

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNO KAZUYOSHI TAKAHASHI DA SILVA  
HYAM GABRIEL ALMEIDA FRANCISQUETTI**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO  
DE ATUADORES DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2021**


**BRUNO KAZUYOSHI TAKAHASHI DA SILVA** ✉

**HYAM GABRIEL ALMEIDA FRANCISQUETTI** ✉

## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO DE ATUADORES DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA**

### **DEVELOPMENT OF A SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS CHARACTERIZATION SISTEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel/Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Frederic Conrad Janzen ✉ 

**PONTA GROSSA**

**2021**



4.0 Internacional

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO DE ATUADORES DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA**

por

**HYAM GABRIEL ALMEIDA FRANCISQUETTI E BRUNO KAZUYOSHI TAKAHASHI  
DA SILVA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 18 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr.Frederic Conrad Janzen**  
Orientador

**Profa. Ma.Sandra Mara Kaminski Tramontin**  
Membro Titular

**Prof. Dr.Angelo Marcelo Tusset**  
Membro Titular

**Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares**  
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho**  
Coordenador do Curso

Dedicamos a nossa família e amigos que nos apoiaram tudo durante nosso percurso

## **AGRADECIMENTOS**

Esse trabalho não seria possível sem ajuda de muitas pessoas. Primeiramente, Deus, pois sem a capacidade que vem dEle, nada daquilo que fizemos ou faremos seria possível. Também gostaria de agradecer a meu pai e minha mãe por todo o apoio que me deu durante todo o período na universidade. A finalização desse trabalho é uma conquista minha e também deles. Além deles, minha namorada Kamilla que esteve presente comigo em todos os momentos me dando apoio e sendo o suporte que eu precisava. Também, junto com todas essas pessoas especiais, tem uma que participou de minha jornada na universidade e foi peça fundamental. Nosso querido professor orientador Frederic Conrad Janzen. Obrigado por sua ajuda, apoio e orientação. Se você esse trabalho não seria nada do que ele é. Obrigado. Também a todo o departamento de eletrônica que nos apoiou durante esse período, nos cedendo estrutura e material necessário para realização e construção desse estudo. Aos demais amigos, professores e colegas. Meu muito obrigado.

A realização deste trabalho só foi possível graças a ajuda de muitas pessoas. Primeiramente, meus pais, por seu apoio incondicional durante todo o período na universidade, sempre me incentivando a buscar meu sonho. Sem vocês nada disso seria possível. Ao nosso orientador Prof. Dr. Frederic Conrad Janzen, cujo o apoio e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, muito obrigado. A essa instituição e principalmente ao Departamento de eletrônica que nos apoiou durante a pesquisa, nos cedendo os laboratórios e material necessário para a conclusão deste trabalho. Obrigado. Meus agradecimentos aos meus amigos que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

Os autores também agradecem ao CNPq pelo suporte através do processo grant: 447539/2014-0 pelo qual foi adquirida a CompactRio utilizada na elaboração do projeto.

## RESUMO

KAZUYOSHI TAKAHASHI DA SILVA, BRUNO; GABRIEL ALMEIDA FRANCISQUETTI, HYAM. **Desenvolvimento de um sistema para caracterização de atuadores de liga com memória de forma.** 2021. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

Ligas que possuem o efeito de memória de forma desempenham um papel significativo nos estudos atuais, devido ao fato de que esse tipo de fenômeno aumenta o leque de aplicações possíveis. Este efeito de memória de forma é a capacidade do material de retornar a um estado anterior a partir de um estímulo. Este trabalho utiliza o fio de liga de NiTi como objeto de estudo e tem como objetivo desenvolver uma bancada de ensaios que possibilite o monitoramento e a caracterização de um fio deste material. Esta bancada é personalizada e previamente instrumentada. Portanto, o trabalho apresenta esta bancada juntamente com todos os componentes que permitem a análise do efeito da memória de forma, e também apresenta gráficos que descrevem o comportamento e treinamento do fio.

**Palavras-chave:** Ligas com Memória de Forma. Caracterização de Parâmetros. Desenvolvimento.

## ABSTRACT

KAZUYOSHI TAKAHASHI DA SILVA, BRUNO; GABRIEL ALMEIDA FRANCISQUETTI, HYAM. **Development of a Shape Memory Alloy Actuators characterization sistem.** 2021. 54 p. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) — Federal University of Technology — Paraná, Ponta Grossa, 2021.

Alloys that have the shape memory effect play a significant role in current studies, due to the fact that this type of phenomenon increases the range of possible applications. This shape memory effect is the material's ability to return to a previous state from a stimulus. This work uses the NiTi alloy wire as a study object and aims to develop a test bench that makes it possible to monitor and characterize a wire of this material. This bench is personalized and previously instrumented. Therefore, the work presents this bench together with all the components that allow the analysis of the shape memory effect, and also shows graphs describing the behavior and training of the wire.

**Keywords:** Shape Memory Alloys. Parameters Characterization. Development.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama Tensão de atuação x deformação de atuação para diversos materiais ativos . . . . .	15
Figura 2 – Diagrama de densidade energética x frequência de atuação para diversos materiais ativos . . . . .	15
Figura 3 – Valor das propriedades do Nitinol comparado com outros materiais . . . . .	16
Figura 4 – Transformação de fase induzida pela mudança de temperatura de uma LEMF sem uma carga mecânica aplicada . . . . .	17
Figura 5 – Processo de reorientação da martensita em uma LEMF sob a ação de uma tensão . . . . .	18
Figura 6 – Esquema do efeito memória de forma em uma LEMF, demonstrando o descarregamento e o subsequente aquecimento para austenita . . . . .	18
Figura 7 – EMF de via única para uma liga NiTi demonstrado em um diagrama tensão x deformação x temperatura. . . . .	19
Figura 8 – Loop de histerese em uma LEMF . . . . .	20
Figura 9 – Resposta pseudo elástica de um liga de NiTi . . . . .	21
Figura 10 – Comparação entre as condições para transformação de fase nos modelos de Tanaka, Liang, Brinson e Elahinia . . . . .	27
Figura 11 – Bancada construída e montada . . . . .	31
Figura 12 – Modelo 3D do sistema de suportes para o fio de SMA . . . . .	33
Figura 13 – Sistema de suportes impressos e montados . . . . .	33
Figura 14 – Fontes de alimentação para os sensores e para o SMA . . . . .	34
Figura 15 – Sensor de corrente ASC712 . . . . .	35
Figura 16 – Interrogador óptico I-MON 256/512 USB . . . . .	36
Figura 17 – Circuito de potência para controle do atuador . . . . .	37
Figura 18 – Imagem do circuito de PWM montado em protoboard . . . . .	37
Figura 19 – CompactRIO utilizada para processamento e controle da bancada . . . . .	38
Figura 20 – Programa embarcado na CompctRio . . . . .	39
Figura 21 – Interface Homem-Máquina . . . . .	40
Figura 22 – Diagrama de Blocos da Interface Homem-Máquina . . . . .	40
Figura 23 – Fontes de alimentação da bancada de testes . . . . .	41
Figura 24 – Gráfico de aplicação de Corrente x Tempo com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	43
Figura 25 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Tempo com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	44
Figura 26 – Gráfico de aplicação de Deslocamento x Tempo com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	44
Figura 27 – Gráfico de aplicação de Corrente x Tempo com massa de 700 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	45
Figura 28 – Gráfico de aplicação de Deslocamento x Tempo com massa de 700 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	45
Figura 29 – Gráfico de aplicação de Deslocamento x Tempo com massa de 700 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	46
Figura 30 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Deslocamento com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	47
Figura 31 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Deslocamento com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	47



Figura 32 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Deslocamento com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V . . . . .	48
Figura 33 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Deslocamento com massas de 500 gramas e 700 gramas com tensões de 1.5V e 1.7V . . . . .	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	11
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	OBJETIVO	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>14</b>
2.1	LIGAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (LEMF)	14
2.1.1	Liga Níquel Titânio (Nitinol)	15
2.1.2	Efeito memória de forma (EMF)	16
2.1.2.1	Histerese	19
2.1.2.2	Superelasticidade	20
2.1.2.3	Treinamento	21
2.2	MODELAGENS MATEMÁTICAS	22
2.2.1	Modelo de Tanaka	22
2.2.2	Modelo de Liang e Rogers	23
2.2.3	Modelo de Brinson	24
2.2.4	Modelo de Elahinia	25
2.2.5	Boyd e Lagoudas	27
2.2.6	Ivshin e Pence	28
2.2.7	Prahlad e Chopra	28
2.3	CONTROLE	28
2.3.1	Modulação por largura de pulso	28
2.3.2	Controle Linear	29
2.3.2.1	Controle não linear	29
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>31</b>
3.1	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	31
3.2	MODELAGEM 3D	32
3.3	INSTRUMENTAÇÃO	33
3.3.1	Sensor de deslocamento	34
3.3.2	Sensor de corrente	34
3.3.3	Sensor de temperatura	35
3.3.4	Circuito PWM	36
3.3.5	Sistema de controle e monitoramento	37
3.3.6	Alimentação	39
3.4	VALIDAÇÃO E MÉTODO DE COLETA DE RESULTADOS	41
3.5	MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>43</b>
4.1	CORRENTE, TEMPERATURA, POSIÇÃO X TEMPO	43
4.2	FORMAÇÃO DA HISTERESE	46
4.3	INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TENSÃO E DA CORRENTE NO SISTEMA	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>50</b>

<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO A – DATASHEET SMA . . . . .</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O efeito de memória de forma é objeto de estudo desde 1932, quando o fenômeno foi observado pelo físico sueco Arne Olander enquanto trabalhava com uma liga de ouro (Au) e cádmio (Cd), mas foi a descoberta desta propriedade em ligas de Níquel (Ni) e Titânio (Ti) pela equipe de pesquisadores do laboratório de armamento naval dos Estados Unidos, liderados por William Buhler, que aumentou o interesse no efeito de memória de forma. A liga de Ni-Ti apresentava vantagens significativas quando comparada com as ligas previamente descobertas como por exemplo, o menor custo e a menor periculosidade para a saúde (MOHAMMAD, 2004).

O descobrimento da liga de Níquel (Ni) e Titânio (Ti) por William Buhler e sua equipe no laboratório de armamento naval dos Estados Unidos, foi o ponto de partida para a aplicação de ligas com efeito de memória de forma em problemas de engenharia (MOHAMMAD, 2004).

As ligas com efeito de memória de forma (LEMF) são ligas metálicas que possuem características especiais, tais como o efeito de memória de forma (EMF) e a pseudoelasticidade. O EMF permite que o material seja deformado e retorne a seu formato original quando submetido a um aquecimento até uma temperatura adequada (LAGOUDAS, 2008).

O primeiro uso comercial de uma LEMF, conhecido como Cryofit, foi utilizado como acoplador de canos em aeronaves F-14. Uma das principais áreas de utilização das LEMF é a construção de atuadores, pois possuem uma relação força por peso elevada, alta durabilidade, simplicidade, além de contribuírem para redução de custo (LAGOUDAS, 2008).

### 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Uma das principais dificuldades ao utilizar as LEMF é controlar a deformação do material e estabelecer como a mesma se relaciona com a corrente elétrica aplicada, a mudança de temperatura e transição de fase do material. Os modelos matemáticos que descrevem o comportamento das LEMF são, em sua maioria, divididos em duas partes principais: a lei mecânica que é a lei que define a relação entre tensão, deformação e a cinética de transformação que modela a mudança de fase da martensita (MOHAMMAD,

2004) (KOSSOSKI et al., 2018a).

Por ser um tipo de material relativamente novo, as LEMF não possuem características bem definidas. A falta de informações sobre o comportamento das LEMF resulta em imprecisões nos modelos matemáticos propostos, limitando seu uso a condições particulares. Tendo em vista esses problemas, o trabalho consiste em desenvolver um sistema de bancada que permita realizar a caracterização dos parâmetros de um fio composto pela liga Ni-Ti com a finalidade de ajustar o modelo matemático.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Em 2004, Elahinia apontou falhas nos modelos anteriormente propostos para as LEMF's através da sua aplicação a um braço robótico com um grau de liberdade atuado por um fio de LEMF. Ele observou que os resultados dos modelos divergiam dos resultados experimentais em certas circunstâncias devido, principalmente, à dificuldade de se descrever com precisão o comportamento do fio de NiTi quando submetido a uma variação de temperatura ou da carga aplicada sobre o sistema (MOHAMMAD, 2004).

Baseado nessa dificuldade de ajustar o modelo matemático ao atuador de NiTi, este trabalho propõem o desenvolvimento de uma bancada de testes para caracterização dos parâmetros do atuador de LEMF para ajuste do modelo matemático do mesmo, permitindo que sejam realizadas simulações e projetos de controle mais precisos.

## 1.3 OBJETIVO

### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema para caracterização de atuadores de LEMF para obtenção dos parâmetros necessários para alimentar o modelo matemático e para realização de testes de controle da atuação.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar as peças da bancada de testes em software 3D.
- Selecionar os sensores para monitoramento do comportamento do atuador

de LEMF.

- Imprimir as peças projetadas em uma impressora 3D.
- Montar a bancada de testes.
- Montar o circuito de acionamento da LEMF
- Programar o sistema de controle e monitoramento do atuador utilizando a linguagem LabVIEW.
- Realizar ensaios de um atuador com o bancada desenvolvida.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 LIGAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (LEMF)

As LEMF pertencem a uma classe de materiais ativos. Estes materiais possuem a capacidade especial de produzir uma resposta mecânica quando submetidos a estímulos não mecânicos (PICCIRILLO; GÓES et al., 2018), a resposta produzida pode ser controlada alterando a intensidade do estímulo de entrada (LAGOUDAS, 2008). A possibilidade de se controlar esses materiais fez com que os mesmos fossem utilizados em atuadores em sistemas de controle ativo, pois conseguem alterar a resposta do sistema com o passar do tempo (PICCIRILLO, 2012).

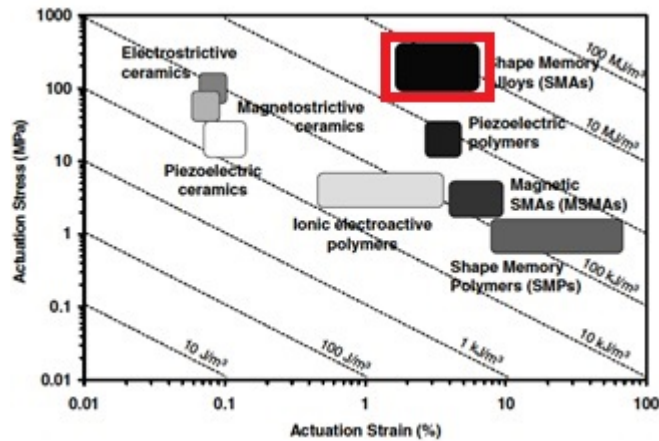
Com o avanço das pesquisas em materiais ativos, três tipos se destacam:

- As LEMF: a variação da temperatura do material funciona como estímulo para a ativação. O aquecimento pode ser induzido pelo efeito Joule (PICCIRILLO, 2012);
- Materiais magnetostrictivo e LEMF magnéticas: utilizam campos magnéticos como estímulo de ativação e podem ser controlados sem contato (WEBB; LAGOUDAS; KURDILA, 1998);
- Piezo-Cerâmicas: produzem esforços mecânicos quando submetidas a um campo elétrico (WEBB; LAGOUDAS; KURDILA, 1998);

As ligas, com efeito, memória de forma são ligas metálicas que possuem a capacidade de retornar a sua forma ou tamanho original quando submetidas a um aquecimento adequado (ELAHINIA; ASHRAFIUON, 2002).

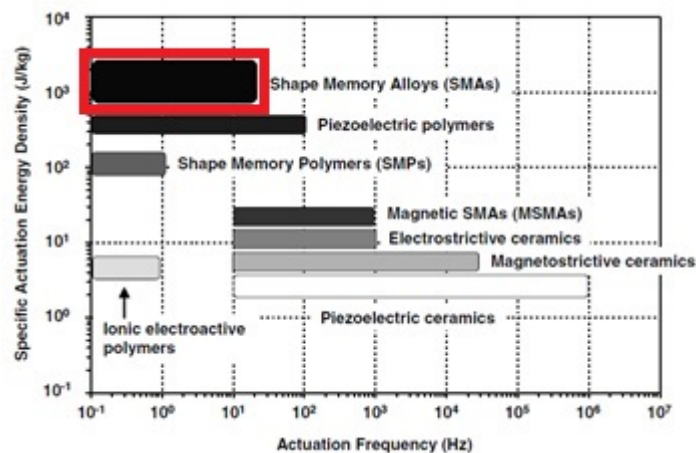
Quando comparadas aos outros tipos de materiais ativos utilizados em atuadores, as LEMF produzem mais trabalho mecânico por volume de material utilizado como apresentado na figura 1. Entretanto como apresentado na 2 apesar da alta densidade energética as ligas com efeito memória de forma, precisam trabalhar em frequências mais baixas de atuação quando comparadas a outros materiais ativos (PICCIRILLO, 2012).

Figura 1 – Diagrama Tensão de atuação x deformação de atuação para diversos materiais ativos



Fonte: Lagoudas (2008).

Figura 2 – Diagrama de densidade energética x frequência de atuação para diversos materiais ativos



Fonte: Lagoudas (2008).

### 2.1.1 Liga Níquel Titânio (Nitinol)

Atualmente apesar da existência de diversos tipos de ligas com efeito memória de forma, as ligas Níquel-Titânio e as ligas baseadas em Cobre são as mais utilizadas, sendo que as ligas NiTi as de maior destaque em pesquisas e aplicações industriais em diversas áreas como o setor aeroespacial, aplicações em estruturas e aplicações em procedimentos médicos. (JIAO et al., 2010; YUAN et al., 2021)

Em seu trabalho (SAVI; MACHADO, 2002) aborda as aplicações médicas da fio de nitinol, como por exemplo o uso de stents autoexpansíveis feitos a partir de uma liga NiTi. Neste caso o dispositivo é inserido e expandido devido ao aquecimento graças a temperatura do sangue. Ainda na área médica (GAVINI et al., 2018) aponta o uso de ferramentas feitas com ligas de NiTi para procedimentos na área da Endodontia.



A grande maioria das pesquisas utiliza ligas NiTi praticamente equiatômicas ou ricas em titânio, devido a características especiais, como as excelentes propriedades mecânicas, temperaturas baixas de transformação martensítica, e também a microestrutura bem conhecida (DEZA LUNA, 2008).

A resistência a corrosão das ligas NiTi é superior aquela do aço inox 316L, porém inferior a do titânio em atmosferas naturais e úmidas, entretanto é comum o uso de um filme a base de óxidos/nitretos para aumentar a resistência a corrosão (DEZA LUNA, 2008). A biocompatibilidade, que consiste no fato da liga não influenciar de forma negativa no organismo, para cada liga deve se fazer a avaliação dos componentes de forma a determinar aspectos toxicológicos, alérgicos e cancerígenos. O titânio é altamente biocompatível, em contrapartida o níquel é considerado tóxico e pode provocar alergias e hipersensibilidade. Apesar disso, por não existirem evidências clínicas de que o fio de NiTi seja cancerígeno, e o fato do Titânio ser altamente biocompatível fazem dos fios NiTi um material adequado para usos médicos

O Nitinol é uma liga pouco magnética com excelente capacidade para absorver choques e vibrações, essa capacidade é amplificada uma vez que a fase martensítica absorve até duas vezes mais que a austenítica. Algumas das propriedades mecânicas da liga podem ser observadas na figura 3 abaixo (DEZA LUNA, 2008).

**Figura 3 – Valor das propriedades do Nitinol comparado com outros materiais**

	NiTi		Aço inoxidável	Titânio puro	Ti-6Al-4V
	Austenita	Martensita			
Limite de resistência (MPa)	800 - 1500	103 - 1100	483 – 1850	540 - 740	920 - 1140
Tensão de escoamento (MPa)	100 - 800	50 - 300	190 – 1213	390	830 - 1070
Módulo de elasticidade (GPa)	70 - 110	21 - 69	190 – 200	105 - 110	100 - 110
Elongação (%)	1 – 20	> 60	12 - 40	16	8

**Fonte: Deza Luna (2008).**

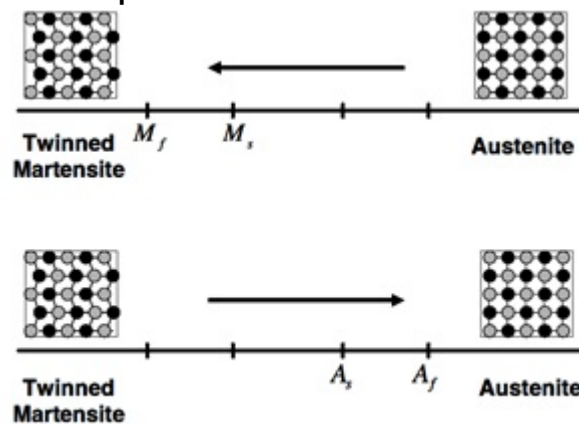
### 2.1.2 Efeito memória de forma (EMF)

O efeito memória de forma (EMF) ocorre devido a uma mudança na estrutura cristalina do material, induzida pela variação de temperatura e tensão, entre duas fases diferentes conhecidas como martensita e austenita (ELAHINIA; ASHRAFIUN, 2002). Essa mudança de fase austenítica para martensítica resulta na alteração da

estrutura cristalina do material, que pode resultar em dois tipos de estruturas diferentes: martensita maclada (diferentes variações de martensita se acomodam) e martensita não maclada (existe uma variante dominante) (VIEIRA, 2013).

Ao ser resfriado sem a presença de uma carga aplicada sobre o sistema, a estrutura cristalina passa de austenita para martensita maclada. De maneira semelhante, o aquecimento da LEMF resultará na mudança de martensita para austenita (LAGOUDAS, 2008). O funcionamento desse sistema é exemplificado na figura 4.

**Figura 4 – Transformação de fase induzida pela mudança de temperatura de uma LEMF sem uma carga mecânica aplicada**



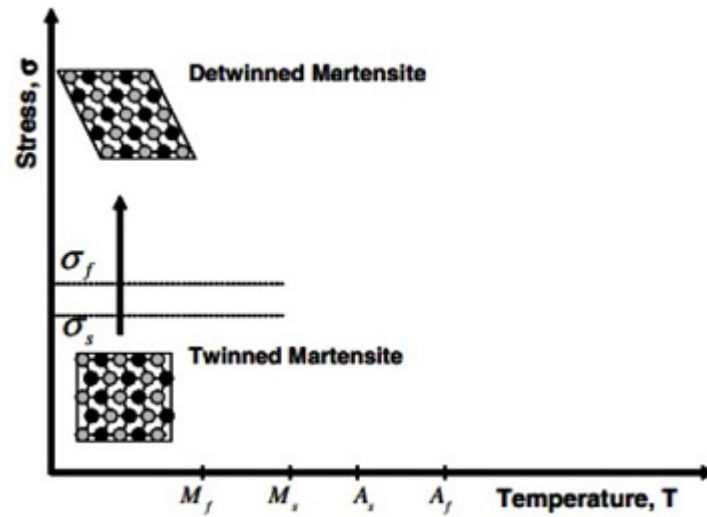
Fonte: Lagoudas (2008).

As temperaturas de início da formação da martensita e final da formação da martensita são representadas pelas temperaturas  $M_s$  e  $M_f$ , respectivamente. De maneira análoga, a temperatura de início da formação de austenita e a temperatura final de formação de austenita são representados pelas temperaturas  $A_s$  e  $A_f$ .

A figura 5 apresenta o processo de mudança das variantes da martensita com uma carga aplicada ao sistema. Se a carga aplicada for suficiente para iniciar o processo de reordenação ( $\sigma_s$ ), a estrutura cristalina resultante será martensita não maclada. A carga ( $\sigma_f$ ) representa a carga necessária para que o processo de reordenação seja completo. O processo completo é representado na figura 6 (LAGOUDAS, 2008).

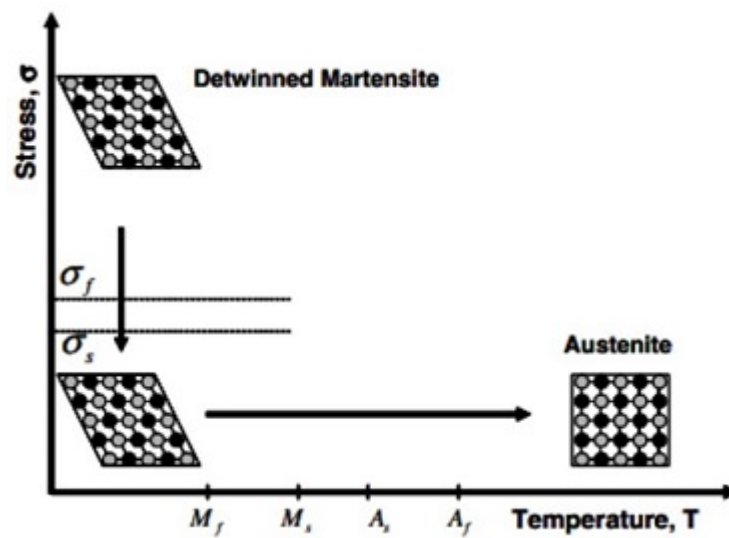
As LEMF podem apresentar o EMF de duas formas diferentes: via única ou via dupla. O EMF de via única ocorre quando o material deformado a uma temperatura inferior a  $M_f$  retorna a sua forma original através do aquecimento a uma temperatura superior a  $A_f$ . É importante ressaltar que a amostra só retorna a sua forma original se a deformação limite ( $\epsilon$ ) da fase martensítica for respeitada (LAGOUDAS, 2008).

Figura 5 – Processo de reorientação da martensita em uma LEMF sob a ação de uma tensão



Fonte: Lagoudas (2008).

Figura 6 – Esquema do efeito memória de forma em uma LEMF, demonstrando o descarregamento e o subseqüente aquecimento para austenita

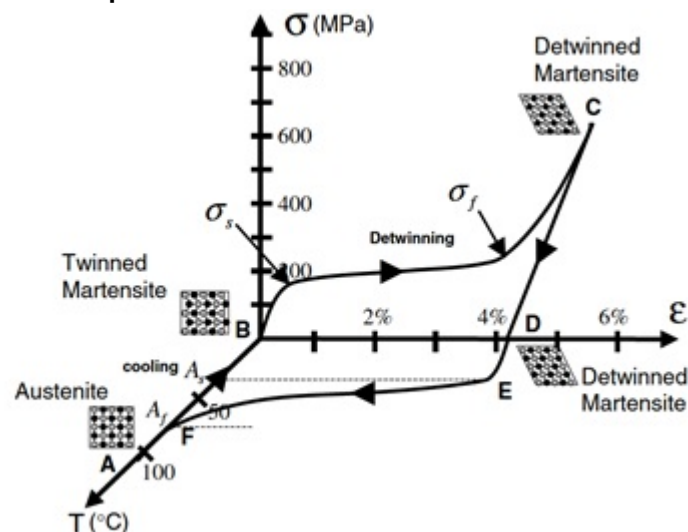


Fonte: Lagoudas (2008).

Desta forma o EMF de via única é considerado irreversível, pois a LEFM só retorna a sua forma de alta temperatura, entretanto não é possível retornar a sua forma deformada quando o material é resfriado. Já o EMF de via dupla é caracterizado pela reversibilidade do processo de deformação, pois o material consegue “lembrar-se” do seu formato original e do seu formato deformado, quando este é aquecido ou resfriado (ZHANG; ROGERS, C.; LIANG, 1992).

O EMF de via única para uma liga NiTi é representado na figura 7. O gráfico mostra o comportamento da liga com a variação da tensão e da temperatura, além de relacionar ambas com a deformação.

**Figura 7 – EMF de via única para uma liga NiTi demonstrado em um diagrama tensão x deformação x temperatura.**



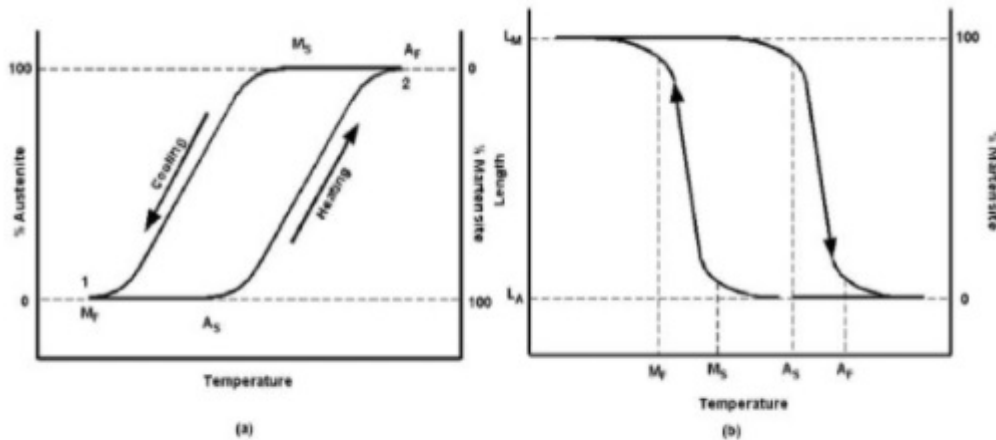
Fonte: Lagoudas (2008).

### 2.1.2.1 Histerese

A histerese nas LEMF representa de forma macroscópica a energia dissipada pelas mudanças nas estruturas cristalinas do material. O processo de histerese nas LEMF é caracterizado por um dado de entrada que resulta em múltiplas respostas no material. Além disso, a resposta produzida pelo sistema é definida tanto pelo estímulo atual como pelos estímulos anteriormente realizados (ORTIN; DELAEY, 2002). A figura 8 demonstra a histerese de temperatura em uma liga NiTi. A dissipação de energia resultante do atrito entre as fases martensítica e austenítica, assim como a energia dissipada pela ocorrência de defeitos de formação faz com que o processo de mudança

de fase seja termicamente irreversível (CONSTANTINOS; PFEIFFER; MOSLEY, 1999).

**Figura 8 – Loop de histerese em uma LEMF**



**Fonte: Constantinos, Pfeiffer e Mosley (1999).**

### 2.1.2.2 Superelasticidade

A superelasticidade ou pseudo elasticidade está diretamente relacionada a resposta isotérmica que as LEMF apresentam quando submetidas a uma carga mecânica. Quando o material é deformado acima de uma temperatura  $A_f$  a resposta elástica da austenita provoca um aumento de tensão no sistema. Entretanto, quando a tensão atinge um valor crítico ocorre a formação de martensita. O volume de martensita aumenta quanto maior a deformação. Após a transformação completa, qualquer aumento de tensão derivado da deformação é produto da resposta elástica da martensita (SIMHA; SREEKANTH; SIVA, 2017). A transformação austenita- martensita induzida por tensão, não deve ultrapassar o limite de escoamento da fase martensítica.

De forma semelhante, com o descarregamento ocorre a transformação inversa de martensita para austenita, até a total conversão do material. Uma vez que a transformação esteja completa, o descarregamento é produto da resposta elástica da austenita (LAGOUDAS, 2008).

Ambas as transformações permitem que o material absorva energia na forma de tensão, permitindo que o mesmo continue operando em regime elástico (LAGOUDAS, 2008).

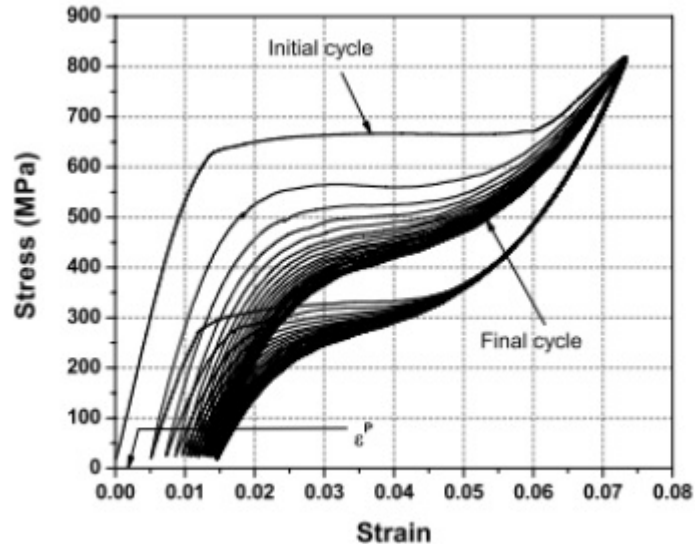
### 2.1.2.3 Treinamento

As LEMF podem exibir padrões de mudança de forma quando submetidas a um ciclo termomecânico sem uma carga mecânica aplicada. A repetição deste ciclo seguindo um caminho de carregamento específico diversas vezes pode acarretar em mudanças na microestrutura do material e conseqüentemente mudanças permanentes no comportamento do mesmo. Essas mudanças permanentes na microestrutura do material são responsáveis pelo EMF de via dupla (LAGOUDAS, 2008).

O procedimento de treino de uma LEMF busca a estabilidade da histerese do material, bem como a saturação da deformação inelástica. Para isso o treinamento consiste em aplicar uma carga ao material e seguir um caminho de carregamento termomecânico cíclico (LAGOUDAS, 2008).

A figura 9 exemplifica o treinamento do material, com cada ciclo executado histerese de tensão diminui.

**Figura 9 – Resposta pseudo elástica de um liga de NiTi**



Fonte: Lagoudas (2008).

## 2.2 MODELAGENS MATEMÁTICAS

### 2.2.1 Modelo de Tanaka

O modelo unidimensional de mudança de fase martensítica proposto por Tanaka (1986) se restringe apenas a transformação de fase martensítica por indução e se baseia na suposição de que o processo termomecânico pode ser totalmente descrito por três variáveis: tensão, temperatura e fração martensítica. Tanaka (1986) propôs uma equação constitutiva com foco na redução da energia livre de Helmholtz:

$$\dot{\sigma} = D\dot{\epsilon} + \Theta\dot{T} + \Omega\dot{\xi} \quad (1)$$

onde,  $D$ ,  $\Theta$  e  $\Omega$  representam, respectivamente, o módulo de Young, tensor termoelástico e tensor de transformação. Os termos  $\epsilon$ ,  $T$  e  $\xi$  representam a deformação, temperatura e fração martensítica volumétrica, respectivamente.

Utilizando o estudo da cinética de transformação, Tanaka (1986) formulou uma equação cinética de transformação de fase exponencial, em função da temperatura e da tensão. A equação 2 descreve a transformação de martensita para austenita e a equação 3 a transformação inversa.

$$\xi_{M \rightarrow A} = \exp[A_a(T - A_s) + B_a\sigma] \quad (2)$$

$$\xi_{A \rightarrow M} = 1 - \exp[A_m(T - M_s) + B_m\sigma] \quad (3)$$

As variáveis  $A_a$ ,  $A_m$ ,  $B_a$  e  $B_m$  representam constantes do material dependentes das temperaturas de transformação  $A_s$ ,  $A_f$ ,  $M_s$  e  $M_f$ .

Através de seu modelo Tanaka mostra, de forma qualitativa, que o EMF e a superelasticidade podem ser descritos por uma combinação dos modelos cinéticos e constitutivos. Este modelo adota as cargas termomecânicas como sendo isotérmicas ou com temperatura variável em condições livres de tensão (TANAKA, 1986).

### 2.2.2 Modelo de Liang e Rogers

O modelo fenomenológico proposto por Liang e Rogers (1997) desenvolve uma nova equação para descrever a cinética de transformação de fase, com o intuito de fornecer uma forma mais precisa de definir o comportamento das LEMF.

Em seu modelo Liang e Rogers adotam a equação constitutiva proposta por Tanaka, mas utilizam a função cosseno para descrever o comportamento da fração martensítica em função da tensão e da temperatura. As equações que descrevem a cinética da transformação de fase para o aquecimento e resfriamento são respectivamente:

$$\xi = \frac{\xi_M}{2} \cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + \frac{\xi_M}{2} \quad (4)$$

$$\xi = \frac{1 - \xi_A}{2} \cos[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] + \frac{1 + \xi_M}{2} \quad (5)$$

onde  $\xi_M$  e  $\xi_A$  são a fração martensítica atingida antes do aquecimento e resfriamento, respectivamente. As variáveis  $a_A$ ,  $b_A$ ,  $a_M$ ,  $b_M$  representam constantes do material que são descritas pelas equações:

$$a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s} \quad (6)$$

$$a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f} \quad (7)$$

$$b_A = -\frac{a_A}{C_M} \quad (8)$$

$$b_M = -\frac{a_M}{C_M} \quad (9)$$

Os termos  $C_A$  e  $C_M$  representam a influência da tensão nas temperaturas de transformação  $A_s$ ,  $A_f$ ,  $M_s$ ,  $M_f$ .

A função cosseno limita o valor do argumento entre 0 e  $\pi$ , o que por consequência restringe os valores de  $T$  (LIANG; ROGERS, C. A., 1997):

$$A_s \leq T \leq A_f \text{ ou } M_f \leq T \leq M_s \quad (10)$$



De forma equivalente, a variação da tensão na mudança de fase martensítica para austenítica e a mudança da fase austenítica para martensítica são definidas, respectivamente, por (LIANG; ROGERS, C. A., 1997):

$$C_A(T - A_S) - \frac{\pi}{|b_A|} \leq \sigma \leq C_A(T - A_S) \quad (11)$$

$$C_M(T - M_f) - \frac{\pi}{|b_M|} \leq \sigma \leq C_M(T - M_f) \quad (12)$$

### 2.2.3 Modelo de Brinson

Brinson (1993) propôs um novo modelo unidimensional para descrever o comportamento das LEMF utilizando a mesma equação constitutiva apresentada por Tanaka. O modelo apresentado por Brinson propôs dividir a fração martensítica em duas componentes: a fração martensítica induzida por temperatura e a fração martensítica induzida por tensão.

$$\xi = \xi_T + \xi_S \quad (13)$$

Desta forma Brinson adaptou das equações apresentadas por Liang e Rogers de forma a incorporar essas duas componentes. A transformação de fase austenítica para martensítica pode ser descrita como,

$$\xi_S = \frac{1 - \xi_{S0}}{2} \left\{ \frac{\pi}{\sigma_S^{crit} - \sigma_f^{crit}} [\sigma - \sigma_f^{crit} - C_M(T - M_S)] \right\} + \frac{1 + \xi_{S0}}{2} \quad (14)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{-1 - \xi_{S0}} (\xi_S - \xi_{S0}) \quad (15)$$

As equações acima apresentadas são válidas para temperaturas superiores a  $M_S$  e  $\sigma_S^{crit} + C_M(T - M_S) < \sigma < \sigma_f^{crit} + C_M(T - M_S)$ . Caso as temperaturas sejam inferiores a  $M_S$  e  $\sigma_S^{crit} < \sigma < \sigma_f^{crit}$ , tem-se que,

$$\xi_S = \frac{1 - \xi_{S0}}{2} \cos \left[ \frac{\pi}{\sigma_S^{crit} - \sigma_f^{crit}} (\sigma - \sigma_f^{crit}) \right] + \frac{1 + \xi_{S0}}{2} \quad (16)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{S0}} (\xi_S - \xi_{S0}) + \Delta T \quad (17)$$

onde,

$$\Delta T = \frac{1 - \xi_{T0} \{ \cos[a_M(T - M_f)] + 1 \}}{2} e 0, \text{ para os demais casos} \quad (18)$$

A transformação de fase martensítica para austenítica é descrita, para temperaturas superiores a  $A_S$  e  $C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_S)$ , é definida por:

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos\left[a_A\left(T - A_S - \frac{\sigma}{C_A}\right)\right] + 1 \right\} \quad (19)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad (20)$$

$$\xi_S = \xi_{S0} - \frac{\xi_{S0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad (21)$$

Substituindo a equação 19 proposta por Brinson (1993) nas equações 20 e 2.21, tem-se que:

$$\xi_S = \frac{\xi_{S0}}{2} \left\{ \cos\left[a_A\left(T - A_S - \frac{\sigma}{C_A}\right)\right] + 1 \right\} \quad (22)$$

$$\xi_T = \frac{\xi_{T0}}{2} \left\{ \cos\left[a_A\left(T - A_S - \frac{\sigma}{C_A}\right)\right] + 1 \right\} \quad (23)$$

Brinson (1993) estabelece  $\sigma_{crit}$  e  $\sigma_{fcrit}$  como tensões críticas para o início e o fim do processo de conversão das variáveis martensítica e  $C_A$  e  $C_f$  são propriedades do material que relacionam entre temperatura e tensões críticas para transformação de fase.

Diferentemente do modelo proposto por Liang e Rogers, o modelo de Brinson (1993) consegue descrever o EMF, pois consegue determinar o comportamento do material durante o processo de reorientação da martensita.

#### 2.2.4 Modelo de Elahinia

Os modelos anteriores funcionam apenas para sistemas que estão sob ação de cargas simples. Entretanto, não funcionam corretamente para prever o comportamento de sistemas submetidos a cargas de temperatura e tensão variando simultaneamente (MOHAMMAD, 2004).

Neste contexto, Elahinia (2004) propõe um novo modelo fenomenológico que busca oferecer uma forma de melhor representar o comportamento das LEMF sob cargas termomecânicas complexas, onde o material está submetido a variações simultâneas de tensão e temperatura.

O modelo aprimorado de Elahinia (2004) é composto por duas partes: a equação constitutiva e a equação de cinética de transformação de fase. A equação constitutiva é a mesma formulada por Tanaka baseada no conceito de energia livre. A equação que caracteriza a transformação de fase se baseia na equação desenvolvida por Liang e Rogers e posteriormente Brinson, alterando os parâmetros para transformação de fase. O modelo resultante consegue caracterizar o comportamento de uma LEMF quando submetida a cargas termomecânicas complexas.

Em seu modelo, Brinson (1993) apresenta condições para a transformação de fase martensítica para austenítica induzidas pelo aquecimento e a transformação reversa devido a descarga.

$$A_S + \frac{\sigma}{C_A} \leq T \leq A_f + \frac{\sigma}{C_A} \quad (24)$$

$$C_A(T - A_S) \geq \sigma \geq C_A(T - A_f) \quad (25)$$

As relações 25 e 26 representam as condições para transformação de fase devido à temperatura e descarga, respectivamente. O modelo de Elahinia (2004) descreve a condição para a transformação de fase martensita para austenita como,

$$\dot{T} - \frac{\dot{\sigma}}{C_A} > 0 \text{ e } A_S + \frac{\sigma}{C_A} < T < A_f + \frac{\sigma}{C_A} \quad (26)$$

De forma análoga as condições para o processo de transformação de fase austenita para martensita é dada por,

$$\dot{T} - \frac{\dot{\sigma}}{C_M} > 0 \text{ e } M_f + \frac{\sigma}{C_M} < T < A_S + \frac{\sigma}{C_M} \quad (27)$$

onde,

$$M_{fm} = M_f + \frac{\sigma}{C_A} \quad (28)$$

$$M_{Sm} = M_S + \frac{\sigma}{C_A} \quad (29)$$

$$A_{Sm} = A_S + \frac{\sigma}{C_A} \quad (30)$$

$$A_{fm} = A_f + \frac{\sigma}{C_A} \quad (31)$$

A tabela 1 apresenta um comparativo entre as condições de transformação de fase adotadas pelos modelos de Tanaka, Liang, Brinson e Elahinia.

**Figura 10 – Comparação entre as condições para transformação de fase nos modelos de Tanaka, Liang, Brinson e Elahinia**

Modelo	Transformação Austenita → Martensita	Transformação Martensita → Austenita
Tanaka[11]	$\dot{\sigma} < 0$ $\sigma \leq - (T - A_S) \frac{d\sigma}{B_A}$	$\dot{\sigma} > 0$ $\sigma \geq - (T - M_S) \frac{d\sigma}{B_M}$
Liang e Rogers [12]	$\dot{T} > 0$ $A_f + \frac{\sigma}{C_A} \geq T \geq A_S + \frac{\sigma}{C_A}$	$\dot{T} < 0$ $M_S + \frac{\sigma}{C_M} \geq T \geq M_f + \frac{\sigma}{C_M}$
Brinson [13]	$\dot{\sigma} < 0$ $C_A (T - A_S) \geq \sigma \geq C_A (T - A_f)$	$\dot{\sigma} > 0$ $C_M (T - M_f) \geq \sigma \geq C_M (T - M_S)$
Elahinia [1]	$\dot{T} - \frac{\dot{\sigma}}{C_A} > 0$ $A_f + \frac{\sigma}{C_A} \geq T \geq A_S + \frac{\sigma}{C_A}$	$\dot{T} - \frac{\dot{\sigma}}{C_M} < 0$ $M_S + \frac{\sigma}{C_M} \geq T \geq M_f + \frac{\sigma}{C_M}$

Fonte: Autoria própria (2021).

### 2.2.5 Boyd e Lagoudas

Boyd e Lagoudas (1993) descreveram o comportamento termomecânico de compósitos constituídos por fibras de LEMF ao redor de uma matriz de outros materiais através de um método micromecânico. O modelo proposto por eles se baseia no modelo de Tanaka, adotando a equação da cinética de transformação de fase propostas pelo mesmo.

### 2.2.6 Ivshin e Pence

O modelo fenomenológico unidimensional adotado por Ivshin e Pence (1994) ignorava o processo de orientação e reorientação da martensita, pois a tensão aplicada tende a formar uma variante preferencial de martensita. Ivshin e Pence (1994) também introduziram a fração austenítica como uma nova variável.

A equação que descreve a cinética da transformação de fase se baseia em duas variáveis para modelar o efeito da temperatura e da tensão no material: a influência da temperatura na mudança de fase e o efeito da tensão na cinética de transformação (IVSHIN; PENCE, 1994).

### 2.2.7 Prahlad e Chopra

O modelo de Prahlad e Chopra (1999) descreve o comportamento das LEMF de forma experimental quando estas estão submetidas a cargas termomecânicas complexas. Eles realizaram testes de tensão a temperaturas constantes onde a LEMF se encontra no estado de martensita orientada ou austenita.

Em seus testes Prahlad e Chopra (1999) conseguiram observar o EMF e a superelasticidade, além de demonstrar que tensões críticas e a temperatura se alteram com uma deformação mais rápida

## 2.3 CONTROLE

O desenvolvimento de um controle é uma das etapas mais importantes para o desenvolvimento de um atuador que utilize as LEMF. Atualmente existem três principais campos de pesquisa: modulação por largura de pulso, controle linear e controle não linear (MOHAMMAD, 2004).

### 2.3.1 Modulação por largura de pulso

O PWM (do inglês pulse width modulation) é um método que consiste na variação da duração do sinal de entrada, o que permite o controle da energia fornecida ao sistema elétrico. No caso das LEMF a transformação de fase pode ser induzida pela

dissipação de calor pelo efeito joule, caso uma corrente seja aplicada no material (KIM et al., 2017).

Kim et al.(2017) demonstraram a possibilidade de se controlar atuadores de LEMF utilizando o PWI, conseguindo atingir uma redução de 58,8% no consumo de energia dos atuadores.

### 2.3.2 Controle Linear

Devido à ocorrência da histerese, controladores como PI, PD e PID são os mais recomendados para atuadores que utilizam as LEMF (PICCIRILLO, 2012).

Em seu trabalho, Kha e Ahn [18] demonstram que um controlador PDI auto corretivo utilizando a lógica difusa (fuzzy) é capaz de compensar de forma eficiente os efeitos da histerese no sistema.

Hull et al. (2004) propôs utilizar energia radiante para induzir a transformação de fase em LEMF de forma controlada. A energia radiante era concentrada por uma lente na barra composta por uma LEMF, o que iniciava a mudança de fase. Para controlar a transformação, Hull et al (2004) optou pelo uso de um controlador PI.

#### 2.3.2.1 Controle não linear

Elahinia e Ashrafiuon (2002) apresentaram um controlador não linear para um braço robótico com um grau de liberdade, utilizando o controle de estrutura variável. O modelo apresentado foi capaz de eliminar a resposta excessiva exibida pelo sistema quando métodos mais simples de controle foram aplicados.

Song et al. (2000) criaram um controlador para um atuador LEMF utilizado em uma viga. Um compensador robusto foi utilizado de forma a compensar os efeitos da não linearidade do sistema, bem como os efeitos da histerese.

Em seu trabalho, (2016) utilizou um algoritmo SDRE (State Dependent Riccati Equation) para modelar o controle de atuadores LEMF para compensar as vibrações de uma estrutura flexível submetida a um movimento giratório. Este tipo de algoritmo permite levar em consideração as não linearidades do sistema, se ajustando a elas.

Buscando um controlador que permitisse compensar as incertezas do modelo matemático, Piccirillo (2012) adotou técnicas de controle de estrutura variável e modos

deslizantes (SMC) para aplicar atuadores LEMF em aeroservoelasticidade.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

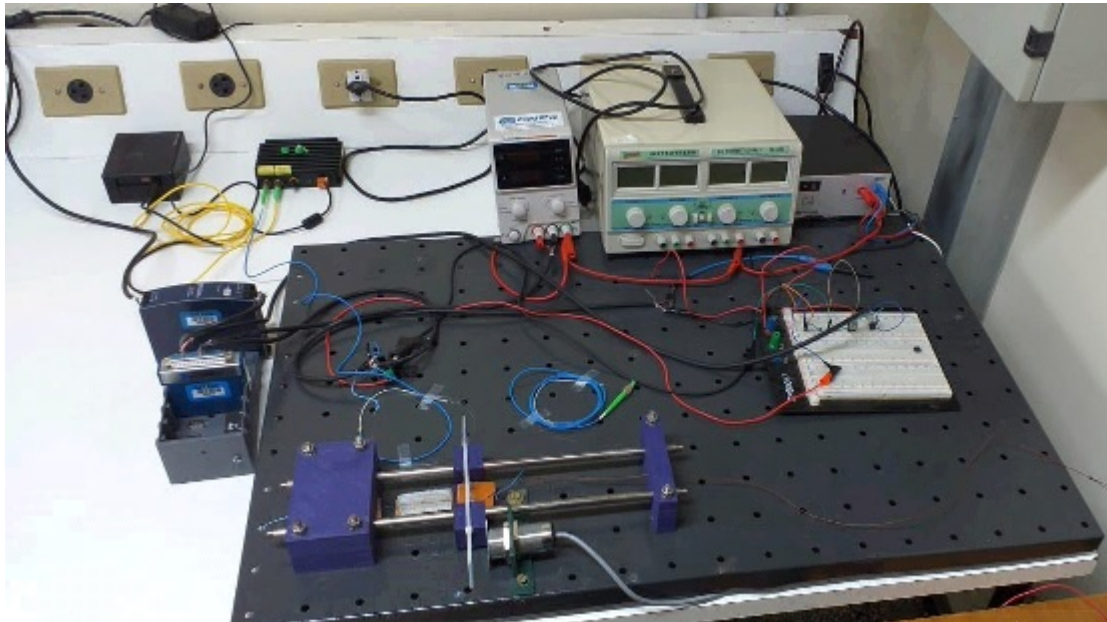
#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Esse projeto de conclusão de curso consiste no desenvolvimento de uma bancada de testes para caracterização de atuadores de LEMF. Neste capítulo é apresentado como a mesma foi projetada e montada, apresentado o projeto em software 3D, a impressão das peças em 3D e a montagem e programação da mesma. Por fim, são apresentados alguns resultados obtidos com a bancada de testes desenvolvida, realizando ensaios em um fio de NiTi de 5cm de comprimento.

A figura 11, apresenta uma imagem da bancada de testes desenvolvida podendo ser visto na mesma todos os componentes que compõem a mesma.

O trabalho foi realizado em parceria com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Especificamente no Laboratório de Sistemas Mecatrônicos (V1-013) cedido pelo Departamento de Eletrônica.

**Figura 11 – Bancada construída e montada**



Fonte: Autoria própria (2019) .



### 3.2 MODELAGEM 3D

O problema para o qual esse trabalho busca uma solução se apresenta da seguinte forma. Os atuadores de LEMF que se deseja caracterizar são fios de NiTi. A atuação dos mesmos consiste em aplicar uma corrente elétrica sobre o fio que irá aquecer por efeito Joule e contrair, podendo essa contração ser de 4 à 7% do seu comprimento total. Sendo assim a bancada de testes de possuir a capacidade de permitir e monitorar essa deformação, além de permitir a colocação de pesos afim de analisar a deformação com relação a força gerada pela LEMF.

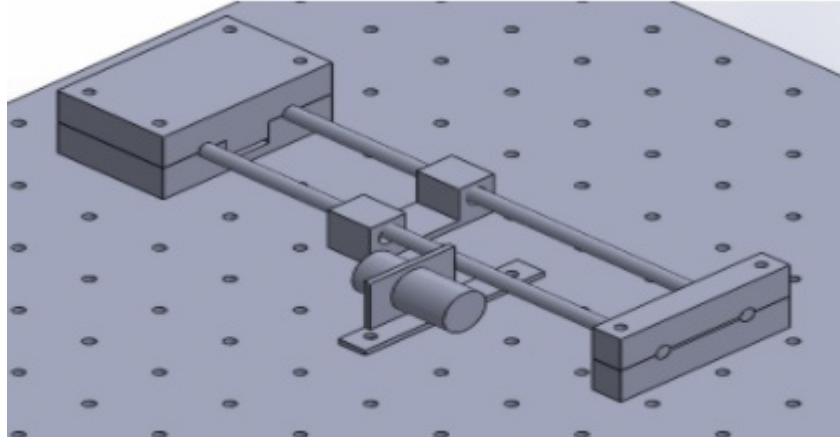
Inicialmente, o problema foi analisado com o intuito de analisar o problema e propor uma solução para o mesmo. Para tal idealizou-se um sistema composto por duas guias lineares cilíndricas e paralelas suportadas e fixadas em suas extremidades. Um suporte móvel foi proposto para deslizar sobre as guias lineares, sendo que o atuador de LEMF é fixado a um dos suportes fixos e ao suporte móvel, permitindo que o atuador contraia e retorne a sua posição original. O atuador escolhido foi um fio de 500 mm de comprimento e 0,375 mm de diâmetro, suas especificações se encontram no datasheet no apêndice A desse trabalho.

Após realizar a uma análise do problema, e verificar os equipamentos disponíveis para montagem da bancada, iniciou-se a modelagem 3D das peças e suportes dos sensores para montagem da mesma.

O desenho, projeto e modelagem das peças foi feita no SolidWorks 2018. No software foi realizado o desenho da mesa utilizada para fixação dos suportes, da qual as medidas foram previamente coletadas. Na sequência, as outras peças foram desenhadas, tomando como base os furos de fixação da mesa. Após as peças terem sido modeladas, as mesmas foram colocadas sobre a mesa a fim de validar os desenhos e o projeto da bancada A figura 12 apresenta uma imagem do projeto da bancada feito no SolidWorks.

Após a modelagem 3D, iniciou-se a prototipagem das peças em uma impressora 3D. A impressora utilizada foi desenvolvida por alunos da própria instituição e se encontra no Laboratório de Sistemas Mecatrônicos. Essa impressora é baseada na placa Ramps 1.4. Para fazer o preparo do desenho para a impressão foi utilizado o software Repetier. Após todas as peças terem sido impressas, as mesmas foram montadas sobre a mesa de montagem a parafusadas nas suas respectivas posições conforme mostra a figura

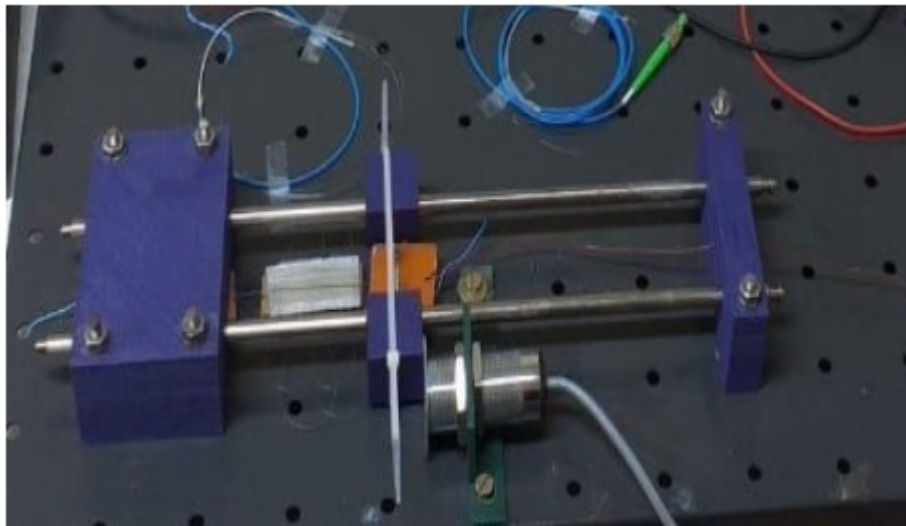
**Figura 12 – Modelo 3D do sistema de suportes para o fio de SMA**



Fonte: Autoria própria (2019) .

13.

**Figura 13 – Sistema de suportes impressos e montados**



Fonte: Autoria própria (2019) .

### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Inicialmente , foi necessário especificar os sensores e circuitos necessários para o monitoramento dos parâmetros que se deseja analisar, sendo esses: a Temperatura do atuador de LEMF, o deslocamento durante a contração e expansão, a corrente aplicada ao atuador. Além disso, também se faz necessário um circuito PWM para controle da corrente aplicada ao atuador.

### 3.3.1 Sensor de deslocamento

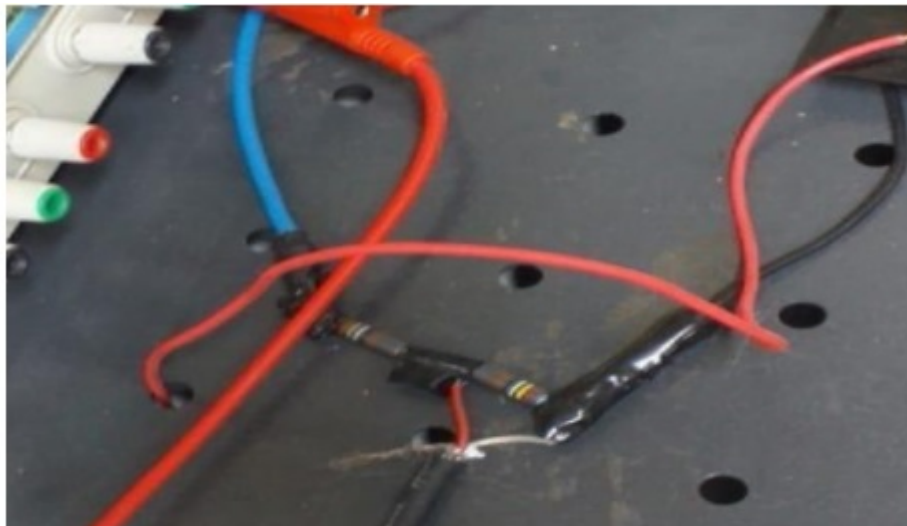
O sensor de deslocamento tem a finalidade de medir o deslocamento do suporte móvel da bancada de testes, na qual o atuador está conectado, sendo assim possível medir a contração do mesmo.

Para tal função, utilizou-se um sensor indutivo analógico SIEA-M30B-UI-S da festo, capaz de medir deslocamento de 0 a 8 mm com alta precisão. Como sensores indutivos detectam apenas materiais metálicos e o suporte foi impresso em plástico, foi necessário fixar uma placa metálica ao mesmo de frente para o sensor.

Esse sensor gera uma saída de tensão proporcional ao deslocamento do suporte móvel, sendo que a mesma varia de 0 a 10 Volts. Isso implica em um problema, pois o sistema de aquisição de dados utilizado no projeto suporta apenas entradas de até 5V. Sendo assim, para solucionar este problema foi montado um divisor de tensão utilizando dois resistores de precisão de 250 ohm's reduzindo a tensão para 0 a 5V mas mantendo a proporcionalidade com o deslocamento.

A figura 3.4 apresenta uma imagem do divisor de tensão montado

**Figura 14 – Fontes de alimentação para os sensores e para o SMA**



Fonte: Aatoria própria (2019) .

### 3.3.2 Sensor de corrente

O sensor de corrente selecionado para a bancada foi o ASC712, figura 15.

Esse sensor possui as seguintes características: faixa de medição de -30A a

**Figura 15 – Sensor de corrente ASC712**



**Fonte:** <https://loja.ioteducation.com.br/sensor-de-corrente-ac712> (2021) .

+30A, alimentação em 5V, tempo de resposta de  $5\mu\text{s}$  e saída analógica proporcional de  $66\text{mV/A}$ .

O mesmo foi instalado em série com o atuador, permitindo assim a medição da corrente aplicada ao atuador, podendo-se assim correlacionar a corrente aplicada com o tempo de atuação e temperatura gerada por efeito Joule no atuador.

### 3.3.3 Sensor de temperatura

A medição da temperatura do atuador é uma das variáveis mais importantes a ser medida para ajustar o modelo matemático, mas devido ao fato do atuador de LEMF utilizado ser constituído de um fio de  $0.375\text{ mm}$  de diâmetro, a medição da temperatura do mesmo se torna um desafio para os sensores de temperatura comumente utilizados como termopares por exemplo.

Tendo em vista essa dificuldade na medição da temperatura, optou-se por utilizar sensores baseados na tecnologia de redes de bragg em fibra óptica, FBG (Fiber Bragg Gratings). Esses sensores são estruturas periódicas de variação de índice de refração gravadas com a utilização de um laser UV e máscaras de fase. Pelo fato da fibra óptica possuir dimensões semelhantes ao diâmetro do atuador e tendo vista que esses sensores possuem alta sensibilidade, os mesmos se tornam ideais para esta aplicação.

Para fazer a leitura do sinal desses sensores é necessário utilizar um equipamento conhecido como interrogador óptico, que no caso deste trabalho foi utilizado o I-MON 256/512 USB, fabricado pela empresa Ibsen Photonics. A figura 16 apresenta

uma imagem desse equipamento.

**Figura 16 – Interrogador óptico I-MON 256/512 USB**



Fonte: <https://ibsen.com/products/interrogation-monitors/i-mon-usb/i-mon-256-512-usb> (2021) .

Esse equipamento foi integrado ao software de aquisição de dados utilizando a comunicação USB do mesmo e um driver para integração com o LabView.

#### 3.3.4 Circuito PWM

Com o intuito de controlar o acionamento e a corrente elétrica aplicada sobre o atuador de LEMF, foi desenvolvido um circuito para integrar uma saída PWM do sistema de controle ao atuador. Isso se faz necessário pelo fato de as saídas PWM do sistema de controle não suportarem alta corrente, sendo assim necessário uma fonte externa.

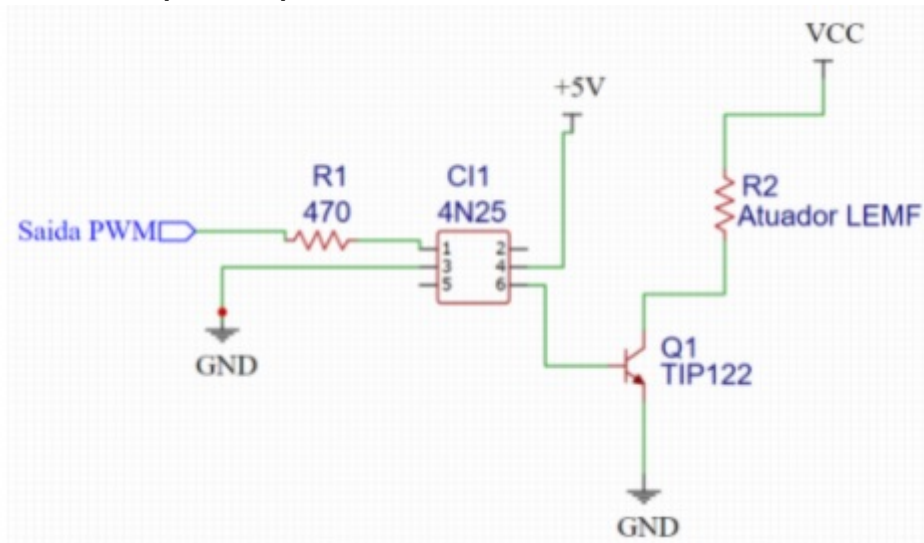
Para chavear a corrente aplicada ao atuador um circuito de chaveamento foi desenvolvido baseado em um transistor de potência TIP122 como chave e um optoacoplador 4N25 como circuito de isolamento óptico para proteção do sistema de controle. Uma imagem do circuito pode ser vista na figura 17.

No circuito da figura 17, o transistor TIP122 é utilizado como chave permitindo que se acione e desacione o atuador de LEMF que está em série com o mesmo. Esse transistor é utilizado pelo fato de até 5A e pela sua simplicidade de acionamento.

O circuito integrado 4n25 é um optoacoplador, sendo o mesmo utilizado para isolar o circuito de potência, ou seja as altas corrente, do sistema de controle que não suporta correntes altas. Esse componente faz o acoplamento entre o sinal de controle e o transistor de potência através de um sinal óptico, isolando assim o sistema de controle e protegendo o mesmo de possíveis sobrecorrentes.

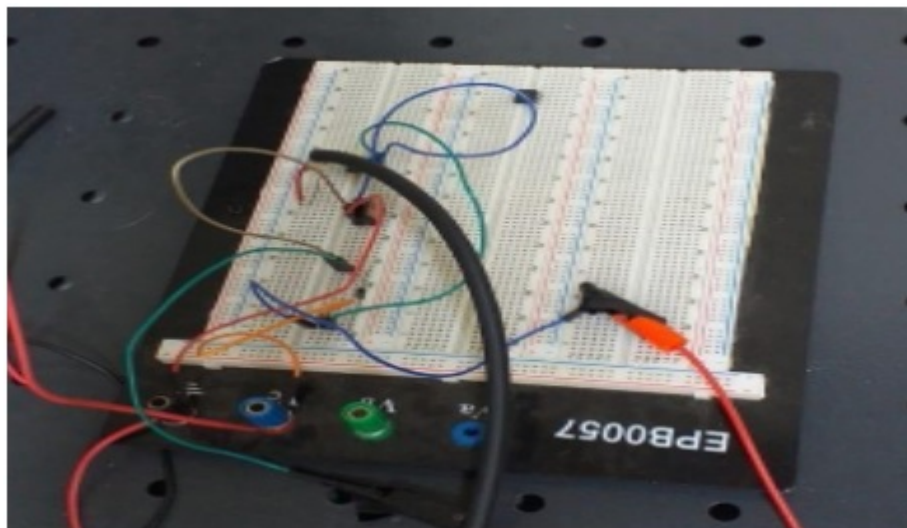
A figura 18 apresenta uma imagem desse circuito montada em uma protoboard.

Figura 17 – Circuito de potência para controle do atuador



Fonte: Aatoria própria (2019).

Figura 18 – Imagem do circuito de PWM montado em protoboard



Fonte: Aatoria própria (2019).

### 3.3.5 Sistema de controle e monitoramento

Para controle e aquisição dos dados dos atuador e dos sensores respectivamente, foi utilizado um controlador CompactRio 9063 da National Instruments, composta por um CPU dual-core de 667 MHz, FPGA Zynq-7020, DRAM de 256 MB, armazenamento de 512 MB, 4 slots, sendo um desses slots preenchido com módulo multifuncional, composto por 4 entradas analógicas, 8 saídas analógicas, 4 entradas/saídas digitais, 0 V a 5 V, conforme pode ser visto na figura 19. Por se tratar de um hardware flexível e programável é possível montar qualquer tipo de estrutura de aquisição de dados



e controle. Sendo assim os sensores foram conectados às entradas analógicas do mesmo e o PWM é gerado através de uma saída digital.

**Figura 19 – CompactRIO utilizada para processamento e controle da bancada**



Fonte: Aatoria própria (2019).

A programação do controlador é feita através do software LabView 2014, sendo que para essa bancada foram criados dois programas, um que é embarcado dentro do FPGA do controlador, e outro que roda no computador fazendo a aquisição, apresentação e arquivamento dos dados, ou seja, uma interface homem-máquina.

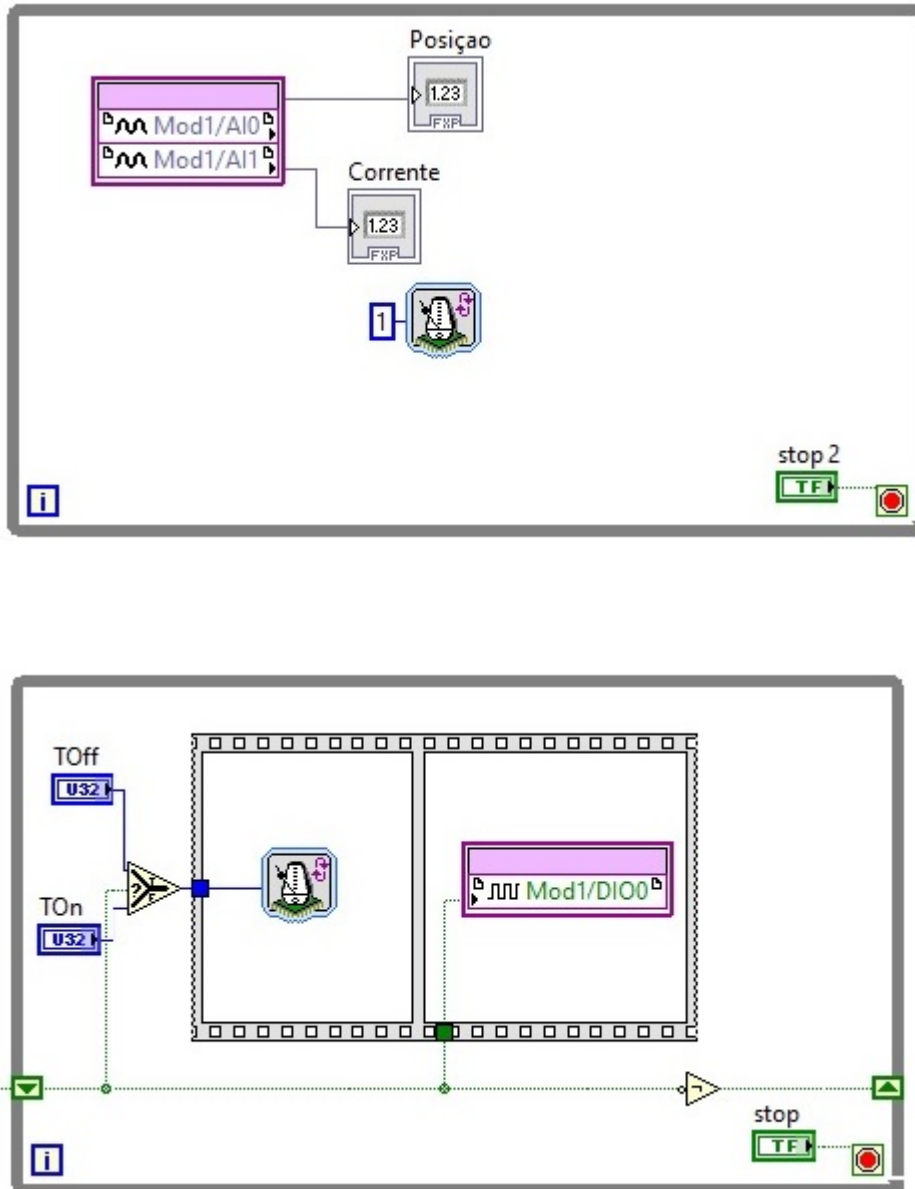
O programa embarcado na FPGA, é responsável por configurar e controlar as saídas do controlador e por enviar os dados lidos ou escritos do computador para o controlador e vice-versa, além de gerar o sinal de PWM para controle da corrente que será aplicada ao atuador. A figura 20 apresenta uma imagem desse programa.

Esse programa é dividido em dois loops While, sendo o primeiro responsável por adquirir os dados de corrente e posição e enviar os mesmos para o computador a cada um milissegundo. O segundo loop While, é responsável por gerar o PWM baseado no Duty Cycle configurado no programa que roda no computador. O mesmo é atualizado a cada Tick Count. Considerando que este controlador trabalha até 40MHz cada Tick Count equivale a 40000000 ticks por segundo.

O segundo programa, que roda no computador, funciona como interface homem-máquina. Uma imagem da tela que apresenta o gráfico de deslocamento é mostrada na figura 21.

Na figura 22 podemos ver o diagrama de bloco do programa da IHM.

Figura 20 – Programa embarcado na CompctRio



Fonte: Autoria própria (2019).

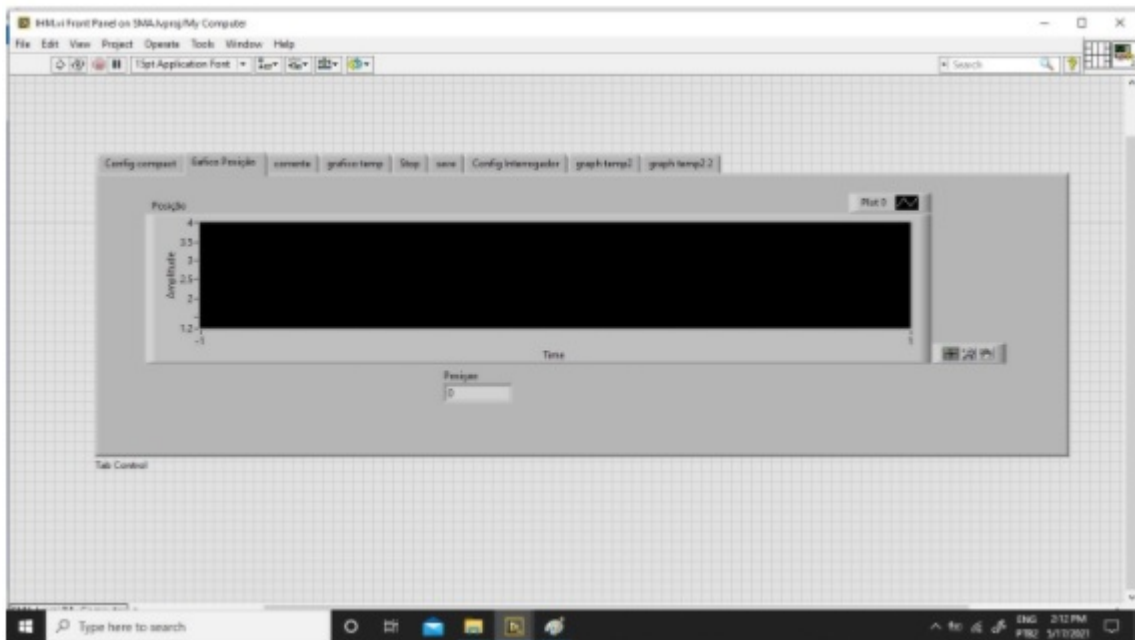
Esse programa além de apresentar os valores medidos em tempo real, e permitir a configuração do experimento, também é responsável por armazenar os dados coletados em um arquivo de texto, que pode posteriormente ser processado através de diversos softwares como por exemplo o OriginLab, Matlab, Excel, etc.

### 3.3.6 Alimentação

Além de todos os componentes já mencionados, foram utilizadas também três fontes de alimentação, sendo uma para alimentação em 5V dos sistemas lógicos como

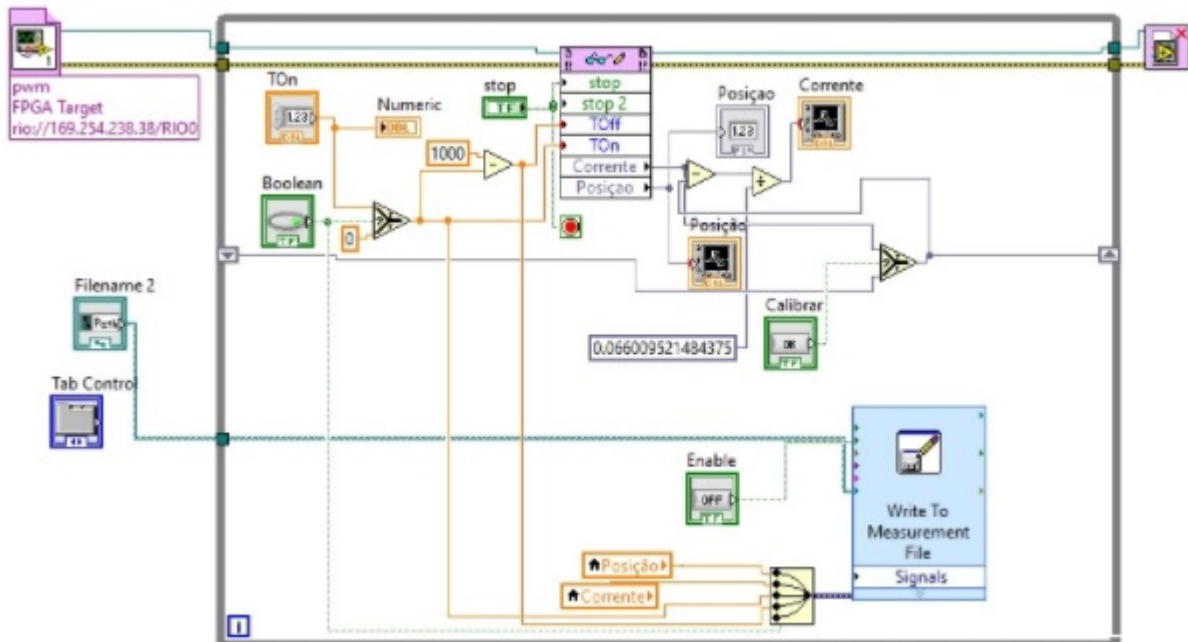


Figura 21 – Interface Homem-Máquina



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 22 – Diagrama de Blocos da Interface Homem-Máquina



Fonte: Autoria própria (2019).

sensor de corrente e o circuito de PWM, outra para alimentação da LEMF, e outra para alimentação do sensor indutivo em 24V. Uma imagem da montagem das fontes pode ser vista na figura 23.

**Figura 23 – Fontes de alimentação da bancada de testes**



Fonte: Autoria própria (2019).

### 3.4 VALIDAÇÃO E MÉTODO DE COLETA DE RESULTADOS

Para coleta de dados, foram realizados quatro experimentos em dois estados diferentes de tensão, sendo eles o de 1.5V, e 1.7V. Também foi variada a carga aplicada no fio. Sendo a de 4,905N e a de 6,897N, com pesos de 500 gramas e 700 gramas, estando sujeito a ação da gravidade perpendicularmente ao sistema.

Realizou-se então a coleta dos dados 1.5V e 500 gramas, aplicando a corrente e esperando até o fio estabilizar na nova posição, variada por causa da mudança de temperatura. Assim, quando o fio atingia a contração máxima, a aplicação da tensão era cessada e o fio começava a esfriar, voltando ao estado inicial. Espera-se até a estabilização da posição e então a coleta de dados é finalizada. Esse processo foi realizado combinando as massas com as tensões.

### 3.5 MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Assim como em (MOHAMMAD, 2004) o comportamento termodinâmico do fio de NiTi pode ser descrito aquecimento através do efeito Joule e de convecção natural

do fio com a atmosfera. Esse balanço está descrito na equação 2.32 abaixo:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = I^2 R - h_c A_c (T - T_{in}) \quad (32)$$

Onde,  $I$  representa a corrente elétrica aplicada no fio,  $R$  é a resistência por unidade de comprimento,  $h_c$  é o coeficiente de convecção,  $T$  é a temperatura do fio e  $T_{\infty}$  é a temperatura do ambiente. As equações 2.33 e 2.34 representam, respectivamente a massa por unidade de comprimento do fio e a área circunferencial, onde  $\rho$  é a densidade do fio e  $d$  o diâmetro do mesmo.

$$m = \rho \pi \frac{d^2}{4} \quad (33)$$

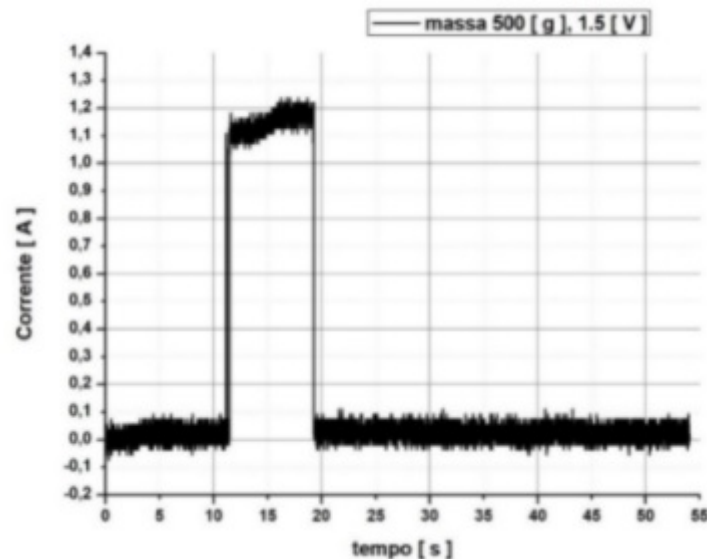
$$A_c = \pi d \quad (34)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CORRENTE, TEMPERATURA, POSIÇÃO X TEMPO

Primeiro podemos observar a reação do fio mediante a aplicação da tensão. No Gráfico apresentado na figura 24 podemos ver o tempo de aplicação da corrente com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V. O gráfico mostra o instante em que a corrente é aplicada de maneira controlada e monitorada mediante ao sensor utilizado no sistema.

**Figura 24 – Gráfico de aplicação de Corrente x Tempo com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V**

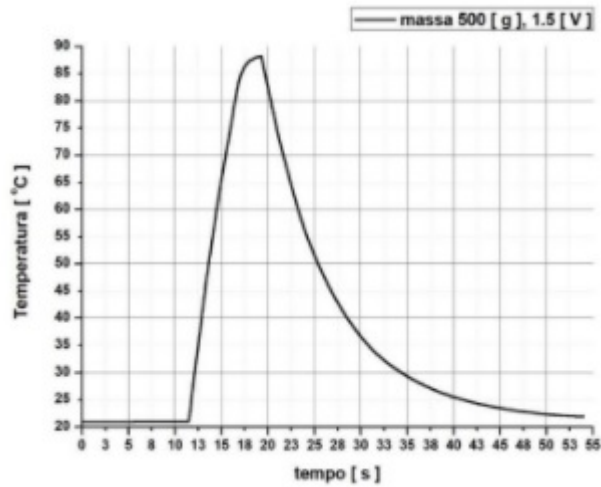


Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 25 podemos observar como o fio se comportou diante dessa aplicação dessa corrente, quase que instantaneamente após a aplicação da corrente ocorre sua mudança de temperatura. Também conseguimos observar a diferença de comportamento no aquecimento e no resfriamento. A taxa com que sobe a temperatura é muito maior do que a taxa com que ela desce. Essa é uma característica da nossa bancada que se utiliza da aplicação de corrente para aquecer o material por meio do efeito Joules enquanto o resfriamento acontece por transferência de calor por convecção, pois no momento em que se cessa a aplicação da corrente o efeito Joules cessa também e temos a troca de calor do fio com o ambiente, como o fio chega à temperatura de cerca de 90 °C e a temperatura ambiente é cerca de 25 °C temos então o resfriamento do fio.

Ao passo que o fio esfria, temos também a parte chave do trabalho, que é a

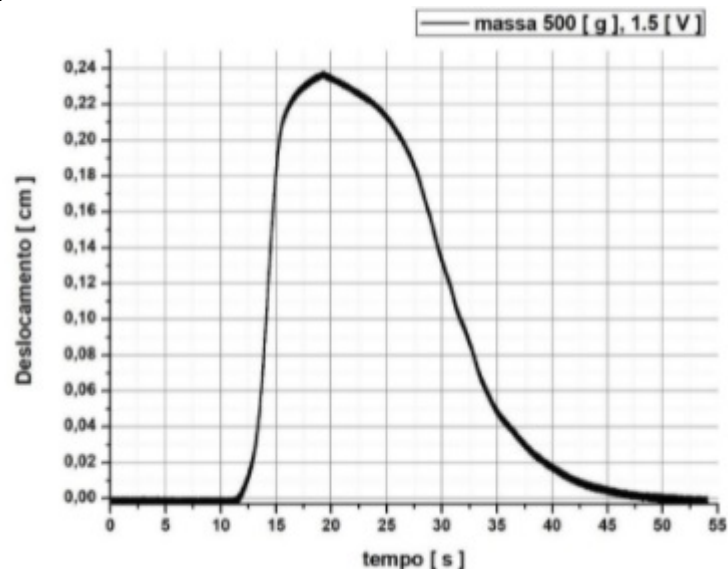
Figura 25 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Tempo com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V



Fonte: Autoria própria (2019).

variação de posição do fio, evidenciando sua contração, no momento em que ocorre o aquecimento e sua expansão no momento em que ocorre o resfriamento. Isso se dá, principalmente, pelo efeito de memória de forma, discutido anteriormente no trabalho. A Figura 26, mostra exatamente essa variação de posição, captada pelo sensor de posição da bancada.

Figura 26 – Gráfico de aplicação de Deslocamento x Tempo com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V

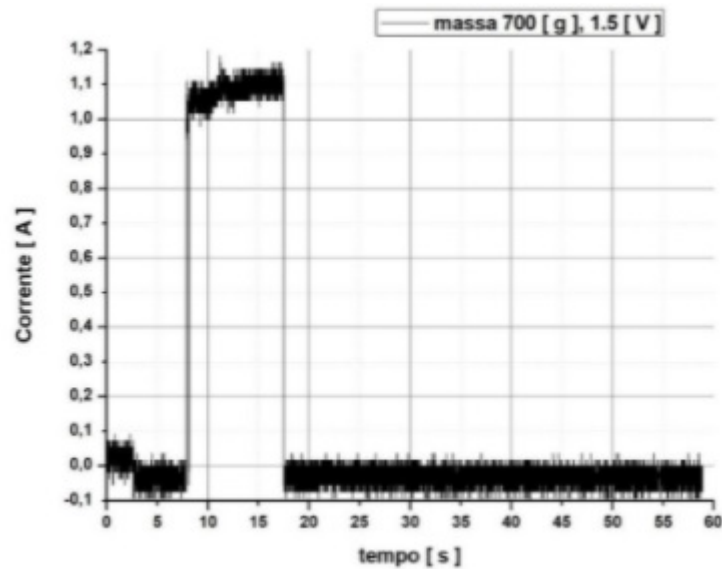


Fonte: Autoria própria (2019).

Também conseguimos perceber que, pouco antes dos 20 segundos, momento em que a corrente cessa, o fio reage quase que instantaneamente e começa se deslocar de volta a seu estado inicial.

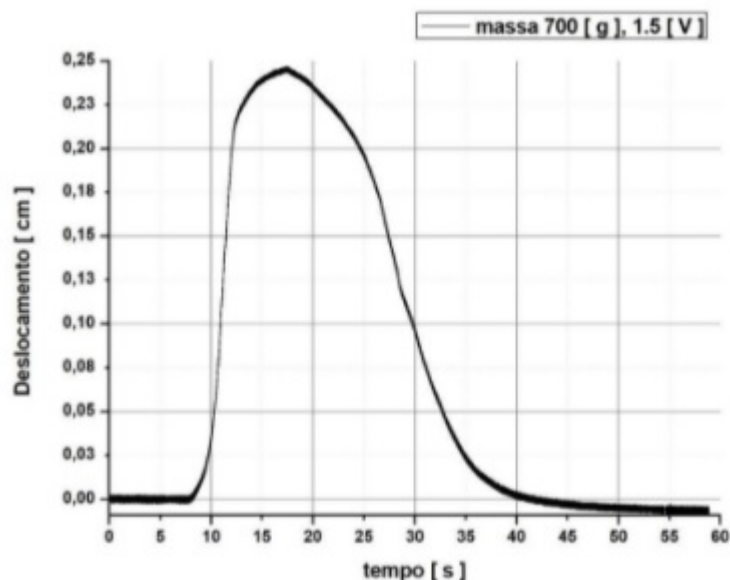
Esse comportamento se repetiu quando variamos a massa. Mostrando nas Figuras 27, 28 e 29, temos o comportamento mostrado pelo fio com a tensão aplicado pela massa de 700 gramas.

Figura 27 – Gráfico de aplicação de Corrente x Tempo com massa de 700 gramas e tensão de 1.5V



Fonte: Autoria própria (2019).

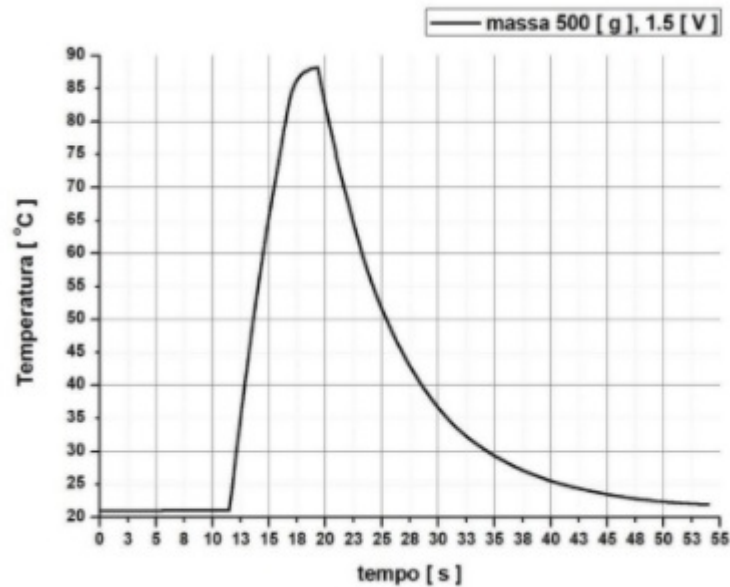
Figura 28 – Gráfico de aplicação de Deslocamento x Tempo com massa de 700 gramas e tensão de 1.5V



Fonte: Autoria própria (2019).

As diferenças entre a variação da massa serão discutidas no tópico 4.3.

**Figura 29 – Gráfico de aplicação de Deslocamento x Tempo com massa de 700 gramas e tensão de 1.5V**



Fonte: Autoria própria (2019).

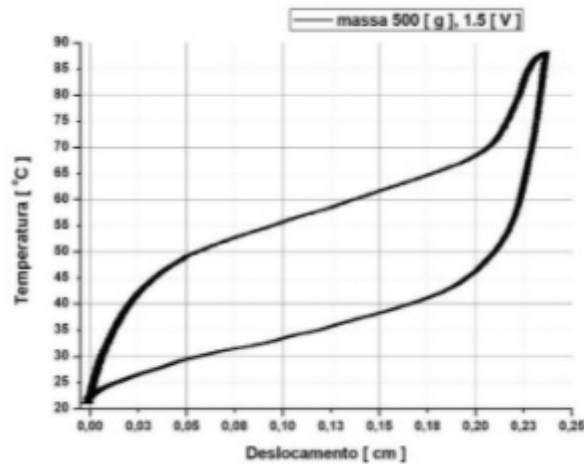
#### 4.2 FORMAÇÃO DA HISTERESE

Como foi observado no tópico anterior, a bancada permite obter resultados da variação de temperatura e deslocamento. Os gráficos anteriormente citados são gráficos que isolam essas duas variáveis e evidenciam – na em relação ao tempo. No entanto, não conseguimos observar com clareza o comportamento gráfico do fio característico e esperado. Para que se possa então entender esse fenômeno de memória de forma, temos que relacionar a temperatura com o deslocamento, pois, é a partir dessa relação possibilitada pelo modelo de Brinson e pelas condições de Elahinia que conseguimos observar a memória de forma na Figura 30 e na Figura 31.

#### 4.3 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TENSÃO E DA CORRENTE NO SISTEMA

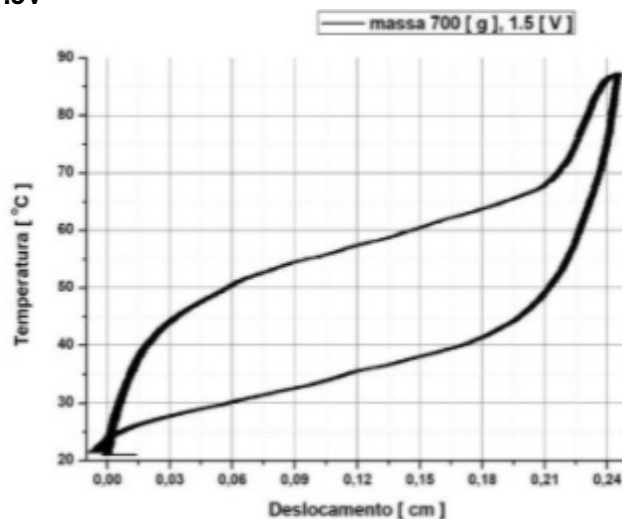
Por meio dos resultados obtidos na bancada e também pelo modelo matemático podemos então compreender a formação da histerese no fio de Nitinol utilizado. Esse comportamento é visto em ambos os sistemas (massa de 500 gramas e 700 gramas) mostrando que é possível replicar o sistema em diferentes variáveis. Também conseguimos ver a formação da histerese e, conseqüentemente, o comportamento de memória de forma em faixas diferentes de tensão, como a de 1.7V.

Figura 30 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Deslocamento com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 31 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Deslocamento com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V



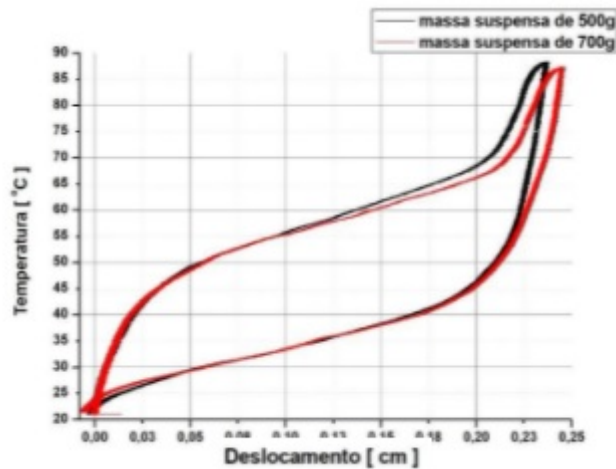
Fonte: Autoria própria (2019).

Na Figura 32, é possível observar como o gráfico se desloca para direita com o aumento da massa. Isso se dá, principalmente pelo aumento da tensão no fio, aumento esse que favorece a transformação de fase e aumenta o deslocamento no momento do aquecimento do fio.

Esse favorecimento da tensão na transformação de fase ocorre, principalmente por conta de a tensão maior deformar o retículo cristalino do material facilitando o movimento atômico e provocando a mudança de fase, deslocando o gráfico para a direita. No entanto, podemos observar no final do gráfico que, com o resfriamento, as linhas praticamente se sobrepõem, mostrando que a influência da tensão se dá mais na região de predominância da austenita, enquanto na região da martensita essa influência



**Figura 32 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Deslocamento com massa de 500 gramas e tensão de 1.5V**



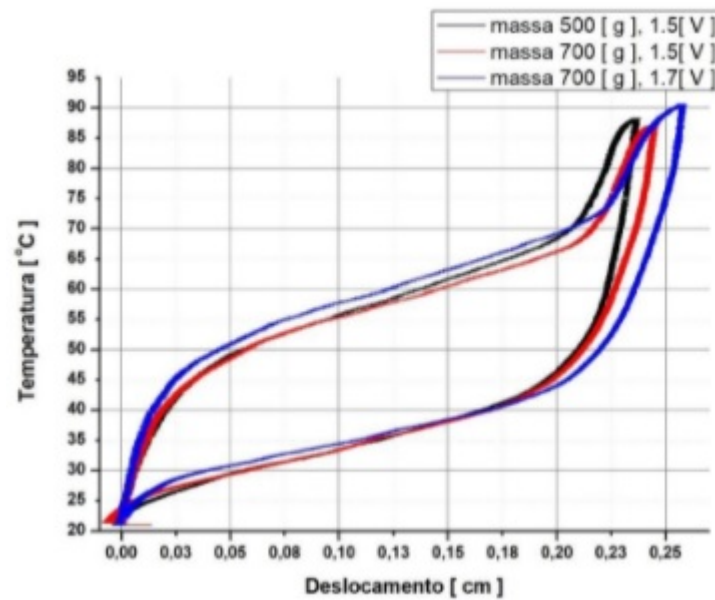
**Fonte: Aatoria própria (2019).**

é bem menor.

Além da influência da tensão aplicada por carga, temos também a influência da corrente, como podemos ver na Figura 4.3.2. Assim como o modelo prevê, podemos observar que no sistema de 1.7V é alcançado maiores temperaturas, isso dá, principalmente, pelo aumento de corrente que ocorre no sistema. Esse aumento de corrente esta diretamente ligado a temperatura do sistema por conta do efeito Joules fazendo com que o gráfico se desloque ainda mais para a direita, fazendo com que ocorra deslocamento ainda maiores. Pode-se observar com clareza quando se olha para a linha azul e a linha vermelha da Figura 33, ainda que esteja com a mesma tensão aplicada, a variação de tensão favorece a transformação de fase, favorecendo o deslocamento do sistema.

No entanto, de novo, podemos observar que esse efeito se dá, principalmente na região em que predominantemente tem – se a fase austenítica enquanto na fase martensítica as linhas novamente quase se sobrepõem, diminuindo a influência da corrente nesta fase.

Figura 33 – Gráfico de aplicação de Temperatura x Deslocamento com massas de 500 gramas e 700 gramas com tensões de 1.5V e 1.7V



Fonte: Autoria própria (2019).

## 5 CONCLUSÕES

Conforme os resultados apresentados podemos concluir que a bancada oferece condições de caracterizar o fio com fidelidade, obtendo gráficos que se parecem muito com o esperado do teórico. Podendo obter resultados de corrente, deslocamento e temperatura. Também podemos ver que o programa utilizado junto com a CompactRIO não teve problemas em adquirir, processar e armazenar dados, o que auxilia ainda mais na obtenção dos dados e formação da histerese do fio.

Com relação ao fio e suas características, podemos concluir que o efeito de memória de forma está muito ligado às variações de tensão e temperatura e que essa variação de temperatura pode ser controlada, possibilitando o uso em diversas aplicações.

Uma vez que construída para os ensaios, a bancada foi capaz de caracterizar o fio de NiTi de forma semelhante à prevista na literatura, a mesma pode ser utilizada futuramente no desenvolvimento de um novo modelo matemático para descrever o comportamento de ligas NiTi, permitindo assim uma maior precisão em sua aplicação.

## REFERÊNCIAS

- BOYD, J. G.; LAGOUDAS, D. C. Thermomechanical response of shape memory composites. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS e PHOTONICS. SMART Structures and Materials 1993: Smart Structures and Intelligent Systems. [S.l.: s.n.], 1993. v. 1917, p. 774–790.
- BRINSON, L. C. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. **Journal of intelligent material systems and structures**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 4, n. 2, p. 229–242, 1993.
- CONSTANTINOS, M.; PFEIFFER, C.; MOSLEY, M. Conventional actuators, shape memory alloys, and electrorheological fluids. **Automation, Miniature Robotics and Sensors for Non-Destructive Testing and Evaluation**, 1999.
- DEZA LUNA, W. H. **Estudos para obtenção da liga Niti pelo processo de moldagem de pós por injeção**. 2008. 69 f. Diss. (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, PR, Brasil.
- ELAHINIA, M. H.; ASHRAFIUON, H. Nonlinear control of a shape memory alloy actuated manipulator. **J. Vib. Acoust.**, v. 124, n. 4, p. 566–575, 2002.
- GAVINI, G. et al. Nickel–titanium instruments in endodontics: a concise review of the state of the art. **Brazilian Oral Research**, SciElo, v. 38, n. 67, p. 44–65, 2018. ISSN 1807-3107. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2018.vol32.0067>.
- HULL, P.; CANFIELD, S.; CARRINGTON, C. A radiant energy-powered shape memory alloy actuator. **Mechatronics**, Elsevier, v. 14, n. 7, p. 757–775, 2004.
- IVSHIN, Y.; PENCE, T. J. A thermomechanical model for a one variant shape memory material. **Journal of intelligent material systems and structures**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 5, n. 4, p. 455–473, 1994.
- JANZEN, F. C. **Caracterização, dinâmica não linear e modelagem de atuadores com memória de forma para aplicações em aeroservoelasticidade**. 2016. 100 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, Brasil. Acesso em: 5 dez. 2020.
- JIAO, S. et al. Production of NiTi shape memory alloys via electro-deoxidation utilizing an inert anode. **Electrochimica Acta**, Elsevier, v. 55, n. 23, p. 7016–7020, out. 2010. ISSN 0013-4686. DOI: [10.1016/j.electacta.2010.06.033](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.06.033).
- KHA, N. B.; AHN, K. K. Position control of shape memory alloy actuators by using self tuning fuzzy PID controller. In: IEEE. 2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. [S.l.: s.n.], 2006. P. 1–5.

KIM, M. et al. Pulse width modulation as energy-saving strategy of shape memory alloy based smart soft composite actuator. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Springer, v. 18, n. 6, p. 895–901, 2017.

KOSSOSKI, A. et al. **Thermal control of a shape memory alloy for actuation in the Sommerfeld effect of a non-ideal system**. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

KOSSOSKI, A. et al. Jump attenuation in a non-ideal system using shape memory element. In: EDP SCIENCES. MATEC Web of Conferences. [S.l.: s.n.], 2018. v. 148, p. 03003.

LAGOUDAS, D. C. **Shape memory alloys: modeling and engineering applications**. [S.l.]: Springer, 2008.

LIANG, C.; ROGERS, C. A. One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials. **Journal of intelligent material systems and structures**, TECHNOMIC PUBLISHING CO., INC. 851 New Holland Ave., Box 3535, Lancaster, PA . . . , v. 8, n. 4, p. 285–302, 1997.

MICHELON, M. D. **Estudo para obtenção de fios NiTi através de metalurgia do pó**. 2006. 68 f. Diss. (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, PR, Brasil.

MOHAMMAD, H. E. **Effect of System Dynamics on Shape Memory Alloy Behavior and Control**. 2004. 153 f. Tese (Doutorado) – Virginia Polytechnic Institute e State University, Blacksburg, Virgínia, EUA. Acesso em: 5 dez. 2020.

ORTIN, J.; DELAEY, L. Hysteresis in shape-memory alloys. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, Elsevier, v. 37, n. 8, p. 1275–1281, 2002.

PICCIRILLO, V. **Caracterização, dinâmica não linear e modelagem de atuadores com memória de forma para aplicações em aeroservoelasticidade**. Dez. 2012. 195 f. Tese (Doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil. Acesso em: 5 dez. 2020.

PICCIRILLO, V.; BALTHAZAR, J. M. et al. Application of a shape memory absorber in vibration suppression. In: TRANS TECH PUBL. APPLIED Mechanics and Materials. [S.l.: s.n.], 2016. v. 849, p. 27–35.

PICCIRILLO, V.; GÓES, L. C. et al. Deflection control of an aeroelastic system utilizing an antagonistic shape memory alloy actuator. **Meccanica**, Springer, v. 53, n. 4, p. 727–745, 2018.

PRAHLAD, H.; CHOPRA, I. Experimental characterization of Ni-Ti shape memory alloy wires under complex loading conditions. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS e PHOTONICS. SMART Structures and Materials 1999: Smart Structures and Integrated Systems. [S.l.: s.n.], 1999. v. 3668, p. 604–616.

SAVI, M. A.; MACHADO, L. G. Medical applications of shape memory alloys. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, SciELO, v. 36, n. 6, p. 683–691, fev. 2002. ISSN 1414-431X. DOI: 10.1590/S0100-879X2003000600001.

SIMHA, N.; SREEKANTH, P. R.; SIVA, S. V. *Shape-Memory Alloys*. Elsevier, 2017.

SONG, G.; KELLY, B.; AGRAWAL, B. N. Active position control of a shape-memory-alloy-wire-actuated composite beam. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS e PHOTONICS. *SMART Structures and Materials 1999: Mathematics and Control in Smart Structures*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 3667, p. 755–766.

TANAKA, K. A thermomechanical sketch of shape memory effect: one-dimensional tensile behavior. *RES MECHANICA*, 1986.

VIEIRA, V. T. L. *Flexibilidade e resistência à fadiga de instrumentos endodônticos de NiTi*. Rio de Janeiro, 2013.

WEBB, G. V.; LAGOUDAS, D. C.; KURDILA, A. J. Hysteresis modeling of SMA actuators for control applications. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, TECHNOMIC PUBLISHING CO., INC. 851 New Holland Ave., Box 3535, Lancaster, PA ..., v. 9, n. 6, p. 432–448, 1998.

YUAN, K. J. et al. Microstructural evolution, mechanical properties, and oxidation performance of highly Ni-rich NiTi alloys with added V using vacuum arc melting. **Journal of Alloys and Compounds**, Elsevier, v. 877, primavera 2021. ISSN 0925-8388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160263>.

ZHANG, X.; ROGERS, C.; LIANG, C. Modelling of the two-way shape memory effect. **Philosophical Magazine A**, Taylor & Francis, v. 65, n. 5, p. 1199–1215, 1992.

**ANEXO A — DATASHEET SMA**