1,30 | 2,0415 | 88,710 |
| 1,35 | 2,0444 | 82,362 | 1,35 | 2,0459 | 90,638 |
| 1,40 | 2,0529 | 85,952 | 1,40 | 2,0514 | 92,286 |
| 1,45 | 2,0524 | 89,770 | 1,45 | 2,0497 | 93,210 |
| 1,50 | 2,0573 | 93,260 | 1,50 | 2,0573 | 93,260 |

Tabela 5.2 – Valores medidos de resistência elétrica durante aquecimento e resfriamento de LMF através da aplicação de corrente.

Então, partiu-se para o cálculo da indutância, como pode-se observar nos gráficos seguintes. O indutor variável foi mantido em uma posição fixa (91,20 mm),

enquanto a corrente sofria variação em passos de 0,02 A até o limite de 1,50 A; em cada passo foi realizada a medição do termo relacionado ao atraso de fase causado pela indutância. As medições foram realizadas em três momentos diferentes utilizando os mesmos procedimentos, com o objetivo de verificar a concordância entre os resultados.

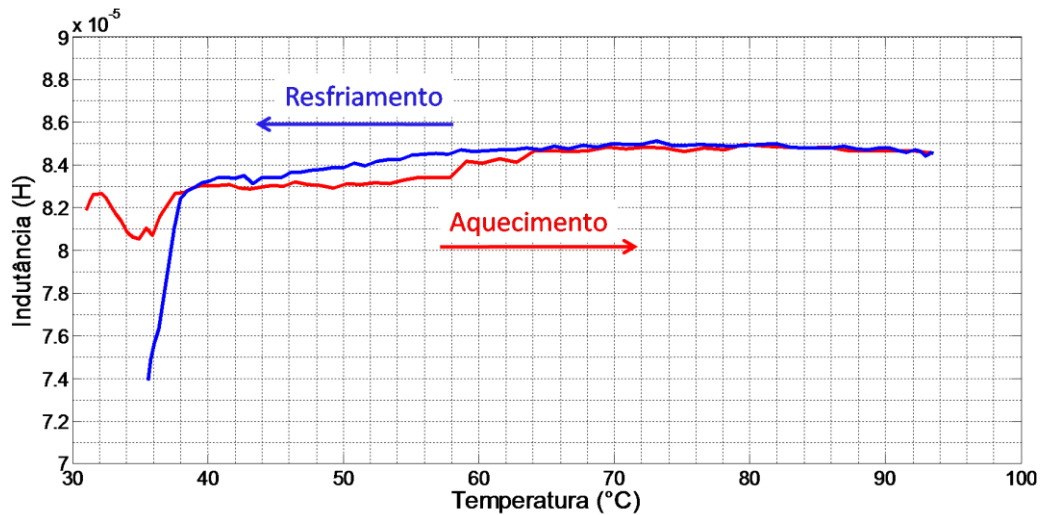


Figura 5.4 – Indutância medida durante experimento (Experimento 01).

. Inicialmente têm-se variações na indutância devido ao comportamento da resistência elétrica como é visto na Figura 5.3 e em seguida o valor de indutância tende à estabilidade à medida que a temperatura aumenta. Tal comportamento ocorre em todos os ciclos de aquecimento e resfriamento.

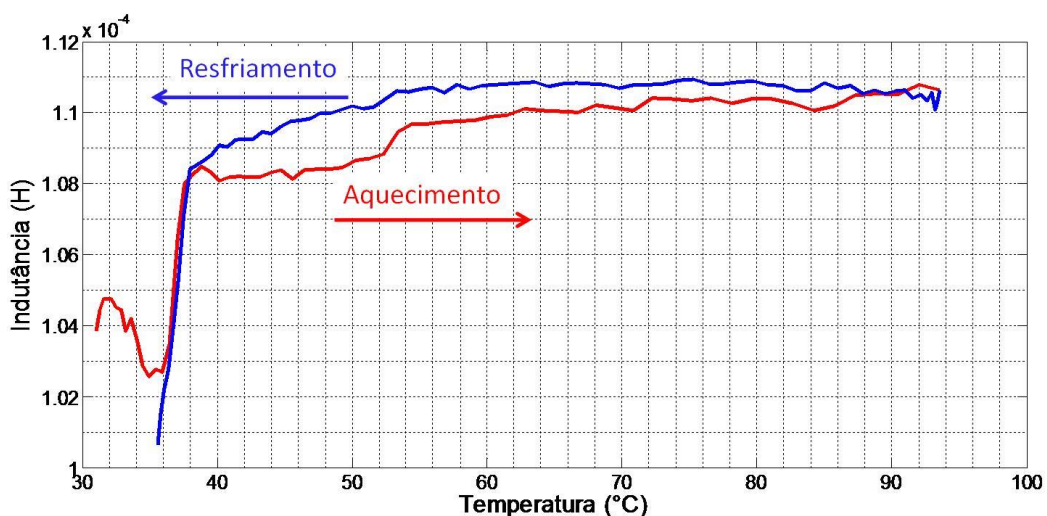


Figura 5.5 – Indutância medida durante experimento (Experimento 02).

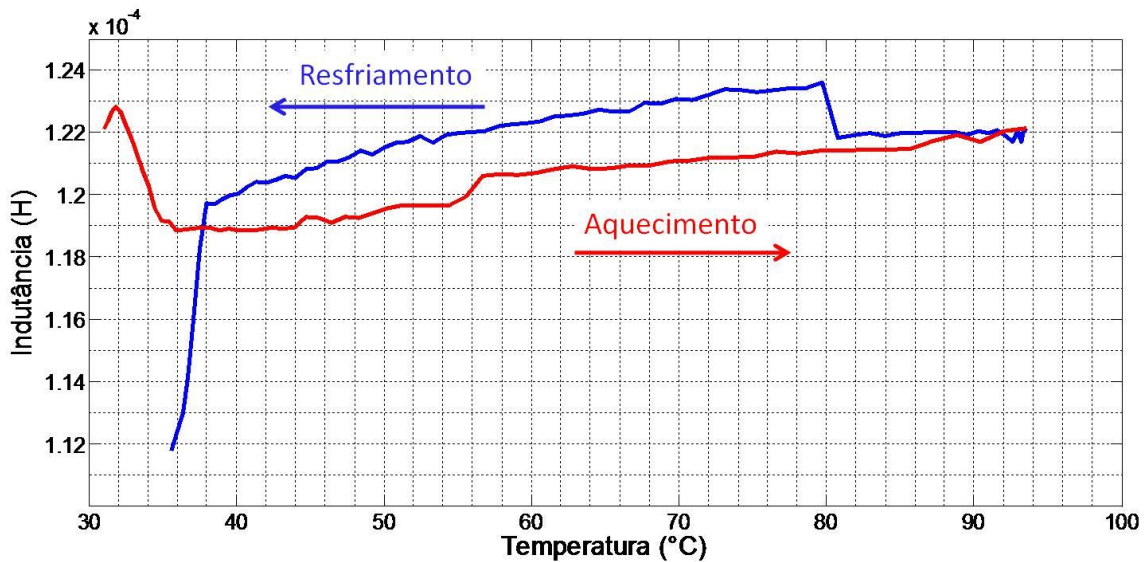


Figura 5.6 – Indutância medida durante experimento (Experimento 03).

No entanto, se observado apenas os dados relacionado com a fase, ou seja, valores encontrados com base no termo:

$$\frac{L}{R} = \frac{\tan \varphi}{2\pi f}$$

Nota-se um comportamento bastante peculiar nas proximidades dos valores de temperatura de transformação de fase do material, que podem ser vistas através do ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura, mostrada na Figura 5.7.

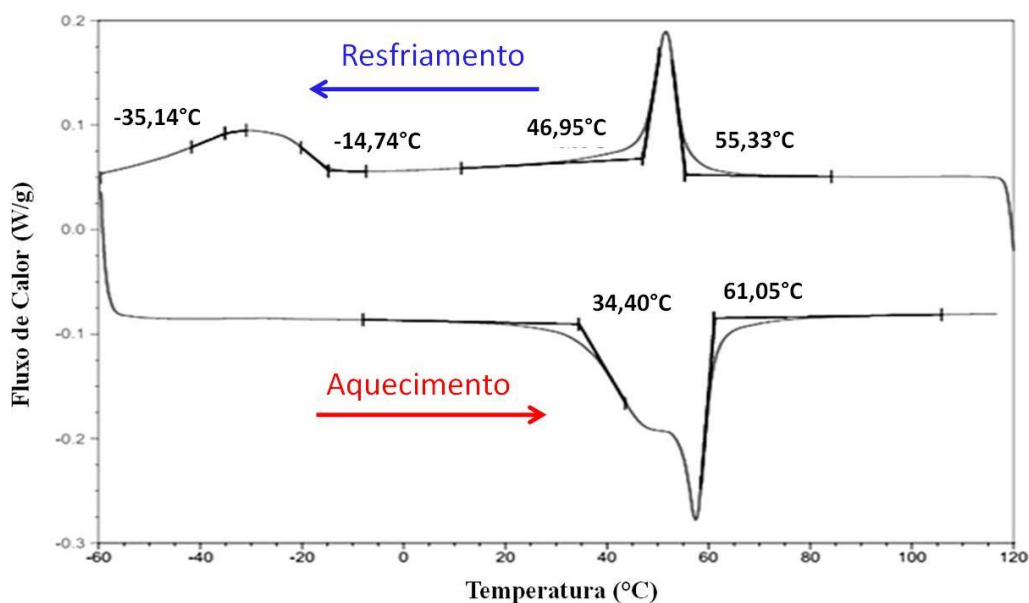


Figura 5.7 – Calorimetria Diferencial de Varredura.

Na Figura 5.7 se observa as temperaturas $A_i = 34,40\text{ }^\circ\text{C}$ e $A_f = 61,05\text{ }^\circ\text{C}$ relacionadas com a fase austenítica. As temperaturas relacionadas com a fase martensítica têm valores abaixo de zero, $M_i = -14,74\text{ }^\circ\text{C}$ e $M_f = -35,14\text{ }^\circ\text{C}$. Nos gráficos a seguir observa-se que ocorrem variações bruscas da indutância em valores próximos aos valores encontrados na Calorimetria Diferencial de Varredura, o que torna o resultado bastante interessante visto que o procedimento realizado é bastante simples.

Tais variações ocorrem apenas durante o aquecimento, já que as temperaturas contempladas durante o experimento estão na faixa das temperaturas de transformação para a fase austenita. Como as temperaturas de transformação para a fase martensita assumem valores abaixo de zero não foi possível a observação durante o experimento, o que reafirma a importância do resultado, dando mais ênfase ao fato de que tais variações observadas durante o processo de aquecimento estão realmente relacionadas às mudanças da estrutura cristalina do material.

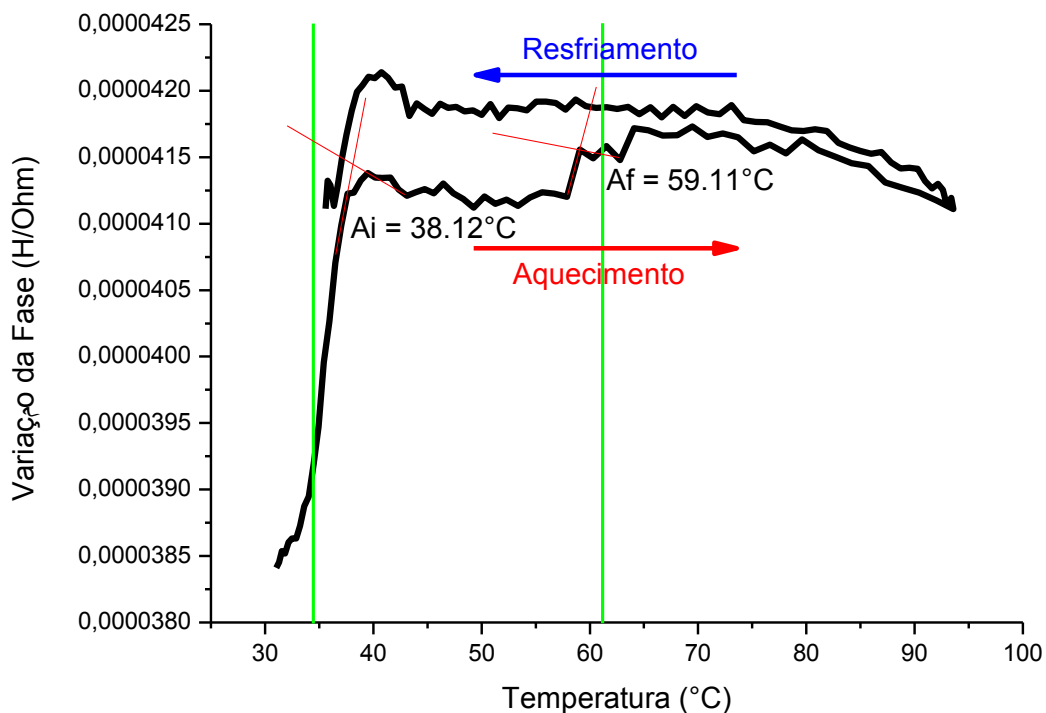


Figura 5.8 – Variações ocorridas no atraso de fase relacionado à indutância (Experimento 01).

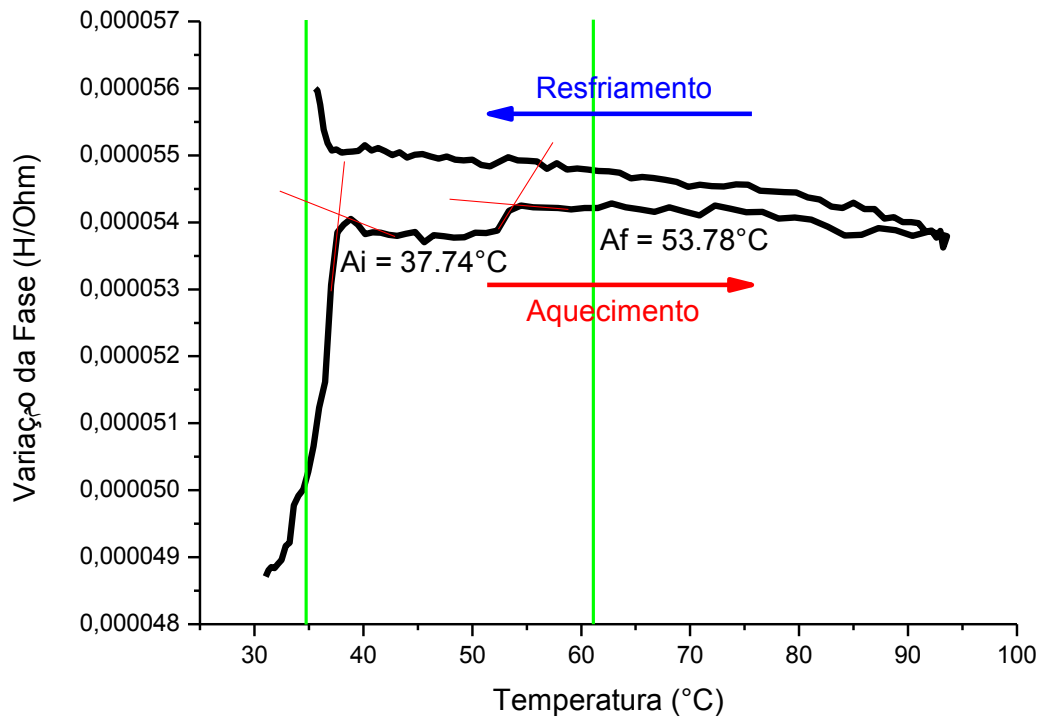


Figura 5.9 – Variações ocorridas no atraso de fase relacionado à indutância (Experimento 02).

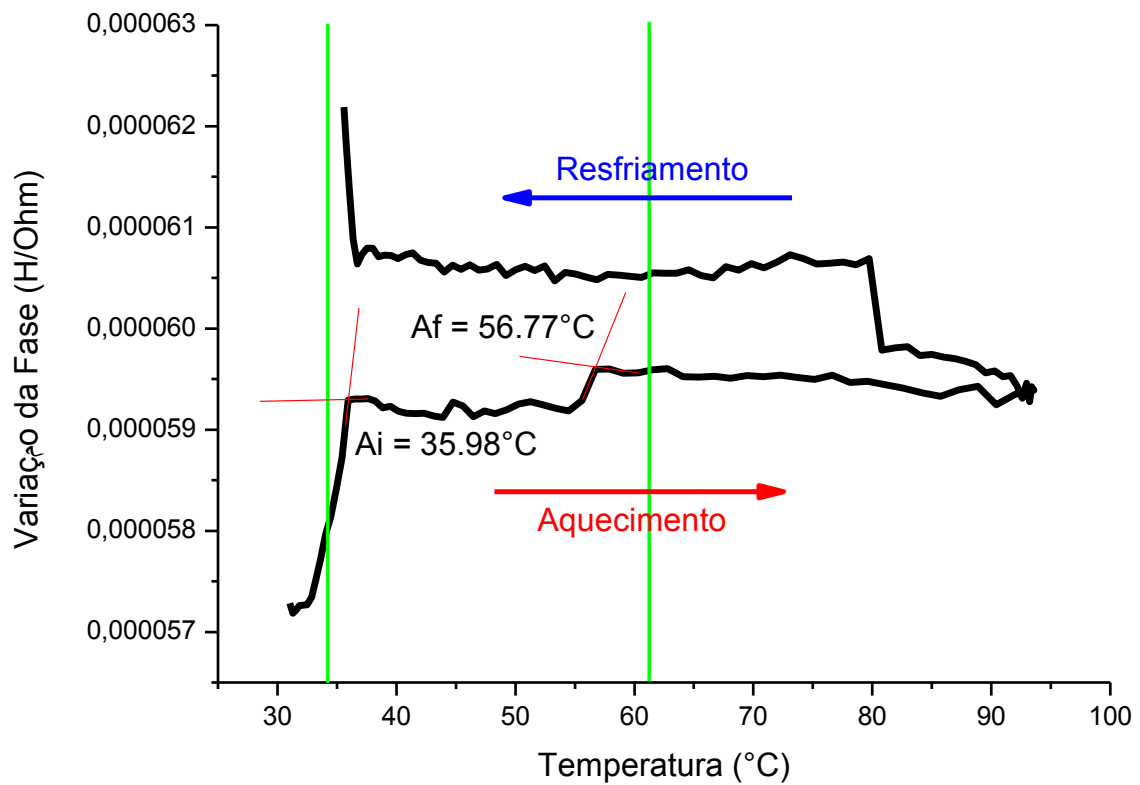


Figura 5.10 – Variações ocorridas no atraso de fase relacionado à indutância (Experimento 03).

As duas linhas verticais verdes mostram os valores reais encontrados na Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC, em inglês). Como pode ser visto nos gráficos mostrados, há variações de fase consideráveis nas proximidades dos valores de temperaturas associados às mudanças da estrutura cristalina do material. Tais variações devem estar relacionadas com as mudanças de fase do material, de martensita para austenita.

As diferenças entre os valores reais de temperatura e os encontrados através desse estudo podem estar relacionadas à associação feita entre a corrente elétrica e a temperatura do material naquele instante.

Capítulo 6

CONCLUSÕES FINAIS

Foi observado a influência dos parâmetros geométricos na indutância do indutor desenvolvido com liga com memória de forma de Níquel Titânio em regime dinâmico de aplicação de calor. Esse fato ocorreu, principalmente, devido a aproximação ou afastamento das espiras do indutor de NiTi com aplicação de calor.

O estudo desenvolvido conduziu à possibilidade de se usar a metodologia de variação de indutância em atuadores de liga com memória de forma de NiTi para determinar a posição e/ou o deslocamento do atuador indutor/mola helicoidal. Pois, a variação da indutância é dependente da variação de comprimento do indutor. Além disso, essa variação de indutância poderá ainda ser relacionada com a quantidade de força que o atuador estará desenvolvendo.

Nas aplicações em que for pertinente o uso de um atuador tipo indutor/mola helicoidal, a metodologia de medição de indutância permitirá que sensor e atuador estejam no mesmo componente, não sendo necessário a introdução de mais nenhum elemento para a medição de deslocamento e/ou força.

O procedimento de medição da variação de indutância se mostrou relativamente simples podendo ser implementado utilizando uma fonte de tensão alternada de baixa potência. Nesse caso, a fonte de tensão alternada, será usada apenas para medição da indutância e deverá ser desacoplada da fonte de corrente contínua que produz calor por efeito Joule no indutor.

Um parâmetro indispensável e relevante quando se trata das ligas com memória de forma é identificar as temperaturas de transformação de fase. A metodologia aplicada neste trabalho demonstrou a possibilidade de identificação das temperaturas de transformação de fase da liga de NiTi através da variação de indutância, nesse caso, em especial a liga do tipo atuador.

Capítulo 7

APÊNDICES

7.1 ATRASOS DE FASE GERADOS PELA INDUTÂNCIA

Primeira verificação do atraso de fase durante aquecimento da LMF:

| Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) |
|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|
| 0,02 | 29,40 | $3,900 \times 10^{-5}$ | 0,52 | 37,03 | $4,098 \times 10^{-5}$ | 1,02 | 59,08 | $4,156 \times 10^{-5}$ |
| 0,04 | 29,49 | $3,898 \times 10^{-5}$ | 0,54 | 37,61 | $4,123 \times 10^{-5}$ | 1,04 | 60,30 | $4,149 \times 10^{-5}$ |
| 0,06 | 29,59 | $3,879 \times 10^{-5}$ | 0,56 | 38,21 | $4,123 \times 10^{-5}$ | 1,06 | 61,54 | $4,158 \times 10^{-5}$ |
| 0,08 | 29,71 | $3,852 \times 10^{-5}$ | 0,58 | 38,83 | $4,133 \times 10^{-5}$ | 1,08 | 62,80 | $4,148 \times 10^{-5}$ |
| 0,10 | 29,85 | $3,840 \times 10^{-5}$ | 0,60 | 39,48 | $4,138 \times 10^{-5}$ | 1,10 | 64,09 | $4,172 \times 10^{-5}$ |
| 0,12 | 30,00 | $3,842 \times 10^{-5}$ | 0,62 | 40,16 | $4,135 \times 10^{-5}$ | 1,12 | 65,40 | $4,170 \times 10^{-5}$ |
| 0,14 | 30,17 | $3,840 \times 10^{-5}$ | 0,64 | 40,86 | $4,134 \times 10^{-5}$ | 1,14 | 66,73 | $4,166 \times 10^{-5}$ |
| 0,16 | 30,36 | $3,845 \times 10^{-5}$ | 0,66 | 41,58 | $4,135 \times 10^{-5}$ | 1,16 | 68,09 | $4,166 \times 10^{-5}$ |
| 0,18 | 30,56 | $3,842 \times 10^{-5}$ | 0,68 | 42,33 | $4,126 \times 10^{-5}$ | 1,18 | 69,46 | $4,173 \times 10^{-5}$ |
| 0,20 | 30,78 | $3,840 \times 10^{-5}$ | 0,70 | 43,11 | $4,121 \times 10^{-5}$ | 1,20 | 70,86 | $4,165 \times 10^{-5}$ |
| 0,22 | 31,02 | $3,841 \times 10^{-5}$ | 0,72 | 43,91 | $4,124 \times 10^{-5}$ | 1,22 | 72,27 | $4,168 \times 10^{-5}$ |
| 0,24 | 31,28 | $3,845 \times 10^{-5}$ | 0,74 | 44,74 | $4,126 \times 10^{-5}$ | 1,24 | 73,71 | $4,165 \times 10^{-5}$ |
| 0,26 | 31,56 | $3,854 \times 10^{-5}$ | 0,76 | 45,59 | $4,123 \times 10^{-5}$ | 1,26 | 75,16 | $4,155 \times 10^{-5}$ |
| 0,28 | 31,85 | $3,852 \times 10^{-5}$ | 0,78 | 46,47 | $4,130 \times 10^{-5}$ | 1,28 | 76,63 | $4,159 \times 10^{-5}$ |
| 0,30 | 32,17 | $3,860 \times 10^{-5}$ | 0,80 | 47,38 | $4,123 \times 10^{-5}$ | 1,30 | 78,11 | $4,153 \times 10^{-5}$ |
| 0,32 | 32,50 | $3,863 \times 10^{-5}$ | 0,82 | 48,31 | $4,119 \times 10^{-5}$ | 1,32 | 79,61 | $4,163 \times 10^{-5}$ |
| 0,34 | 32,86 | $3,863 \times 10^{-5}$ | 0,84 | 49,27 | $4,112 \times 10^{-5}$ | 1,34 | 81,13 | $4,155 \times 10^{-5}$ |
| 0,36 | 33,23 | $3,873 \times 10^{-5}$ | 0,86 | 50,26 | $4,120 \times 10^{-5}$ | 1,36 | 82,65 | $4,150 \times 10^{-5}$ |
| 0,38 | 33,63 | $3,887 \times 10^{-5}$ | 0,88 | 51,27 | $4,115 \times 10^{-5}$ | 1,38 | 84,19 | $4,145 \times 10^{-5}$ |
| 0,40 | 34,05 | $3,895 \times 10^{-5}$ | 0,90 | 52,31 | $4,118 \times 10^{-5}$ | 1,40 | 85,74 | $4,143 \times 10^{-5}$ |
| 0,42 | 34,49 | $3,919 \times 10^{-5}$ | 0,92 | 53,37 | $4,113 \times 10^{-5}$ | 1,42 | 87,29 | $4,131 \times 10^{-5}$ |
| 0,44 | 34,95 | $3,947 \times 10^{-5}$ | 0,94 | 54,46 | $4,120 \times 10^{-5}$ | 1,44 | 88,86 | $4,127 \times 10^{-5}$ |
| 0,46 | 35,44 | $3,996 \times 10^{-5}$ | 0,96 | 55,58 | $4,124 \times 10^{-5}$ | 1,46 | 90,43 | $4,123 \times 10^{-5}$ |
| 0,48 | 35,94 | $4,026 \times 10^{-5}$ | 0,98 | 56,72 | $4,123 \times 10^{-5}$ | 1,48 | 92,00 | $4,118 \times 10^{-5}$ |
| 0,50 | 36,47 | $4,070 \times 10^{-5}$ | 1,00 | 57,89 | $4,120 \times 10^{-5}$ | 1,50 | 93,57 | $4,111 \times 10^{-5}$ |

Tabela 7.1 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante aquecimento da LMF por corrente.

Primeira verificação do atraso de fase durante resfriamento da LMF:

| Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) |
|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|
| 1,50 | 93,41 | 4,111x10 ⁻⁵ | 1,00 | 73,10 | 4,189x10 ⁻⁵ | 0,50 | 49,2097 | 4,185x10 ⁻⁵ |
| 1,48 | 93,38 | 4,119x10 ⁻⁵ | 0,98 | 72,00 | 4,182x10 ⁻⁵ | 0,48 | 48,4272 | 4,184x10 ⁻⁵ |
| 1,46 | 93,23 | 4,117x10 ⁻⁵ | 0,96 | 70,90 | 4,184x10 ⁻⁵ | 0,46 | 47,6575 | 4,188x10 ⁻⁵ |
| 1,44 | 92,97 | 4,114x10 ⁻⁵ | 0,94 | 69,82 | 4,188x10 ⁻⁵ | 0,44 | 46,9006 | 4,187x10 ⁻⁵ |
| 1,42 | 92,60 | 4,125x10 ⁻⁵ | 0,92 | 68,74 | 4,181x10 ⁻⁵ | 0,42 | 46,1568 | 4,190x10 ⁻⁵ |
| 1,40 | 92,14 | 4,130x10 ⁻⁵ | 0,90 | 67,68 | 4,188x10 ⁻⁵ | 0,40 | 45,4263 | 4,183x10 ⁻⁵ |
| 1,38 | 91,60 | 4,127x10 ⁻⁵ | 0,88 | 66,63 | 4,180x10 ⁻⁵ | 0,38 | 44,7096 | 4,186x10 ⁻⁵ |
| 1,36 | 90,97 | 4,132x10 ⁻⁵ | 0,86 | 65,59 | 4,188x10 ⁻⁵ | 0,36 | 44,0072 | 4,190x10 ⁻⁵ |
| 1,34 | 90,28 | 4,141x10 ⁻⁵ | 0,84 | 64,56 | 4,182x10 ⁻⁵ | 0,34 | 43,3198 | 4,181x10 ⁻⁵ |
| 1,32 | 89,52 | 4,142x10 ⁻⁵ | 0,82 | 63,54 | 4,188x10 ⁻⁵ | 0,32 | 42,6481 | 4,203x10 ⁻⁵ |
| 1,30 | 88,70 | 4,142x10 ⁻⁵ | 0,80 | 62,54 | 4,186x10 ⁻⁵ | 0,30 | 41,9932 | 4,202x10 ⁻⁵ |
| 1,28 | 87,84 | 4,146x10 ⁻⁵ | 0,78 | 61,56 | 4,188x10 ⁻⁵ | 0,28 | 41,3562 | 4,210x10 ⁻⁵ |
| 1,26 | 86,93 | 4,154x10 ⁻⁵ | 0,76 | 60,58 | 4,187x10 ⁻⁵ | 0,26 | 40,7383 | 4,214x10 ⁻⁵ |
| 1,24 | 85,98 | 4,153x10 ⁻⁵ | 0,74 | 59,63 | 4,188x10 ⁻⁵ | 0,24 | 40,1411 | 4,209x10 ⁻⁵ |
| 1,22 | 84,99 | 4,155x10 ⁻⁵ | 0,72 | 58,68 | 4,193x10 ⁻⁵ | 0,22 | 39,5662 | 4,210x10 ⁻⁵ |
| 1,20 | 83,98 | 4,157x10 ⁻⁵ | 0,70 | 57,75 | 4,186x10 ⁻⁵ | 0,20 | 39,0156 | 4,204x10 ⁻⁵ |
| 1,18 | 82,94 | 4,161x10 ⁻⁵ | 0,68 | 56,84 | 4,191x10 ⁻⁵ | 0,18 | 38,4913 | 4,199x10 ⁻⁵ |
| 1,16 | 81,89 | 4,170x10 ⁻⁵ | 0,66 | 55,94 | 4,192x10 ⁻⁵ | 0,16 | 37,9958 | 4,185x10 ⁻⁵ |
| 1,14 | 80,81 | 4,171x10 ⁻⁵ | 0,64 | 55,05 | 4,192x10 ⁻⁵ | 0,14 | 37,5315 | 4,167x10 ⁻⁵ |
| 1,12 | 79,72 | 4,170x10 ⁻⁵ | 0,62 | 54,17 | 4,185x10 ⁻⁵ | 0,12 | 37,1013 | 4,149x10 ⁻⁵ |
| 1,10 | 78,63 | 4,170x10 ⁻⁵ | 0,60 | 53,31 | 4,187x10 ⁻⁵ | 0,10 | 36,7084 | 4,129x10 ⁻⁵ |
| 1,08 | 77,52 | 4,173x10 ⁻⁵ | 0,58 | 52,47 | 4,187x10 ⁻⁵ | 0,08 | 36,3562 | 4,113x10 ⁻⁵ |
| 1,06 | 76,42 | 4,176x10 ⁻⁵ | 0,56 | 51,63 | 4,179x10 ⁻⁵ | 0,06 | 36,0482 | 4,129x10 ⁻⁵ |
| 1,04 | 75,31 | 4,177x10 ⁻⁵ | 0,54 | 50,81 | 4,190x10 ⁻⁵ | 0,04 | 35,7884 | 4,132x10 ⁻⁵ |
| 1,02 | 74,20 | 4,178x10 ⁻⁵ | 0,52 | 50,00 | 4,182x10 ⁻⁵ | 0,02 | 35,5811 | 4,111x10 ⁻⁵ |

Tabela 7.2 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante resfriamento da LMF.

Segunda verificação do atraso de fase durante aquecimento da LMF:

| Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) |
|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|
| 0,02 | 29,40 | 4,016x10 ⁻⁵ | 0,52 | 37,03 | 5,307x10 ⁻⁵ | 1,02 | 59,08 | 5,420x10 ⁻⁵ |
| 0,04 | 29,49 | 4,032x10 ⁻⁵ | 0,54 | 37,61 | 5,385x10 ⁻⁵ | 1,04 | 60,30 | 5,421x10 ⁻⁵ |
| 0,06 | 29,59 | 4,022x10 ⁻⁵ | 0,56 | 38,21 | 5,397x10 ⁻⁵ | 1,06 | 61,54 | 5,421x10 ⁻⁵ |
| 0,08 | 29,71 | 3,992x10 ⁻⁵ | 0,58 | 38,83 | 5,405x10 ⁻⁵ | 1,08 | 62,80 | 5,428x10 ⁻⁵ |
| 0,10 | 29,85 | 3,987x10 ⁻⁵ | 0,60 | 39,48 | 5,397x10 ⁻⁵ | 1,10 | 64,09 | 5,422x10 ⁻⁵ |
| 0,12 | 30,00 | 3,988x10 ⁻⁵ | 0,62 | 40,16 | 5,383x10 ⁻⁵ | 1,12 | 65,40 | 5,419x10 ⁻⁵ |
| 0,14 | 30,17 | 3,988x10 ⁻⁵ | 0,64 | 40,86 | 5,385x10 ⁻⁵ | 1,14 | 66,73 | 5,415x10 ⁻⁵ |
| 0,16 | 30,36 | 3,999x10 ⁻⁵ | 0,66 | 41,58 | 5,385x10 ⁻⁵ | 1,16 | 68,09 | 5,423x10 ⁻⁵ |
| 0,18 | 30,56 | 3,999x10 ⁻⁵ | 0,68 | 42,33 | 5,381x10 ⁻⁵ | 1,18 | 69,46 | 5,416x10 ⁻⁵ |
| 0,20 | 30,78 | 4,004x10 ⁻⁵ | 0,70 | 43,11 | 5,380x10 ⁻⁵ | 1,20 | 70,86 | 5,410x10 ⁻⁵ |
| 0,22 | 31,02 | 4,871x10 ⁻⁵ | 0,72 | 43,91 | 5,383x10 ⁻⁵ | 1,22 | 72,27 | 5,425x10 ⁻⁵ |
| 0,24 | 31,28 | 4,880x10 ⁻⁵ | 0,74 | 44,74 | 5,385x10 ⁻⁵ | 1,24 | 73,71 | 5,420x10 ⁻⁵ |
| 0,26 | 31,56 | 4,886x10 ⁻⁵ | 0,76 | 45,59 | 5,371x10 ⁻⁵ | 1,26 | 75,16 | 5,415x10 ⁻⁵ |
| 0,28 | 31,85 | 4,884x10 ⁻⁵ | 0,78 | 46,47 | 5,381x10 ⁻⁵ | 1,28 | 76,63 | 5,416x10 ⁻⁵ |
| 0,30 | 32,17 | 4,890x10 ⁻⁵ | 0,80 | 47,38 | 5,379x10 ⁻⁵ | 1,30 | 78,11 | 5,406x10 ⁻⁵ |
| 0,32 | 32,50 | 4,896x10 ⁻⁵ | 0,82 | 48,31 | 5,377x10 ⁻⁵ | 1,32 | 79,61 | 5,407x10 ⁻⁵ |
| 0,34 | 32,86 | 4,917x10 ⁻⁵ | 0,84 | 49,27 | 5,378x10 ⁻⁵ | 1,34 | 81,13 | 5,404x10 ⁻⁵ |
| 0,36 | 33,23 | 4,922x10 ⁻⁵ | 0,86 | 50,26 | 5,384x10 ⁻⁵ | 1,36 | 82,65 | 5,394x10 ⁻⁵ |
| 0,38 | 33,63 | 4,978x10 ⁻⁵ | 0,88 | 51,27 | 5,384x10 ⁻⁵ | 1,38 | 84,19 | 5,380x10 ⁻⁵ |
| 0,40 | 34,05 | 4,992x10 ⁻⁵ | 0,90 | 52,31 | 5,388x10 ⁻⁵ | 1,40 | 85,74 | 5,381x10 ⁻⁵ |
| 0,42 | 34,49 | 5,001x10 ⁻⁵ | 0,92 | 53,37 | 5,417x10 ⁻⁵ | 1,42 | 87,29 | 5,391x10 ⁻⁵ |
| 0,44 | 34,95 | 5,027x10 ⁻⁵ | 0,94 | 54,46 | 5,425x10 ⁻⁵ | 1,44 | 88,86 | 5,388x10 ⁻⁵ |
| 0,46 | 35,44 | 5,066x10 ⁻⁵ | 0,96 | 55,58 | 5,422x10 ⁻⁵ | 1,46 | 90,43 | 5,380x10 ⁻⁵ |
| 0,48 | 35,94 | 5,124x10 ⁻⁵ | 0,98 | 56,72 | 5,422x10 ⁻⁵ | 1,48 | 92,00 | 5,386x10 ⁻⁵ |
| 0,50 | 36,47 | 5,162x10 ⁻⁵ | 1,00 | 57,89 | 5,421x10 ⁻⁵ | 1,50 | 93,57 | 5,379x10 ⁻⁵ |

Tabela 7.3 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante aquecimento da LMF por corrente.

Segunda verificação do atraso de fase durante resfriamento da LMF:

| Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) |
|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|
| 1,50 | 93,41 | 5,379x10 ⁻⁵ | 1,00 | 73,10 | 5,454x10 ⁻⁵ | 0,50 | 49,2097 | 5,492x10 ⁻⁵ |
| 1,48 | 93,38 | 5,370x10 ⁻⁵ | 0,98 | 72,00 | 5,454x10 ⁻⁵ | 0,48 | 48,4272 | 5,493x10 ⁻⁵ |
| 1,46 | 93,23 | 5,362x10 ⁻⁵ | 0,96 | 70,90 | 5,456x10 ⁻⁵ | 0,46 | 47,6575 | 5,498x10 ⁻⁵ |
| 1,44 | 92,97 | 5,387x10 ⁻⁵ | 0,94 | 69,82 | 5,453x10 ⁻⁵ | 0,44 | 46,9006 | 5,495x10 ⁻⁵ |
| 1,42 | 92,60 | 5,377x10 ⁻⁵ | 0,92 | 68,74 | 5,460x10 ⁻⁵ | 0,42 | 46,1568 | 5,498x10 ⁻⁵ |
| 1,40 | 92,14 | 5,388x10 ⁻⁵ | 0,90 | 67,68 | 5,464x10 ⁻⁵ | 0,40 | 45,4263 | 5,502x10 ⁻⁵ |
| 1,38 | 91,60 | 5,386x10 ⁻⁵ | 0,88 | 66,63 | 5,466x10 ⁻⁵ | 0,38 | 44,7096 | 5,501x10 ⁻⁵ |
| 1,36 | 90,97 | 5,399x10 ⁻⁵ | 0,86 | 65,59 | 5,468x10 ⁻⁵ | 0,36 | 44,0072 | 5,497x10 ⁻⁵ |
| 1,34 | 90,28 | 5,400x10 ⁻⁵ | 0,84 | 64,56 | 5,466x10 ⁻⁵ | 0,34 | 43,3198 | 5,505x10 ⁻⁵ |
| 1,32 | 89,52 | 5,400x10 ⁻⁵ | 0,82 | 63,54 | 5,474x10 ⁻⁵ | 0,32 | 42,6481 | 5,500x10 ⁻⁵ |
| 1,30 | 88,70 | 5,407x10 ⁻⁵ | 0,80 | 62,54 | 5,476x10 ⁻⁵ | 0,30 | 41,9932 | 5,506x10 ⁻⁵ |
| 1,28 | 87,84 | 5,405x10 ⁻⁵ | 0,78 | 61,56 | 5,477x10 ⁻⁵ | 0,28 | 41,3562 | 5,511x10 ⁻⁵ |
| 1,26 | 86,93 | 5,420x10 ⁻⁵ | 0,76 | 60,58 | 5,479x10 ⁻⁵ | 0,26 | 40,7383 | 5,507x10 ⁻⁵ |
| 1,24 | 85,98 | 5,420x10 ⁻⁵ | 0,74 | 59,63 | 5,480x10 ⁻⁵ | 0,24 | 40,1411 | 5,515x10 ⁻⁵ |
| 1,22 | 84,99 | 5,429x10 ⁻⁵ | 0,72 | 58,68 | 5,479x10 ⁻⁵ | 0,22 | 39,5662 | 5,507x10 ⁻⁵ |
| 1,20 | 83,98 | 5,421x10 ⁻⁵ | 0,70 | 57,75 | 5,488x10 ⁻⁵ | 0,20 | 39,0156 | 5,506x10 ⁻⁵ |
| 1,18 | 82,94 | 5,424x10 ⁻⁵ | 0,68 | 56,84 | 5,480x10 ⁻⁵ | 0,18 | 38,4913 | 5,505x10 ⁻⁵ |
| 1,16 | 81,89 | 5,434x10 ⁻⁵ | 0,66 | 55,94 | 5,491x10 ⁻⁵ | 0,16 | 37,9958 | 5,504x10 ⁻⁵ |
| 1,14 | 80,81 | 5,437x10 ⁻⁵ | 0,64 | 55,05 | 5,492x10 ⁻⁵ | 0,14 | 37,5315 | 5,509x10 ⁻⁵ |
| 1,12 | 79,72 | 5,445x10 ⁻⁵ | 0,62 | 54,17 | 5,492x10 ⁻⁵ | 0,12 | 37,1013 | 5,507x10 ⁻⁵ |
| 1,10 | 78,63 | 5,445x10 ⁻⁵ | 0,60 | 53,31 | 5,497x10 ⁻⁵ | 0,10 | 36,7084 | 5,519x10 ⁻⁵ |
| 1,08 | 77,52 | 5,446x10 ⁻⁵ | 0,58 | 52,47 | 5,491x10 ⁻⁵ | 0,08 | 36,3562 | 5,538x10 ⁻⁵ |
| 1,06 | 76,42 | 5,447x10 ⁻⁵ | 0,56 | 51,63 | 5,483x10 ⁻⁵ | 0,06 | 36,0482 | 5,576x10 ⁻⁵ |
| 1,04 | 75,31 | 5,456x10 ⁻⁵ | 0,54 | 50,81 | 5,485x10 ⁻⁵ | 0,04 | 35,7884 | 5,597x10 ⁻⁵ |
| 1,02 | 74,20 | 5,457x10 ⁻⁵ | 0,52 | 50,00 | 5,493x10 ⁻⁵ | 0,02 | 35,5811 | 5,600x10 ⁻⁵ |

Tabela 7.4 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante resfriamento da LMF.

Terceira verificação do atraso de fase durante aquecimento da LMF:

| Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) |
|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|
| 0,02 | 29,40 | 5,932x10 ⁻⁵ | 0,52 | 37,03 | 5,930x10 ⁻⁵ | 1,02 | 59,08 | 5,956x10 ⁻⁵ |
| 0,04 | 29,49 | 5,890x10 ⁻⁵ | 0,54 | 37,61 | 5,931x10 ⁻⁵ | 1,04 | 60,30 | 5,956x10 ⁻⁵ |
| 0,06 | 29,59 | 5,831x10 ⁻⁵ | 0,56 | 38,21 | 5,928x10 ⁻⁵ | 1,06 | 61,54 | 5,959x10 ⁻⁵ |
| 0,08 | 29,71 | 5,772x10 ⁻⁵ | 0,58 | 38,83 | 5,922x10 ⁻⁵ | 1,08 | 62,80 | 5,960x10 ⁻⁵ |
| 0,10 | 29,85 | 5,740x10 ⁻⁵ | 0,60 | 39,48 | 5,923x10 ⁻⁵ | 1,10 | 64,09 | 5,952x10 ⁻⁵ |
| 0,12 | 30,00 | 5,738x10 ⁻⁵ | 0,62 | 40,16 | 5,918x10 ⁻⁵ | 1,12 | 65,40 | 5,952x10 ⁻⁵ |
| 0,14 | 30,17 | 5,738x10 ⁻⁵ | 0,64 | 40,86 | 5,916x10 ⁻⁵ | 1,14 | 66,73 | 5,953x10 ⁻⁵ |
| 0,16 | 30,36 | 5,731x10 ⁻⁵ | 0,66 | 41,58 | 5,916x10 ⁻⁵ | 1,16 | 68,09 | 5,951x10 ⁻⁵ |
| 0,18 | 30,56 | 5,729x10 ⁻⁵ | 0,68 | 42,33 | 5,916x10 ⁻⁵ | 1,18 | 69,46 | 5,953x10 ⁻⁵ |
| 0,20 | 30,78 | 5,728x10 ⁻⁵ | 0,70 | 43,11 | 5,914x10 ⁻⁵ | 1,20 | 70,86 | 5,952x10 ⁻⁵ |
| 0,22 | 31,02 | 5,728x10 ⁻⁵ | 0,72 | 43,91 | 5,912x10 ⁻⁵ | 1,22 | 72,27 | 5,954x10 ⁻⁵ |
| 0,24 | 31,28 | 5,718x10 ⁻⁵ | 0,74 | 44,74 | 5,927x10 ⁻⁵ | 1,24 | 73,71 | 5,951x10 ⁻⁵ |
| 0,26 | 31,56 | 5,722x10 ⁻⁵ | 0,76 | 45,59 | 5,923x10 ⁻⁵ | 1,26 | 75,16 | 5,950x10 ⁻⁵ |
| 0,28 | 31,85 | 5,726x10 ⁻⁵ | 0,78 | 46,47 | 5,913x10 ⁻⁵ | 1,28 | 76,63 | 5,954x10 ⁻⁵ |
| 0,30 | 32,17 | 5,726x10 ⁻⁵ | 0,80 | 47,38 | 5,919x10 ⁻⁵ | 1,30 | 78,11 | 5,947x10 ⁻⁵ |
| 0,32 | 32,50 | 5,727x10 ⁻⁵ | 0,82 | 48,31 | 5,916x10 ⁻⁵ | 1,32 | 79,61 | 5,948x10 ⁻⁵ |
| 0,34 | 32,86 | 5,734x10 ⁻⁵ | 0,84 | 49,27 | 5,920x10 ⁻⁵ | 1,34 | 81,13 | 5,944x10 ⁻⁵ |
| 0,36 | 33,23 | 5,752x10 ⁻⁵ | 0,86 | 50,26 | 5,925x10 ⁻⁵ | 1,36 | 82,65 | 5,941x10 ⁻⁵ |
| 0,38 | 33,63 | 5,772x10 ⁻⁵ | 0,88 | 51,27 | 5,928x10 ⁻⁵ | 1,38 | 84,19 | 5,937x10 ⁻⁵ |
| 0,40 | 34,05 | 5,796x10 ⁻⁵ | 0,90 | 52,31 | 5,925x10 ⁻⁵ | 1,40 | 85,74 | 5,933x10 ⁻⁵ |
| 0,42 | 34,49 | 5,814x10 ⁻⁵ | 0,92 | 53,37 | 5,921x10 ⁻⁵ | 1,42 | 87,29 | 5,939x10 ⁻⁵ |
| 0,44 | 34,95 | 5,841x10 ⁻⁵ | 0,94 | 54,46 | 5,918x10 ⁻⁵ | 1,44 | 88,86 | 5,943x10 ⁻⁵ |
| 0,46 | 35,44 | 5,872x10 ⁻⁵ | 0,96 | 55,58 | 5,929x10 ⁻⁵ | 1,46 | 90,43 | 5,925x10 ⁻⁵ |
| 0,48 | 35,94 | 5,929x10 ⁻⁵ | 0,98 | 56,72 | 5,959x10 ⁻⁵ | 1,48 | 92,00 | 5,935x10 ⁻⁵ |
| 0,50 | 36,47 | 5,930x10 ⁻⁵ | 1,00 | 57,89 | 5,960x10 ⁻⁵ | 1,50 | 93,57 | 5,939x10 ⁻⁵ |

Tabela7.5 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante aquecimento da LMF por corrente.

Terceira verificação do atraso de fase durante resfriamento da LMF:

| Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) | Cor. (A) | Temp. (°C) | Atraso de Fase (H/Ω) |
|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|----------|------------|------------------------|
| 1,50 | 93,41 | 5,939X10 ⁻⁵ | 1,00 | 73,10 | 6,073X10 ⁻⁵ | 0,50 | 49,2097 | 6,052X10 ⁻⁵ |
| 1,48 | 93,38 | 5,943X10 ⁻⁵ | 0,98 | 72,00 | 6,066X10 ⁻⁵ | 0,48 | 48,4272 | 6,063X10 ⁻⁵ |
| 1,46 | 93,23 | 5,928X10 ⁻⁵ | 0,96 | 70,90 | 6,060X10 ⁻⁵ | 0,46 | 47,6575 | 6,059X10 ⁻⁵ |
| 1,44 | 92,97 | 5,946X10 ⁻⁵ | 0,94 | 69,82 | 6,064X10 ⁻⁵ | 0,44 | 46,9006 | 6,058X10 ⁻⁵ |
| 1,42 | 92,60 | 5,931X10 ⁻⁵ | 0,92 | 68,74 | 6,058X10 ⁻⁵ | 0,42 | 46,1568 | 6,063X10 ⁻⁵ |
| 1,40 | 92,14 | 5,943X10 ⁻⁵ | 0,90 | 67,68 | 6,061X10 ⁻⁵ | 0,40 | 45,4263 | 6,059X10 ⁻⁵ |
| 1,38 | 91,60 | 5,954X10 ⁻⁵ | 0,88 | 66,63 | 6,050X10 ⁻⁵ | 0,38 | 44,7096 | 6,063X10 ⁻⁵ |
| 1,36 | 90,97 | 5,952X10 ⁻⁵ | 0,86 | 65,59 | 6,052X10 ⁻⁵ | 0,36 | 44,0072 | 6,056X10 ⁻⁵ |
| 1,34 | 90,28 | 5,958X10 ⁻⁵ | 0,84 | 64,56 | 6,058X10 ⁻⁵ | 0,34 | 43,3198 | 6,065X10 ⁻⁵ |
| 1,32 | 89,52 | 5,956X10 ⁻⁵ | 0,82 | 63,54 | 6,055X10 ⁻⁵ | 0,32 | 42,6481 | 6,065X10 ⁻⁵ |
| 1,30 | 88,70 | 5,964X10 ⁻⁵ | 0,80 | 62,54 | 6,055X10 ⁻⁵ | 0,30 | 41,9932 | 6,067X10 ⁻⁵ |
| 1,28 | 87,84 | 5,968X10 ⁻⁵ | 0,78 | 61,56 | 6,055X10 ⁻⁵ | 0,28 | 41,3562 | 6,075X10 ⁻⁵ |
| 1,26 | 86,93 | 5,970X10 ⁻⁵ | 0,76 | 60,58 | 6,051X10 ⁻⁵ | 0,26 | 40,7383 | 6,073X10 ⁻⁵ |
| 1,24 | 85,98 | 5,972X10 ⁻⁵ | 0,74 | 59,63 | 6,051X10 ⁻⁵ | 0,24 | 40,1411 | 6,069X10 ⁻⁵ |
| 1,22 | 84,99 | 5,975X10 ⁻⁵ | 0,72 | 58,68 | 6,053X10 ⁻⁵ | 0,22 | 39,5662 | 6,072X10 ⁻⁵ |
| 1,20 | 83,98 | 5,973X10 ⁻⁵ | 0,70 | 57,75 | 6,053X10 ⁻⁵ | 0,20 | 39,0156 | 6,073X10 ⁻⁵ |
| 1,18 | 82,94 | 5,982X10 ⁻⁵ | 0,68 | 56,84 | 6,048X10 ⁻⁵ | 0,18 | 38,4913 | 6,071X10 ⁻⁵ |
| 1,16 | 81,89 | 5,981X10 ⁻⁵ | 0,66 | 55,94 | 6,051X10 ⁻⁵ | 0,16 | 37,9958 | 6,080X10 ⁻⁵ |
| 1,14 | 80,81 | 5,979X10 ⁻⁵ | 0,64 | 55,05 | 6,054X10 ⁻⁵ | 0,14 | 37,5315 | 6,080X10 ⁻⁵ |
| 1,12 | 79,72 | 6,069X10 ⁻⁵ | 0,62 | 54,17 | 6,055X10 ⁻⁵ | 0,12 | 37,1013 | 6,073X10 ⁻⁵ |
| 1,10 | 78,63 | 6,063X10 ⁻⁵ | 0,60 | 53,31 | 6,047X10 ⁻⁵ | 0,10 | 36,7084 | 6,064X10 ⁻⁵ |
| 1,08 | 77,52 | 6,066X10 ⁻⁵ | 0,58 | 52,47 | 6,062X10 ⁻⁵ | 0,08 | 36,3562 | 6,088X10 ⁻⁵ |
| 1,06 | 76,42 | 6,065X10 ⁻⁵ | 0,56 | 51,63 | 6,057X10 ⁻⁵ | 0,06 | 36,0482 | 6,138X10 ⁻⁵ |
| 1,04 | 75,31 | 6,064X10 ⁻⁵ | 0,54 | 50,81 | 6,061X10 ⁻⁵ | 0,04 | 35,7884 | 6,182X10 ⁻⁵ |
| 1,02 | 74,20 | 6,069X10 ⁻⁵ | 0,52 | 50,00 | 6,058X10 ⁻⁵ | 0,02 | 35,5811 | 6,219X10 ⁻⁵ |

Tabela 7.6 – Valores relacionados ao atraso de fase causado pelo indutor durante resfriamento da LMF.

7.2 ALGORITMOS USADOS PARA CÁLCULO DE INDUTÂNCIA

```
dt=1/fa;
T=dt*(N-1);
t=[0:dt:T];
dado=dado';
y=dado;
p=i;

format long

clear RF1 RF2 RF3 RF4 RF5 RF6 RF7 RF8 RF9 RF10 Pm1 Pm2

syms x

V1=dado(:,1);
Vcc=(max(V1)+min(V1))/2;

VRI=dado(:,2);
VccR=(max(VRI)+min(VRI))/2;

Icc=VccR/1.27
I1=(1/1.27)*dado(:,2);

R1(p)=(Vcc/Icc);
RI1=(R1(p)/1.27)*dado(:,2);

for m=1:1:100
C1(m)=1+m-1;
end

for i1=1:1:100;
    for j1=1:1:7;
Y1=dado(:,1);
A1(i1,j1)=C1(i1).^(j1-1);
    end
end

X1=(inv(A1'*A1))*A1'*Y1;
X2=[1 x x.^2 x.^3 x.^4 x.^5 x.^6];
F1=X2*X1;
Xcc=X1(1)-Vcc;
F1r=[X1(7) X1(6) X1(5) X1(4) X1(3) X1(2) Xcc];

for n=1:1:100
C2(n)=1+n-1;
end

for i2=1:1:100;
    for j2=1:1:7;
```

```

Y2=(R1(p)/1.27)*dado(:,2);
A2(i2,j2)=C2(i2).^(j2-1);
    end
end
X3=(inv(A2'*A2))*A2'*Y2;
X4=[1 x x.^2 x.^3 x.^4 x.^5 x.^6];
F2=X4*X3;
XccR=X3(1)-((max(Y2)+min(Y2))/2);
F2r=[X3(7) X3(6) X3(5) X3(4) X3(3) X3(2) XccR];
RF1=roots(F1r)
RF2=roots(F2r)

Rc1=real(RF1);
Rc2=real(RF2);
Ab1=abs(RF1);
Ab2=abs(RF2);

%Mantem apenas pontos críticos reais puros
for k1=1:length(RF1)
if Rc1(k1)==Ab1(k1)
RF3(k1)=Rc1(k1);
end
end

%Coloca em ordem crescente
RF3=sort(RF3,1);

if length(RF3)==2
    Pm1=RF3;
else
%Mantem valores superiores a 100
for k3=1:length(RF3);
if (RF3(k3)<102)
    RF5(k3)=RF3(k3);
else
end
end
end

%Coloca em ordem decrescente
RF5=RF5';
RF5=sort(RF5,1);
RF5=RF5(end:-1:1);

if length(RF5)==2
    Pm1=RF5;
else
%Mantem valores inferiores a 0
for k4=1:length(RF5);
if (RF5(k4)>0)
    Pm1(k4)=RF5(k4);
end
end
end

```

```

else
end
end
end
Pm1=sort(Pm1,2);

%Mantem apenas pontos críticos reais puros
for k5=1:1:length(RF2)
if Rc2(k5)==Ab2(k5)
RF4(k5)=Rc2(k5);
end
end

%Coloca em ordem crescente
RF4=sort(RF4,1);

if length(RF4)==2
    Pm2=RF4;
else
%MRetira valores superiores a 100
for k7=1:1:length(RF4);
if (RF4(k7)<100)
    RF6(k7)=RF4(k7);
else
end
end

%Coloca em ordem decrescente
RF6=RF6';
RF6=sort(RF6,1);
RF6=RF6(end:-1:1);

if length(RF6)==2
    Pm2=RF6;
else
%MRetira valores inferiores a 0
for k8=1:1:length(RF6);
if (RF6(k8)>0)
    Pm2(k8)=RF6(k8);
else
end
end
end
end
Pm2=sort(Pm2,2);
end

%Encontrar as distância entre os pontos críticos de cada
onda
Dl3=[abs(Pm1(1)-Pm2(1)),abs(Pm1(2)-Pm2(2))];

Dl1=min(Dl3);

```

```

Dl2=max(Dl3);
Dl0=(Dl1+Dl2)/2;

Dl=[Dl2,Dl1,Dl0];

T1(p)=2*(Pm1(1)-Pm1(2));
T2(p)=2*(Pm2(1)-Pm2(2));

%Encontrar o valor de indutância com base no ângulo de fase
Lt1=(tan(2*pi*abs(Dl2)/100))/(2*pi*(200000/(abs(T1(p))+T2(p)
)));

Lt2=(tan(2*pi*abs(Dl1)/100))/(2*pi*(200000/(abs(T1(p))+T2(p)
)));

Lt0=(tan(2*pi*abs(Dl0)/100))/(2*pi*(200000/(abs(T1(p))+T2(p)
)));

Lt=[Lt1,Lt2,Lt0];

Ltm1(p)=mean(Lt);

L1(p)=abs(mean(Ltm1(p)));

if (Pm1(1)<3 | Pm1(2)>97)
if i==1
L1(p)=L1(p);
else
L1(p)=L1(p-1);
end
end

L2=L1(p)
L3=mean(L1)
L4=L1'
fator=histc(L4,0:0);
L5=L3/((200-fator)/200);
Pm(p)=[Pm1,Pm2]
D(p)=Dl

```

7.3 IMAGENS DA BANCADA DE TESTES



Figura 7.1 – Uso do software LabView para aquisição de dados, juntamente com a Placa da National Instruments. Duas fontes de alimentação (CC e CA) da Agilent. Dispositivo no qual é acondicionado o indutor.

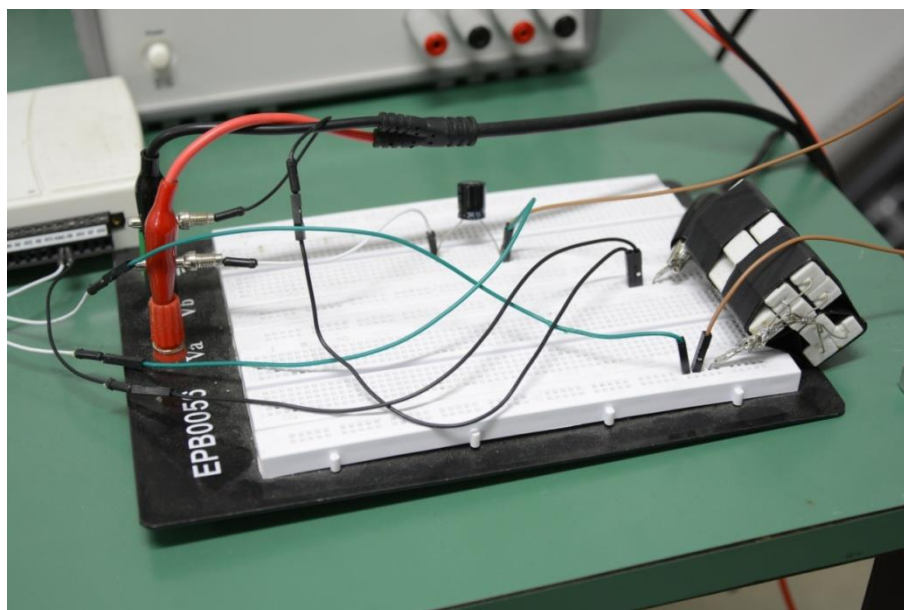


Figura 7.2 – Protoboard conectado ao indutor variável.

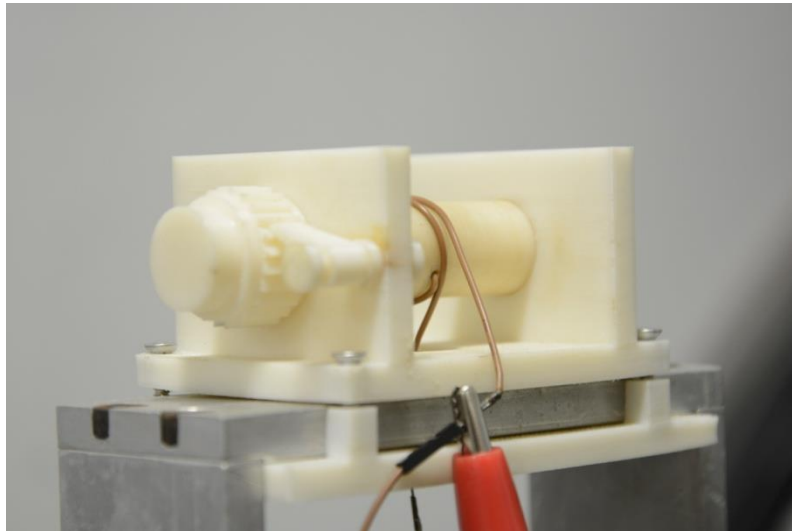


Figura 7.3 – Catraca usada para realizar o deslocamento geométrico da mola de LMF.

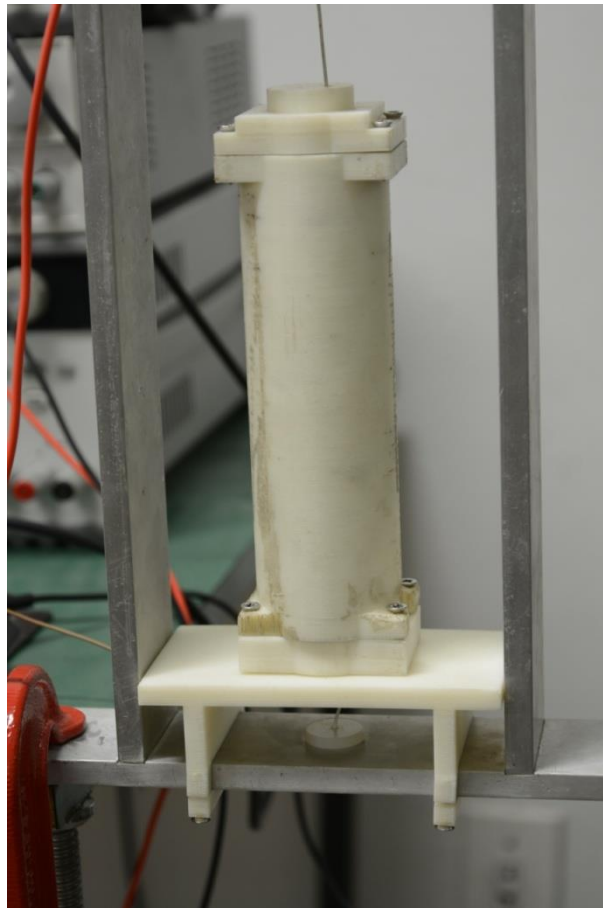


Figura 7.4 – Acondicionamento do indutor envolto por ferrita.

Capítulo 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, R. A. A, PEREIRA, J. H. I., SOUZA, C. G., PACHECO, P. M. C. L., SAVI, M. A. **Shape memory alloy helical springs: modeling, simulation and experimental analysis**. Mechanics of Solids in Brazil 2009. [S.l.]: Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2009. p. 169-181.

AN, S., RYU, J., CHO, M., CHO, K. **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. 1-16, 2012.

ANDERSON, P., SANGESLAND, A. S. **Detailed study of shape memory alloys in oil well applications**. Sintef petroleum research, Trondheim, Norway (1999).

ARBAB, S. C., ALEONG, D., DUMONT, C., MCDOWELL, D., PATOOR, E. **Superelastic behavior modeling in shape memory alloys**. Journal de PhysiqueIV, 112, p. 205-208, 2003.

BENAFAN, O., NOEBE, R. D., HALSMER, T. J. **Static rock splitters based on high temperature shape memory alloys for planetary explorations**. Acta Astronautica. 2015.

BRAMMAJYOSULA, R., BURAVALLA, V., KHANDELWAL, A. **Model for resistance evolution in shape memory alloys including R-phase**. Smart Materials and Structures, 2011.

BO, Z.; LAGOUDAS, D. C. **Thermomechanical modeling of polycrystalline SMAs under cyclic loading, Part II: Material characterization and experimental results for a specific transformation cycle**. International Journal of Engineering Science, p. 1141-1173, 1999.

BO, Z.; LAGOUDAS, D. C. **Thermomechanical modeling of polycrystalline SMAs under cyclic loading, Part IV: modeling of minor hysteresis loops.** International Journal of Engineering Science, n. 37, p. 1205-1249, 1999.

BORDEN, T. **Shape Memory Alloys: Forming a Tight Fit.** Mechanical Engineering, p. 67-72, October 1991.

BOUVET, C., CALLOCH, S., LEXCELLENT, C. **A phenomenological model for pseudoelasticity of shape memory alloys under multiaxial proportional and nonproportional loadings.** European Journal of Mechanics A/Solids, 23, p. 37-61, 2004.

CAI, J., DENG, Z. **Sensorless Control of Switched Reluctance Motor Based on Phase Inductance Vectors.** IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, v. 27, n. 7, p. 3410-3423. 2012

CHEN, C., ZHENG, R., KUNG, T., SHAUO, C., SHY, H. **A strain-fiber actuator by use of shape memory alloy spring.** Optik Optics. 818-823, 2009.

CHIKKAMARANAHALLI, S., VALLANCE, R. R., KHAN, A., MARSH, E. R., RAWASHDEH, O. A., LUMPP, J. E., WALCOTT, B. L. **Precision instrument for characterizing shape memory alloy wires in bias spring actuation.** Review Of Scientific Instruments, 76, 2005.

CUI, D., SONG, G., LI, H. **Modeling of the electrical resistance of shape memory alloy wires.** Smart Materials and Structures. 2010.

D. de COS, CARGÍA-ARRIBAS, A., BARANDIARÁN, J. M. **Simplified electronic interfaces for sensors based on inductance changes.** Sensors and Actuators A. 302-307, 2004.

DONG, Y., BOMING, Z., JUN, L. **A changeable aerofoil actuated by shape memory alloy springs.** Materials Science and Engineering: A, v. 485, p. 243-250, June 2008.

FREMOND, M. **Matériaux à mémoire de forme.** C.R. Acad. Sci., Paris, p. 239-244, 1987.

FREMOND, M.; MIYAZAKI, S. **Shape memory alloy: a thermomechanical macroscopic theory.** [S.l.]: Berlin: Springer, v. VII, 1996.

FUNAKUBO, H. **Shape Memory Alloys**, Gordon and Breach Science Publishers, 1987.

FURST, S. J., CREWS, J. H., SEELECKE, S. **STRESS, strain, and resistance behavior of two opposing shape memory alloy actuator wires for resistance-based self-sensing applications**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2016.

GURUNG, H., BANERJEE, A. **Development of an extended Kalman filter for the self-sensing application of a spring-biased shape memory alloy wire actuator**. Smart Materials and Structures. 2016.

HASSANI, M., SHOULAIE, A. **Sensorless load and position estimation in linear reluctance actuator**. IEICE Electronics Express, Vol. 11, No. 2, 1-6, 2013.

HESSELBACH, J. Shape memory actuators. **Adaptronics and smart structures**, Berlin, p. 143-160, 1995.

HODGSON D. E., WU M. H., BIERMANN R. J. **Shape Memory Alloys, Metals Handbook**. Vol 2. ASM International, Ohio, 897-902, 1990.

JACKSON, C. M. et al. **55 - Nitinol - The Alloy with a Memory: Its Physical Metalurgy, Properties, and Applications: A Report**. Nasa. Washington. 1972.

JACOT, A., RUGGERI, R., CLINGMAN, D. **Shape memory alloy device and control method**. U.S. Patent 7,037,076 (2 May 2006).

JAYENDER, J., PATEL, R. V., NIKUMB, S., OSTOJIC, M. **Modeling and Control of Shape Memory Alloy Actuators**. Transactions on Control Systems Technology. 2008.

KAUFFMAN, G.; MAYO, I. Memory Metal. **Chem Matters**, p. 4-7, October 1993.

KHO, J. S. AN, S., CHO, K. **Finger-sized climbing robot using artificial proleg**. International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). [S.l.]: IEEE RAS and EMBS. 2010. p. 610-615.

KIM, B., LEE, M. G., LEE, Y. P., KIM, Y., LEE, G. **An earthworm like micro robot using shape memory alloy actuator**. Sensor and Actuators A: Physical, v. 125, n. 2, p. 429-437, 2006.

KIM, H. HAN, Y., LEE, D., HA, J., CHO, K. **Sensorless displacement estimation of a shape memory alloy coil spring actuator using inductance.** Smart Materials and Structures, IOP Publishing. 22 (2013).

KOH, J., CHO, K. **Omega-Shaped Inchworm-Inspired Crawling Robot With Large-Index-and-Pitch (LIP) SMA Spring Actuators.** Transactions on Mechatronics. 2013.

KRANOSELSKII, M.; POKROVSKII, A. **System with hysteresis.** Moscow: Nauka, 1983.

KURDJUMOV, G. V., KHANDROS, L. G. **First reports of the thermoelastic behavior of the martensitic phase of Au-Cd alloys,** Doklady Akademii Nauk SSSR 66 (1949) 211-213.

LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloy: Modeling Engineering Applications.** Texas, USA: Springer, 2008.

LEGRAND, B., DORDET, Y., VOYANT, J., YONNET, J. **Contactless position sensor using magnetic saturation.** Sensors and Actuators A. 149-154, 2003.

LENG, J., YAN, X., ZHANG, X., HUANG, D., GAO, Z. **Design of a novel flexible shape memory alloy actuator with multilayer tubular structure for easy integration into a confined space.** Smart Materials and Structures. 2016.

MA, N., SONG, G., LEE, H. **Position control of shape memory alloy actuators with internal electrical resistance feedback using neural networks.** Smart Materials and Structures. 2004.

MACHADO, K. D. **Teoria do Eletromagnetismo.** Ponta Grossa: Editora UEPG, 2002. Volume II.

MAJIMA, S., KODAMA, K., HASEGAWA, T. **Modeling of Shape Memory Alloy Actuator and Tracking Control System with the Model.** Transactions on Control Systems Technology. 2001.

MAZLOUMAN, S. J., MAHANFAR, A., MENON, C., VAUGHAN, R. G. **Reconfigurable Axial-Mode Helix Antennas Using Shape Memory Alloys.** Transactions On Antennas and Propagation. 2011.

- MAZOUZ, A., HIDJAZI, D., CHAGHI, A. **Determination of Coil Inductances Cylindrical Iron Nucleus**. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics. v. 2, n. 1, p. 13-23, 2014.
- MENCIASSI, A., GORINI, S., PERNORIO, G., DARIO, P. **A SMA actuated artificial earthworm**. ICRA '04.2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.]: [s.n.]. 2004. p. 3282-3287.
- MIYAZAKI, S. IMAI, T., IGO, Y., OTSUKA, K. **Effect of cyclic deformation on hte pseudoelasticity characteristics of Ti-Ni alloys**. Metallurgical Transactions, n. 17A, p. 115-120, 1986.
- MOHAMED S. M. A., BYCRAFT, B., BSOUL, A., TAKAHATA, K. **Radio-Controlled Michoactuator Based on Shape-Memory-Alloy Spiral-Coil Inductor**. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 22 No. 2, 2013.
- MOHAMED S. M. A., ABUZAITER, A., SCHLOSSER, C., BYCARFT, B., TAKAHATA, K. **Wireless Displacement Sensing of Micromachined Spiral-Coil Actuator Using Resonant Frequency Tracking**. Sensors. 2014.
- MÜLLER, C. W., PFEIFER, R., EL-KASHEF, T., HURSCHLER, C., HERZOQ, D., OSZWALD, M., HAASPER, C., KRETTEK, C., GÖSLING, T. **Electromagnetic Induction Heating of an Orthopaedic Nickel–Titanium Shape Memory Device**, Journal of Orthopaedic Research December. 2010
- OTSUKA, K., WAYMAN, C. M. **Shape Memory Materials**, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- PAIVA, A.; SAVI, M. A. **An overview of constitutive models for shape memory alloys**. Mathematical Problems in Engineering, p. 1-30, 2006.
- PERKINS, J. **Shape Memory Effects in Alloys**, Plenum Press, New York, 1975.
- PETERS, C., MANOLI, Y. **Inductance calculation of planar multi-layer and multi-wire coils: An analytical approach**. Sensors and Actuatos A. 394-404, 2008.
- PREISACH, F. **Über die magnetische Nachwirkung**. Zeitschrift für Physik, v. 94, n. 5-6, p. 277-302, 1935.

REYNAERTS, D.; BRUSSEL, H. V. **Design Aspects of Shape Memory Actuators.** Mechatronics, n. 8, p. 635-656, 1998.

RYH, J. **Biocompatibility evolution of nickel-titanium shape memory alloy.** Ph.D. thesis, Univeristy of Oulu, Oulu, Finland (1999).

SAADAT, S., SALICHS, J., NOORI, M., HOU, Z., DAVOODI, H., BAR-ON, I. **An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy.** Smart Materials and Structures 11 (2002) 218–229.

SANTOS JUNIOR, A. A. D. **Elementos de Máquinas I - Molas helicoidas e planas.** Unicamp. Campinas, p. 1-18. 2001.

SFAKIOTAKIS, M., KAZAKIDI, A., EVDAIMON, T., CHATZIDAKI, A., TSAKIRIS, D. P. **Multi-arm Robotic Swimmer Actuated by Antagonistic SMA Springs.** International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2015.

SHABALOVSKAYA, S. **Biological aspects of TiNi alloys surfaces.** Journal de Physique IV 5 (1995) 1199–1204.

ŠITTNER, P. et al. **Recoverystress generation in shape memory ti50ni45cu5 thin wires.** Materials Scienceand Engineering A, 286, p. 298-311, 2000.

SPINELLA, I.; DRAGONI, E. **Design Equations for Binary Shape Memory Actuators under Dissipative Forces.** Journal of Mechanical Engineering Science, p. 223(C3):531-543, 2009.

STEBNER, A., PADULA, S. A., NOEBE, R. D., QUINN, D. D. **Characterization of Ni19.5Ti50.5Pd25Pt5 high-temperature shape memory alloy springs and their potential applications in aeronautics.** Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, v. 6928, p. 69280X-1-12, 2008.

STRELEC, J. K., LAGOUDAS, D. C., KHAN, M. A., YEN, J. **Design and implementation of a shape memory alloy actuated reconfigurable wing.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures 14 (2003) 257–273.

SUN, Q. P., HWANG, K. C., YU, S. W. **A Micromechanics constitutive model of transformation plasticity with shear and dilatation effect.** Journal of Mechanics and Physics of Solids, v. 39, n. 4, p. 507-524, 1991.

TRIMMER, B. A., TAKESIAN, A. E., SWEET, B. M., ROGERS, C. B., HAKE, D. C., ROGERS, D. J. **Caterpillar locomotion: a new model for soft-bodied climbing and burrowing robots**. 7th International Symposium on Technology and the Mine Problem. Monterey: Mine Warfare Association. 2006. p. 1-10.

W. J. BUEHLER, J. V. GILFRICH, R. C. WILEY, **Effects of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi**, Journal of Applied Physics 34 (1963) 1475.

WAYMAN, C. M. **Phase Transformation nondiffusive**. Physical Metallurgy, Amsterdam, n. 3rd, p. 1031-1074, 1983.

WEBB, G.; KURDILA, A. **Identification and adaptive control for a class of hysteresis operators**. 38th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. [S.l.]: AIAA journal of Guidance and Control. 1997.

WILLEY, C., HUETTL, B., HILL, S. **Design and development of a miniature mechanisms tool-kit for micro spacecraft**. Proceedings of the 35th Aerospace Mechanisms Symposium, Ames Research Center, 9–11 May, 2001, pp. 1–14.

YAMAMOTO, S., KANO, T., YAMAGUCHI, Y., ARA, T. **A Method to Determine Direct- and Quadrature-Axis Inductances of Permanent Magnet Synchronous Motors**. Electrical Engineering in Japan. V. 171, N. 3. 2010.

YAN, S., LIU, X., XU, F., WANG, J. **A gripper actuated by a pair of differential SMA springs**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, n. 8, p. 459-466, 2007.

YOO, S., YEO, J., HWANG, S., KIM, Y. H., HUR, S. G., KIM, E. **Application of a NiTi alloy two-way shape memory helical coil for a versatile insulating jacket**. Materials Science and Engineering A. 2006.

Design Handbook: Engineering Guide to Spring Design, *Associated Spring* Barnes Group Inc. 1981.