



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

**CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR  
DE FORÇA UTILIZANDO MATERIAL DE MEMÓRIA DE FORMA**

**por**

**Samuel de Oliveira**

*Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da  
Paraíba para obtenção do Grau de Mestre*

**SAMUEL DE OLIVEIRA**

# **CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR DE FORÇA UTILIZANDO MATERIAL DE MEMÓRIA DE FORMA**

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

**Orientador: Professor Dr. Simplicio Arnaud da Silva**

O48c Oliveira, Samuel de.  
Caracterização e desenvolvimento de um atuador de força  
utilizando material de memória de forma / Samuel de Oliveira.-  
João Pessoa, 2015.  
68f. : il.  
Orientador: Simplício Arnaud da Silva  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT  
1. Engenharia mecânica. 2. Liga de memória de forma.  
3. Controlador Fuzzy. 4. Identificação.

UFPB/BC

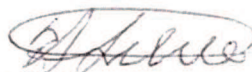
CDU: 621(043)

# ***CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR DE FORÇA UTILIZANDO MATERIAL DE MEMÓRIA DE FORMA***

por

**Samuel de Oliveira**

*Dissertação aprovada em 02 de fevereiro de 2015*



**Prof. Dr. SIMPLÍCIO ANRNAUD DA SILVA**  
*Orientador – UFPB*



**Prof. Dr. TADEU ANTONIO DE AZEVEDO MELO**  
*Examinador Interno - UFPB*



**Prof. Dr. CÍCERO DA ROCHA SOUTO**  
*Examinador Externo – UFPB*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Edinaldo e Célia e à minha esposa Cristiane, pelo incentivo e apoio incondicional, além de ser a epígrafe da minha jornada pessoal e profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro, a Deus, pelo fôlego de vida e a saúde mental necessária à realização deste trabalho.

Aos meus pais, pela dedicação empenhada à minha formação pessoal e profissional.

Ao professor Simplício por compartilhar sua inestimável experiência e orientação no decorrer deste trabalho.

Ao professor Cícero Souto, por sua paciência, atenção e contribuições no desenvolvimento deste projeto.

Aos técnicos Sergio e Diógenes, que cooperaram no desenvolvimento desse trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”

Martin Luther King

# **CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR DE FORÇA UTILIZANDO MATERIAL DE MEMÓRIA DE FORMA**

## **RESUMO**

Neste trabalho apresenta-se um projeto experimental de um sistema de controle de força e de posição utilizando, como atuador, uma mola helicoidal de Liga de Memória de Forma (LMF), constituída de ligas de Ni-Ti, em uma mesa de fuso adaptada. Um controlador, em malha fechada, baseado em Lógica Fuzzy foi modelado para controlar a força exercida pela mola, a qual é manipulada através da temperatura da mola. Neste trabalho, a temperatura de mola foi controlada através de uma corrente elétrica, que produz geração de calor através do efeito Joule. Uma mola restauradora foi utilizada para fazer a mola de memória de forma restaurar o sistema à sua posição original. Para alimentar a mola de memória de forma utilizou-se uma fonte de corrente contínua controlada, cujo valor dessa corrente determina a força aplicada desejada a qual foi medida com uma célula de carga e a posição através de uma câmera conectada a um computador. As características da mola de memória de forma foram determinadas a partir de abordagem convencional para molas helicoidais de tração, e em seguida caracterizada, através de calorimetria diferencial de varredura (DSC). O controlador Fuzzy foi modelado no ambiente LabVIEW instalado em um computador equipado com um sistema de aquisição de dados. Os resultados experimentais foram obtidos em ensaios realizados na bancada de teste, com a mola de liga de memória de forma com e sem treinamento.

Palavras chaves – Liga de memória de forma, controlador Fuzzy, identificação.

# **CARACTERIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR DE FORÇA UTILIZANDO MATERIAL DE MEMÓRIA DE FORMA**

## **ABSTRACT**

This paper presents an experimental design of a power control system and position, using, as actuator, a coil spring of Shape Memory Alloy (SMA), consisting of Ni-Ti alloys, in an adapted screw table. A controller, closed loop, based on Fuzzy logic has been modeled to control the force exerted by the spring which the spring is manipulating by the temperature. In this work, the spring temperature was controlled by an electric current, which produces heat generation by Joule effect. A restoring spring was used to make the shape memory spring to restore the system to its original position. To supply the shape memory spring we used a controlled current source, whose current value that determines the desired force applied which is measured with a load cell and position by a camera connected a computer. The shape memory spring characteristics were determined from conventional approach to helical traction springs, and then characterized by Differential Scanning Calorimetry (DSC). The Fuzzy controller was modeled on LabVIEW installed on a computer equipped with a data acquisition system. The experimental results were obtained from tests on test bench, with the shape memory alloy spring with and without training.

Keywords – shape memory alloy, fuzzy control, identification.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>I</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2.3 MOTIVAÇÃO .....	2
1.2.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>4</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	4
2.2 <i>LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA (LMF)</i> .....	4
2.2.1 <i>Histerese</i> .....	7
2.2.2 <i>Molas Helicoidais de LMF</i> .....	10
2.3 LÓGICA FUZZY .....	12
2.3.1 <i>Conjunto Fuzzy</i> .....	13
2.3.2 <i>Funções De Pertinência Fuzzy</i> .....	15
2.3.3 <i>Variáveis Linguísticas</i> .....	16
2.3.4 <i>Fuzzificação</i> .....	16
2.3.5 <i>Defuzzificação</i> .....	17
2.3.6 <i>Sistema de Inferência</i> .....	17
2.4 CONSIDERAÇÕES.....	18
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>20</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>

3.1.	INTRODUÇÃO .....	20
3.2.	O ATUADOR.....	20
3.3.	BANCADA DE TESTE.....	21
3.4.	METODOLOGIAS.....	24
3.4.1.	METODOLOGIA E CONFIGURAÇÃO PARA CONTROLE DE POSIÇÃO E DE FORÇA .....	24
3.4.2.	METODOLOGIA E CONFIGURAÇÃO PARA O TREINAMENTO DO ATUADOR .....	26
3.3	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES .....	28
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>29</b>
<b>4</b>	<b>ENSAIOS PRELIMINARES DO ATUADOR E PROJETO DO CONTROLADOR</b>	
<b>FUZZY</b>	<b>29</b>	
4.1	INTRODUÇÃO .....	29
4.2	TRATAMENTO TÉRMICO .....	29
4.3	ENSAIO DE CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA.....	30
4.4	MODELAGEM DA PLANTA .....	31
4.5	PROJETO DO CONTROLADOR.....	33
4.6	CONCLUSÕES .....	36
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>37</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>37</b>
5.1.	INTRODUÇÃO .....	37
5.2.	ENSAIOS DE ACIONAMENTO DO SISTEMA .....	37
5.3.	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	45
<b>CAPÍTULO VI .....</b>		<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
5.4.	PROPOSTA PARA OUTROS TRABALHOS.....	48
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>49</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fração volumétrica da martensita com a temperatura .....	5
Figura 2.2 - Ilustração do operador de Preisach .....	8
Figura 2.3 - Mola Helicoidal .....	10
Figura 2.4 - Função de pertinência .....	14
Figura 2.5 – Representação do conjunto intersecção nos conjuntos Fuzzy.....	14
Figura 2.6 – Representação do conjunto união nos conjuntos Fuzzy.....	15
Figura 2.7 – Representação do conjunto complemento nos conjuntos Fuzzy.....	15
Figura 2.8 - Termo linguístico .....	16
Figura 3.1 - Fabricação da mola LMF .....	21
Figura 3.2 – Diagrama esquemático da estrutura experimental. ....	22
Figura 3.3 - Diagrama esquemático da estrutura dinâmica. ....	23
Figura 3.4 - Diagrama esquemático da estrutura estática, com a extremidade 2 presa através da célula de carga .....	23
Figura 3.5 - Diagrama esquemático da estrutura de treinamento .....	24
Figura 3.6 - Diagrama esquemático do controlador de força e de posição (a) estrutura estática (b) estrutura dinâmica.....	25
Figura 3.7 - Interface gráfica do sistema de controle .....	26
Figura 3.8 - Diagrama esquemático da montagem utilizada no treinamento. ....	27
Figura 4.1 - Concepção da mola LMF .....	30
Figura 4.2 – DSC Fio NiTi após tratamento.....	30
Figura 4.3 - Resposta do sistema ao pulso para o ensaio com a estrutura estática.....	31
Figura 4.4 - Gráfico da força x temperatura com a estrutura estática.....	32
Figura 4.5 - Resposta do sistema ao pulso com a estrutura dinâmica. ....	32
Figura 4.6 - diagrama de bloco do controlador Fuzzy.....	33
Figura 4.7 - Variável de Controle – Erro .....	34
Figura 4.8 - Variável de controle - Variação do Erro .....	34
Figura 4.9 - Variável de Saída – Controle .....	34

Figura 4.10 (a) Superfície de controle. (b) Mapa de contorno. ....	36
Figura 5.1 – Curva de resposta da força, estrutura dinâmica com atuador sem treinamento. ....	38
Figura 5.2 - Curva de resposta da força, estrutura dinâmica com atuador treinado. ....	39
Figura 5.3 – Curva de resposta dos deslocamentos observados, atuador sem e com treinamento. ....	39
Figura 5.4 – Curva de resposta da posição, estrutura dinâmica, atuador com e sem treinamento. ....	40
Figura 5.5 - Comportamento da temperatura, atuadores com e sem treinamento. ....	40
Figura 5.6 - Força observada com e sem treinamento, estrutura dinâmica. ....	41
Figura 5.7 – Curva de resposta da força, estrutura estática. ....	41
Figura 5.8 – Comportamento da temperatura, estrutura estática. ....	42
Figura 5.9 – Ensaio estrutura dinâmica. (a) controle de força. (b) deslocamento observado. ....	42
Figura 5.10 – Constante de elasticidade dinâmica da mola LMF. ....	43
Figura 5.11 – Controle de Força, (a) com treinamento. (b) sem treinamento. ....	44
Figura 5.12 - Controle de Posição, (a) com treinamento. (b) sem treinamento. ....	44
Figura 5.13 - Controle de Força, (a) com treinamento. (b) sem treinamento. ....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

DSC – Calorimetria diferencial de varredura

GPC – Controlador Preditivo Generalizado

LMF – Liga de Memória de Forma

EMF – Efeito de Memória de Forma

A<sub>i</sub> – Austenita inicial

A<sub>f</sub> – Austenita final

M<sub>i</sub> – Martensita inicial

M<sub>f</sub> – Martensita final

F – Força

N – Número de espiras

D – Diâmetro médio da espira

d – Diâmetro do fio

C – índice da mola

K<sub>s</sub> – Fator de Wahl para carga dinâmicas

K<sub>w</sub> – Fator de Wahl para carga estática

$\tau$  – Tensão de carregamento estático

$\delta$  – Fator de deflexão

k – Constante de mola

G – Módulo de elasticidade

# CAPÍTULO I

## 1.1 INTRODUÇÃO

Ligas de memória de forma (LMF) é uma classe bem conhecida de materiais inteligentes. Quando submetidas a certos ciclos térmicos são capazes de gerar trabalho mecânico através da recuperação de uma forma pré-determinada (NESPOLI *et al.*, 2010). No campo da robótica é conhecido como “músculo artificial” devido à capacidade de gerar movimento semelhante ao de um músculo humano, contudo, características como relação força/peso, bastante elevadas, e ainda movimentos silenciosos e suaves, sem problemas com engrenagens, folgas e desgastes, dá ao LMF a capacidade de ser utilizado em inúmeras aplicações.

Mohammad e Hashem (2002) usaram um controle de modo deslizante para controlar um braço LMF. Ahn e Kha (2006) propuseram um controlador PID-Fuzzy auto sintonizável para compensar a histerese do LMF. Apesar de estes controladores fornecerem bons resultados, requereu um modelo preciso da planta, o que tornou a sintonia do controlador complicada além de consumir muito tempo de processamento. G.Song et al (2003) utilizaram um sistema de rede neural para compensar a histerese em conjunto com um controlador robusto como realimentação para controle de posicionamento do LMF. Tai, Kha e Ahn (2010) propuseram um controlador preditivo generalizado (GPC) para realizar o controle de posição e força de um atuador baseado em LMF, onde o GPC gerou uma sequência de controle a cada intervalo de tempo pré-determinado para aperfeiçoar o desempenho do controlador.

Os projetos até agora propostos foram utilizado sobre o fio de LMF, que apesar das boas características chegam a alcançar deslocamentos em torno de 5% do seu comprimento. A proposta é utilizar um controlador Fuzzy para auto-sintonizar a mola LMF, de forma a controlar a posição e a força, além de verificar a possibilidade de utilização da mola sem a necessidade de treinamento do treinamento.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho foi caracterizar uma mola com material de LMF, para utilizar como atuador, em um sistema de controle de força e posição, utilizando-se um controlador de lógica Fuzzy.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos são:

- Estudar sobre ligas de memória de forma;
- Caracterizar material com memória de forma;
- Desenvolver aparato experimental;
- Desenvolvimento da instrumentação: eletrônica e software;
- Coleta dos resultados.

### **1.2.3 MOTIVAÇÃO**

A aplicação de um atuador com material LMF pode apresentar inúmeras vantagens em relação aos atuadores convencionais, principalmente, na redução de volume do dispositivo, além da execução de controle de posição sem utilização de motores com provável aproveitamento no campo da robótica.

A utilização de controlador Fuzzy, para controle de força e posição, utilizando LMF, ainda é incipiente, porém, essas ligas têm muito potencial em diversas aplicações na robótica e na substituição de alguns membros humanos.

Destarte, esta pesquisa visa contribuir para a utilização de um controlador inteligente de força e posição para o setor de automação e robótico que demandam de

novas estratégias de acionamentos. O caso específico de utilizar um controlador Fuzzy se dá pelo fato de as vantagens residirem na capacidade de adaptação da curva histerética apresentada pelo material, bem como, eventuais variações que possam afetar a planta, além da facilidade de implementação nos ambiente de programação Matlab® e LabVIEW®.

#### **1.2.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme apresentado a seguir:

O capítulo II é iniciado com uma revisão bibliográfica. Em seguida, inicia-se um breve histórico sobre a liga de memória de forma (LMF). Na sequência aborda-se o funcionamento do atuador com material. Aborda-se, também sobre a evolução dos controladores indo do clássico ao moderno. O capítulo finaliza com comentários e conclusões.

No capítulo III abordasse o funcionamento do atuador de força com material LMF. São mostrados detalhes da montagem e instrumentação do sistema. Serão explicadas as partes elétricas, eletrônicas e mecânicas, bem como o funcionamento do acionamento e controle de posição. O capítulo se encerra com comentários e conclusões.

No capítulo IV é descrito o processo de identificação para aquisição de dados iniciais e desenvolvimento do controlador Fuzzy do atuador estudado. Finaliza-se o capítulo com comentários e conclusões.

No Capítulo V são mostrados os resultados experimentais obtidos em testes realizados em laboratório com a estratégia de controle utilizada. Os ensaios apresentados foram obtidos com foco em controle de posição e força. O capítulo encerra-se com comentários e conclusões.

No capítulo VI são abordados comentários e conclusões finais, bem como, propostas para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO II**

### **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica a respeito da história da LMF, bem como, a evolução dos acionamentos para este tipo de material. Será feito um comparativo do ponto de vista técnico citando algumas vantagens que esse atuador pode ter sobre os atuadores convencionais de mesmo porte. Com relação aos controladores para este tipo de sistema são apresentadas algumas metodologias de controles clássicos, modernos e adaptativos e uma técnica de controle inteligente, que é a Lógica Fuzzy. O capítulo finaliza com a apresentação de comentários e conclusões.

#### **2.2 LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA (LMF)**

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). O nome genérico para a família das LMF é nitinol, que representa “Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory”, foi descoberta em 1961 praticamente por acidente por William J. Buehler, um pesquisador do Laboratório Munição Naval em White Oak, Maryland.

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. Assim pode-se afirmar que em baixas temperaturas o material está na fase martensítica e em temperaturas elevadas na fase austenítica. Na fase martensítica, o nitinol pode ser dobrado em varias formas e para manter a forma desejada, a liga deve ser mantida na posição e aquecida a cerca de 500°C. A alta temperatura faz com que os átomos se arranjam no padrão mais compacto e regular possível, resultando num arranjo cúbico rígido conhecido como fase austenítica (KAUFFMAN; MAYO, 1993). Acima da temperatura de transição, o nitinol volta à forma padrão, saindo da fase martensítica para a fase austenítica.

A fase austenita é uma fase relativamente dura, de alta temperatura 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). A figura 2.1 mostra esquematicamente a evolução da fração volumétrica martensítica em função da temperatura no estado livre de tensões (DELAEY *et al.*, 1974). No geral, quatro temperaturas características de transformação são definidas:  $M_i$  e  $M_f$ , respectivamente temperaturas de início e fim da formação da Martensita.  $A_i$  e  $A_f$  correspondem às temperaturas de início e fim de formação da fase Austenita respectivamente.

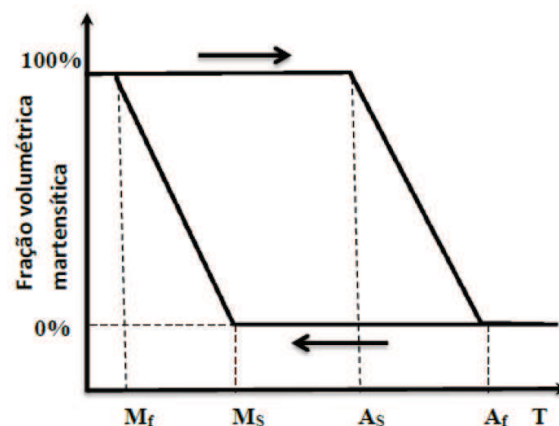


Figura 2.1 - Fração volumétrica da martensita com a temperatura

Durante o aquecimento, a transformação percorre a curva superior. Quando a temperatura  $A_i$  é atingida, tem-se o início de formação da Austenita. A transformação continua até atingir 100% de Austenita em  $A_f$ . No resfriamento, a transformação percorre a parte inferior da curva. Em  $M_i$  começa a formação de Martensita até atingir a temperatura  $M_f$ , em que o material é 100% martensita (DELAEY *et al.*, 1974).

As transformações de fase martensíticas são responsáveis pelas propriedades das LMF. (SAVI *et al.*, 2003). Atribui-se a causa dessas transformações à diferença de energia livre entre as estruturas constituintes envolvidas no processo, o que induz modificações nas ligações químicas, tornando as transformações de fase de caráter essencialmente cristalográfico (WASILEVSKI, 1975). Outra característica importante é que o material pode ser submetido, várias vezes, a esse processo, sem perda de propriedades (SAVI *et al.*, 2003).

O comportamento pseudoelástico é análogo ao comportamento termoelástico, só que nesse caso há uma aplicação de tensão no material, ocorrendo a transformação com o aumento contínuo da aplicação de tensão mecânica e o mesmo é revertido quando a tensão vai diminuindo (SILVA JUNIOR, 2011). De uma maneira geral pseudo-elasticidade acontece se a deformação criada ao material por aplicação de uma carga, a uma temperatura constante, for totalmente recuperada (DELAEY *et al.*, 1974). A deformação pseudoplástica é causada pela deformação da forma acompanhando a formação da martensita. Entretanto, a recuperação ocorre quando a transformação é revertida (DELAEY *et al.*, 1974), ou seja, através do aquecimento do material.

As LMF apresentam um comportamento termomecânico fortemente dependente da temperatura em que se encontram, e apresentam três comportamentos marcantes: pseudoplasticidade, pseudoelasticidade e efeito memória de forma (DELAEY *et al.*, 1974). Em temperaturas abaixo de  $M_f$ , as LMF apresentam um comportamento pseudoplástico, que é caracterizado por uma grande deformação residual proveniente de uma reorientação martensítica induzida mecanicamente (KRISHNAN *et al.*, 1974). A pseudoelasticidade, por sua vez, é um comportamento caracterizado por uma recuperação de deformação após a retirada da tensão a temperaturas acima de  $A_f$ . Essas deformações são oriundas de uma transformação martensítica induzida por tensão (KRISHNAN *et al.*, 1974). O efeito memória de forma é a recuperação da deformação quasiplástica com o aquecimento (DELAEY *et al.*, 1974).

A quasiplasticidade é caracterizada por uma grande deformação residual, oriunda de uma reorientação da martensítica induzida termicamente (SAVI *et al.*, 2003). A pseudoelasticidade é um comportamento caracterizado por uma recuperação de deformação após a retirada da carga, à temperaturas acima de  $A_f$ . Essas deformações são oriundas de transformações martensíticas induzidas por tensão (KRISHNAN *et al.*, 1974). O efeito memória de forma é a recuperação da deformação quasiplástica com o aquecimento (DELAEY *et al.*, 1974).

Para uma LMF, a uma temperatura inferior a  $M_f$ , tem-se uma estrutura martensítica. Com aplicação de uma tensão mecânica, obtém-se uma resposta elástica até uma dada tensão crítica, onde será iniciado um processo de reorientação da martensita, favorecendo a uma variante associada à tração. Durante esse processo, a tensão permanece praticamente constante até uma deformação característica, a partir da qual a LMF volta apresentar um comportamento elástico. Ao retirar a tensão mecânica, verifica-se uma deformação residual, que poderá ser recuperada com o aquecimento da LMF acima de  $A_f$ . Dessa forma, o material retornará a sua forma geométrica inicial, daí a denominação de efeito memória de forma (DELAEY *et al.*, 1974).

Devido a estas características, as LMF têm sido usadas em grande variedade de aplicações militares, na área médica, segurança e robótica. Na área militar a LMF está presente nos aviões de caça F-14 como acopladores de linhas hidráulicas. (KAUFFMAN; MAYO, 1993). Na medicina, pinças para remover objetos estranhos através de pequenas incisões, fios ortodônticos de LMF tem sido usados para acelerar o tratamento, reduzindo a necessidade de apertos e ajustes aos aparelhos e na robótica, tem sido utilizado como atuadores e micro manipuladores para emular o músculo humano. A principal vantagem é a suavidade no controle da força exercida durante a atuação. (ROGERS, 1995).

### **2.2.1 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).

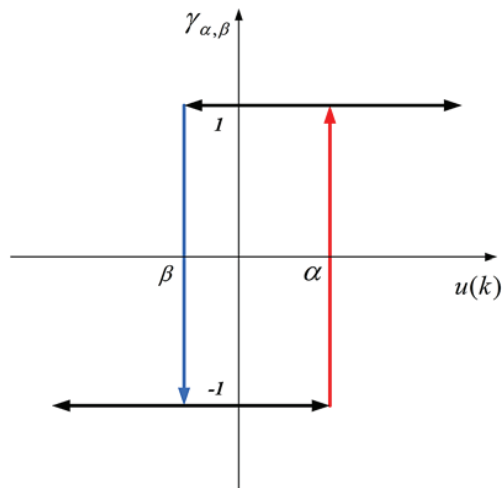


Figura 2.2 - Ilustração do operador de Preisach

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 (Figura 2.2), 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 pelo trabalho de (KRANOSSELSKII; 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; KURDILA, 1997).

Outra dificuldade está relacionada com as características de variação do material durante o ciclo de carga. As fases de transformação cinética e modelos tridimensionais são propostos ŠITTNER et al (2000), ARBAB et al (2003) e BOUVET et al (2004). Estes modelos complexos podem reproduzir, com exatidão, o comportamento termomecânico da mola de LMF, contudo há necessidade de executar um código por elementos finitos, o que não é muito adequado para o controle em tempo real.

Modelos mais simples e métodos de controles clássicos foram aplicados: PID modificados foram usados em SHAMELI et al (2005), DUTTA et al (2005) e DA SILVA (2007), que usaram o modelo histerético de Preisach.

Apesar dos atuadores LMF construídos a partir de fios tensionados apresentar uma elevada relação força-massa, seu curso muitas vezes se torna insatisfatório se comparado aos atuadores convencionais (REYNAERTS; BRUSSEL, 1998), (SPINELLA; DRAGONI, 2009). Uma abordagem típica de 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 demonstrado por PAIVA e SAVI (2006) e LAGOUDAS (2008). Outra abordagem foi proposta por DONG et al (2008) que desenvolveram um modelo de elementos finitos.

A partir destas pesquisas, houve algumas tentativas em utilizar a mola de LMF como atuador, a exemplo de YAN et al (2007) que apresentaram uma análise experimental de uma pinça acionada por molas de LMF considerando várias condições de aquecimento e resfriamento, e STEBNER et al (2008) caracterizaram molas de LMF de alta temperatura aplicado ao compressor do helicóptero T-700.

## 2.2.2 Molas Helicoidais de LMF

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.

A Figura 2.3 mostra 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 a sollicitação variável deve-se utilizar o fator  $K_w$  e para sollicitações estáticas deve-se utilizar o fator  $K_s$  (AGUIAR *et al.*, 2009). As equações são descritas a seguir.



Figura 2.3 - Mola Helicoidal

$$K_w = \frac{4.C - 1}{4.C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (2.1)$$

$$K_s = 1 + \frac{0,615}{C} \quad (2.2)$$

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 (2.2).

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C} \quad (2.3)$$

A tensão de carregamento estático pode ser calculada por:

$$\tau = \frac{8.F.D}{\pi.d^3} \cdot K_s \quad (2.4)$$

Como:

$$C = \frac{D}{d} \quad (2.5)$$

Pode-se reescrever a equação para o cálculo do carregamento estático, como apresentado na Equação (2.6):

$$\tau = \frac{8.F.C}{\pi.d^2} \cdot K_s \quad (2.6)$$

Para carregamento de tensão dinâmica, tem-se:

$$\tau = \frac{8.F.D}{\pi.d^3} \cdot K_w = \frac{8.F.C}{\pi.d^2} \cdot K_w \quad (2.7)$$

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

$$\delta = \frac{8.F.D^3.N}{d^4.G} \quad (2.8)$$

Assim, a constante de mola  $k$  pode ser definida conforme a Equação (9).

$$k = \frac{G.d^4}{8.D^3.N} \quad (2.9)$$

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; 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 abordarem feita a seguir.

### **2.3 LÓGICA FUZZY**

A lógica Fuzzy (também referida como lógica nebulosa e em alguns casos por teoria de possibilidades) tem a característica de representar uma forma inovadora de manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria de probabilidades. A lógica Fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos. Isso abre as portas

para converter a experiência humana em uma forma compreensível para os computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pelo enfoque Fuzzy tem um imenso valor prático, na qual se torna possível a inclusão da experiência de valores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos (SHAW; SIMÕES, 1999).

A primeira publicação sobre lógica Fuzzy foi em 1965, quando um professor de Teoria dos Sistemas na Universidade da Califórnia – Berkeley, Lotfi Asker Zadeh, (1965), publicou o primeiro artigo sobre a teoria dos conjuntos nebulosos para tratar as incertezas não probabilísticas, que denominou Fuzzy Sets. Ele tinha como objetivo fornecer ferramentas matemáticas capazes de lidar com o raciocínio lógico que contemplassem aspectos imprecisos e ambíguos, tipo de raciocínio não passível de processamento na lógica computacional fundamentada na lógica de Boole.

A ideia da lógica Fuzzy não foi bem aceita inicialmente dentro dos círculos acadêmicos, pois algumas bases matemáticas ainda não haviam sido exploradas. As aplicações da lógica Fuzzy demoraram a desenvolver por isso, contudo, no Japão, a lógica Fuzzy foi plenamente aceita e implementada em produtos, simplesmente porque funcionava independentemente de matemáticos concordarem ou não. O sucesso desses produtos no Japão em empresas como Fuji Electric e Hitachi nos anos 80 levou a um renascimento em lógica Fuzzy nos EUA no início dos anos 90. Para aplicação da teoria da lógica fuzzy, tem-se os seguintes conceitos: conjuntos Fuzzy, funções de pertinência, as variáveis linguísticas, fuzzificação e os modelos de inferência.

### **2.3.1 Conjunto Fuzzy**

Um conjunto Fuzzy  $F$  de um universo de discurso  $U$  é representado comumente por uma função de pertinência real mapeada por  $\mu_F: U \rightarrow [0,1]$ , a qual associa cada elemento  $x \in U$  a um número real  $\mu_F(x)$  pertencente ao intervalo fechado  $[0,1]$ , o qual representa o grau de pertinência de  $x$  em  $F$  (REZENDE, 2005).

Pode-se considerar duas funções de pertinência para o conjunto de indivíduos jovens, no conjunto clássico, considera-se o indivíduo pertencente ao grupo se sua idade for menor ou igual a 30 anos, no caso da pertinência do conjunto Fuzzy a consideração se

faz por etapas, até 20 anos o indivíduo pertence 100% ao grupo, entre 20 e 35 anos, a pertinência será decrescida proporcionalmente, conforme apresentado na Figura 2.4.

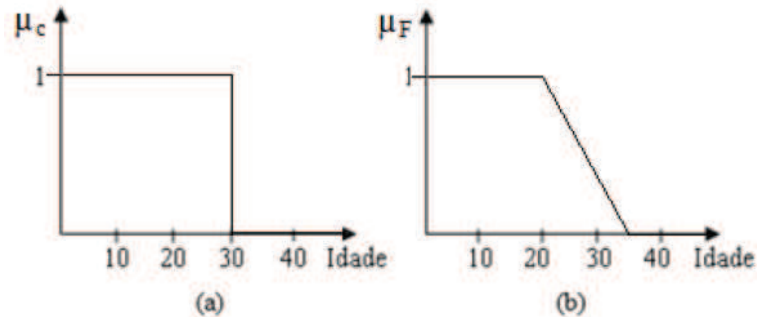


Figura 2.4 - Função de pertinência

$$\mu_c = \begin{cases} 1, & \text{se idade} \leq 30 \\ 0, & \text{se idade} > 30 \end{cases}$$

$$\mu_F = \begin{cases} 1, & \text{se idade} < 20 \\ \left(\frac{35 - \text{idade}}{15}\right), & \text{se } 20 \leq \text{idade} \leq 35 \\ 0, & \text{se idade} > 35 \end{cases}$$

Na lógica Fuzzy, há diversos operadores para realizar as operações lógicas, os quais são basicamente divididos em duas classes (ou normas): as normas triangulares, chamadas por normas-t e as normas duais, chamadas por normas-s.

Intersecção: Seja  $E$  o universo de discurso e  $x \in E$ ,  $M = [0,1]$ ; Sejam os conjuntos  $A \subset B$ ,  $A \subset E$ , então a intersecção  $A \cap B$  é o maior subconjunto do universo de discurso  $E$ , o qual é ao mesmo tempo parte de  $A$  e  $B$ . Assim:

$$\mu_{(A \cap B)}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \tag{2.10}$$

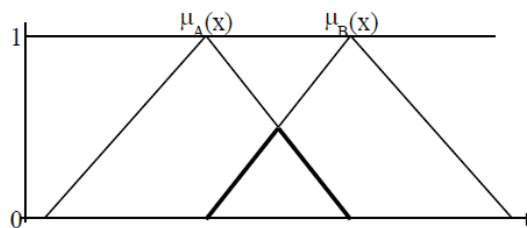


Figura 2.5 – Representação do conjunto intersecção nos conjuntos Fuzzy.

Fonte: SHEIBIA, 2001

União: Seja  $E$  o universo de discurso e  $x \in E$ ,  $M = [0,1]$ ; Sejam os conjuntos  $A \subset B$ ,  $A \subset E$ . A união  $A \cup B$  é o menor subconjunto do universo de discurso  $E$ , que inclui ambos os conjuntos Fuzzy  $A$  e  $B$ . Logo:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[(\mu_A(x), \mu_B(x))] \quad (2.11)$$

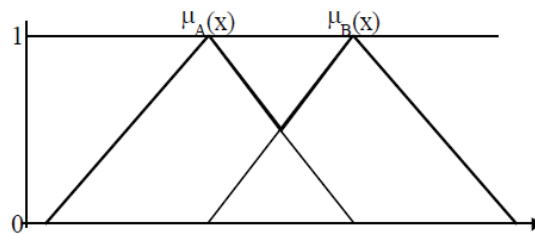


Figura 2.6 – Representação do conjunto união nos conjuntos Fuzzy  
Fonte: SHEIBIA, 2001

Complemento: Seja  $E$  o universo de discurso,  $x \in E$ ,  $M = [0,1]$ ; onde o conjunto Fuzzy  $A \subset E$ . O complemento de  $A$  em relação à  $E$  é um conjunto de todos os elementos  $x \in E$  que não são membros de  $A$ . Logo:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.12)$$

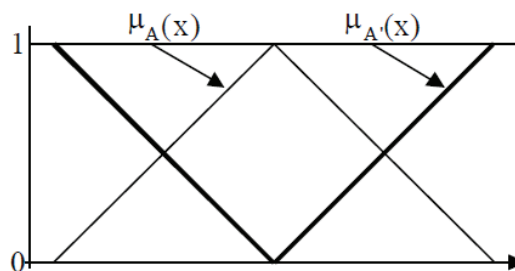


Figura 2.7 – Representação do conjunto complemento nos conjuntos Fuzzy  
Fonte: SHEIBIA, 2001

### 2.3.2 Funções De Pertinência Fuzzy

Função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada, que atribui valores de pertinência para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso (SHAW; SIMÕES, 1999). Os formatos mais frequentes encontrados são triangulares e

trapezoidais, pois são gerados com facilidade. Em casos onde um desempenho suave é de importância crítica, funções do tipo  $\cos^2(x)$ , gaussiana, sigmoide e spline cúbico (S-shape) podem ser usadas (SHAW; SIMÕES, 1999).

### 2.3.3 Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é definida como uma entidade utilizada para representar de modo impreciso, através da linguagem cotidiana, um conceito ou uma variável de um dado problema (REZENDE, 2005).

Uma variável linguística “altura” poderá assumir um dos membros do conjunto {muito alto, alto, médio, médio alto, baixo, muito baixo}. Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se a cada um deles um conjunto Fuzzy definido sobre um universo de discurso comum (SHHEIBIA, 2001).

### 2.3.4 Fuzzificação

Fuzzificação é um mapeamento do domínio de valores reais para o domínio de valores Fuzzy, ou seja, um pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo grandemente número de valores a serem processados (SHAW; SIMÕES, 1999).

Os valores discretos das variáveis de entrada são usados para converter os rótulos linguísticos ao grau de pertinência em um intervalo pré-definido [0,1] dentro do universo de discurso. Como exemplo, o termo linguístico médio é definido pelos parâmetros mínimos ( $p_1$ ) e máximo ( $p_2$ ), ficando o grau de pertinência do termo em função de  $x$  (Figura 2.8).

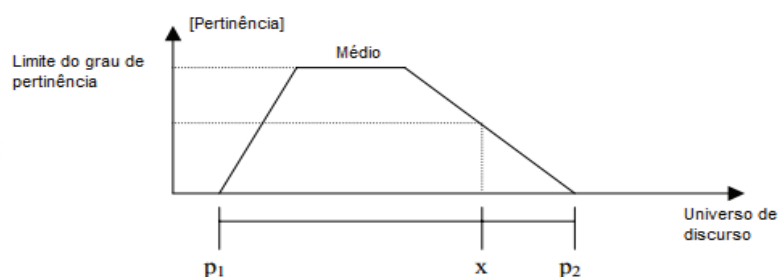


Figura 2.8 - Termo linguístico

### 2.3.5 Defuzzificação

A defuzzificação consiste em obter um único valor discreto, utilizável numa ação de controle concreta no mundo real, a partir de valores Fuzzy de saída obtidos (SHAW; SIMÕES, 1999). Há muitos métodos de realizar a tradução inversa das variáveis linguísticas, as mais comuns são: centro da área, centro do máximo, e média do máximo.

O método centro da área, também chamado de centroide, consiste em calcular um ponto onde a área de todas as contribuições se divide em valores de áreas iguais.

$$\mu^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{out}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{out}(u_i)} \quad (2.13)$$

No método centro do máximo, o calculo realizado é a média ponderada dos máximos das funções de pertinência de saída.

$$\mu^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \cdot \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{o,k}(u_i)} \quad (2.14)$$

E o método média do máximo calcula a média de todos os máximos das funções de pertinência.

$$\mu^* = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M} \quad (2.15)$$

Cabe salientar que o método de defuzzificação a ser escolhido irá depender do contexto da decisão quantitativa.

### 2.3.6 Sistema de Inferência

O sistema de inferência é armazenado na forma de regras pelos termos de premissas e consequência, do tipo, SE <premissas<sub>i</sub>> ENTÃO <consequência<sub>i</sub>>, onde:

$premissa_i$  representa um conjunto de condições envolvendo as variáveis linguísticas do sistema.

$consequência_i$  representa um conjunto de ações que são geradas a partir do atendimento das premissas.

$i$  representa o número de regras geradas a partir da quantidade de entradas e do conjunto Fuzzy de cada entrada. Se em um controlador de  $p$  entradas com a mesma quantidade de conjuntos difusos  $n$ , o número total de regras  $R$  é dado por (CABRERA *et al.*, 2003):

$$R = n^p \quad (2.16)$$

O processo de inferência propriamente dito é o responsável pela aplicação das regras apoiando-se em declarações do tipo **Se-Então** e operações nebulosas. Nesta etapa ocorre a tomada de decisões (NOGUEIRA, 2013), a qual pode ocorrer por dois métodos: o tipo MAMDANI e o tipo SUGENO.

Na tomada de decisão do tipo MAMDANI, o resultado da inferência é direta e de fácil implantação, já na tomada de decisão do tipo SUGENO, o resultado depende de uma nova função matemática. Em forma matemática tem-se:

*Se  $x$  é  $A$ , então  $u$  é  $C$   $\rightarrow$  tipo MAMDANI*

*Se  $x$  é  $B$ , então  $u$  é  $f(x)$   $\rightarrow$  tipo SUGENO*

Nos controladores do tipo SUGENO, a resposta é obtida através de média ponderada das respostas das regras não sendo necessário um defuzzificador (NOGUEIRA, 2013).

## 2.4 CONSIDERAÇÕES

A resolução de problemas de aprimoramento e controle de processos que apresentam relativa histerese, como as ligas de memória de forma, utilizando técnicas de modelagem implicam na necessidade de conhecimento específico e aprofundado da planta, independente da técnica de modelagem escolhida. Para o caso da identificação dos parâmetros, exige-se ainda o conhecimento prévio das relações entre entrada e saída. Por outro lado, a utilização de técnicas de inteligência computacional, como lógica nebulosa,

não exigem tais conhecimentos prévios, bastando neste caso, apenas de uma base de dados que seja capaz de representar a dinâmica do processo em questão, tendo como desvantagem apenas as limitações computacionais aplicadas.

O capítulo a seguir descreve o processo e o problema para o qual esta dissertação propõe uma solução.

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. 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 (ZHONG; YEONG, 2006), (YANG; GU, 2002) e (SILVA, 2010). Em geral, os estudos de caracterização e modelagem de fio LMF têm sido conduzidos para movimentos de atuação de uma dimensão. No entanto, dando uma forma bidimensional ou tridimensional ao atuador pode ser possível aumentar consideravelmente o rendimento (LEESTER-SHÄDEL *et al.*, 2008), (TORRES-JARA *et al.*, 2010) e (LEE; KIM, 2008). 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. Considerando o atuador tipo mola helicoidal nesta pesquisa, foi desenvolvida uma metodologia que possibilitasse a caracterização e a aplicação de controle no atuador. A metodologia empregada foi baseada na literatura onde as pesquisas mostram caracterizações de atuadores de diversos tipos e geometrias. Para este estudo foi determinado o comportamento do atuador com e sem treinamento quando aplicado o controle de força e de deslocamento.

O sistema de controle foi baseado em lógica Fuzzy tendo como variáveis de controle a força ou deslocamento. Neste caso, quando a força estava sendo controlada, o deslocamento era apenas observado e vice-versa.

#### 3.2. O ATUADOR

O atuador estudado nesta pesquisa teve sua geometria em forma de mola helicoidal por permitir grandes deformações se comparadas com outros atuadores lineares. O fio com

memória de forma que foi utilizado para a fabricação do atuador foi de Níquel Titânio (NiTi) com diâmetro de 1,016 mm. O comprimento total de fio para a fabricação da mola foi de 983 mm adotando um diâmetro médio de 11,96 mm para o atuador. Com o aquecimento (150 °C) o atuador ficou com 60 mm e com o resfriamento (27 °C) 150 mm permitindo um deslocamento de 90 mm.

A montagem mecânica foi feita com um fio com LMF sem tratamento térmico, ou seja, o fio na forma com as mesmas características de quando saiu do processo de laminação de fio. Neste caso, o material estava enriquecido e não possuía o efeito memória de forma. Para ativar o efeito memória de forma, a mola foi presa nas duas extremidades e submetida a um tratamento térmico durante 25 minutos a uma temperatura de 450 °C em um forno elétrico e resfriada ao ar. Após este último processo a mola foi solta e instalada na estrutura para os testes experimentais. Na Figura 3.1 é mostrada esquematicamente a mola presa ao pino de sustentação para a fabricação.



Figura 3.1 - Fabricação da mola LMF

### 3.3. BANCADA DE TESTE

Para a caracterização e aplicação do controle de deslocamento e de força do atuador com memória de forma, foi desenvolvido um dispositivo mecânico que permite movimentos horizontais. Este dispositivo é composto por uma base fixa e duas extremidades móveis presas a duas guias que deslizam pela base fixa quase sem atrito. As extremidades foram guiadas para evitar o desalinhamento no momento do acionamento do atuador. Foram desenvolvidos conectores para sustentação das molas na base e nas extremidades. Na Figura 3.2 está mostrada esquematicamente a estrutura experimental destacando cada elemento.

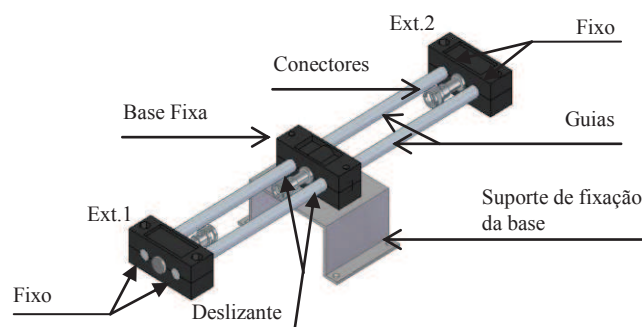


Figura 3.2 – Diagrama esquemático da estrutura experimental.

Na estrutura experimental foi colocada uma mola de LMF (atuador) presa à base conectada a extremidade 1. Na extremidade 2 com a base foi conectada uma mola comum com rigidez mecânica  $K = 595,35 \text{ N/m}$  em série com uma célula de carga para medição da força. A mola comum tem a função de realizar o retorno do atuador à posição inicial e de impor uma força proporcional à sua deformação.

Uma câmera de vídeo foi utilizada como sensor de deslocamento concentrando o foco na extremidade 2, entre a aresta e o parafuso de fixação, para fazer a medição do deslocamento quando a extremidade se deslocar. Essa configuração possibilitou a caracterização dinâmica do atuador sobre a estrutura, pois visualiza o movimento da extremidade da estrutura, permitindo, assim, realizar o controle de deslocamento. Para a medição da força foi utilizada uma célula de carga como apresentado na Figura 3.3.

Os dados de força foram adquiridos através de célula de carga com capacidade para 20 Kgf. Para o sensor de deslocamento utilizou-se uma câmera digital que foi instalada a 150 mm da estrutura. A câmera foi configurada para captação de imagem 640 x 480 pixels em escala de cinza, zoom (x1,0) a 75 fps e resolução de deslocamento de 0,001 mm. O motivo da utilização da medição por processamento de imagem se deu pela necessidade de não adicionar mais atrito à planta, além da boa resolução na medição do deslocamento.

Uma segunda montagem foi feita para restringir o movimento da estrutura e permitir a caracterização estática do atuador, na qual a célula de carga é fixada na extremidade 2 presa na base. Neste caso, quando o atuador é acionado uma força de tração é imposta na extremidade 1 que é transmitida para a extremidade 2, possibilitando a medição da força pela célula de carga. O objetivo dessa montagem é determinar a capacidade máxima e variações intermediárias da força que o atuador é capaz de impor sobre a estrutura. O diagrama esquemático dessa montagem está mostrado na figura 3.4.

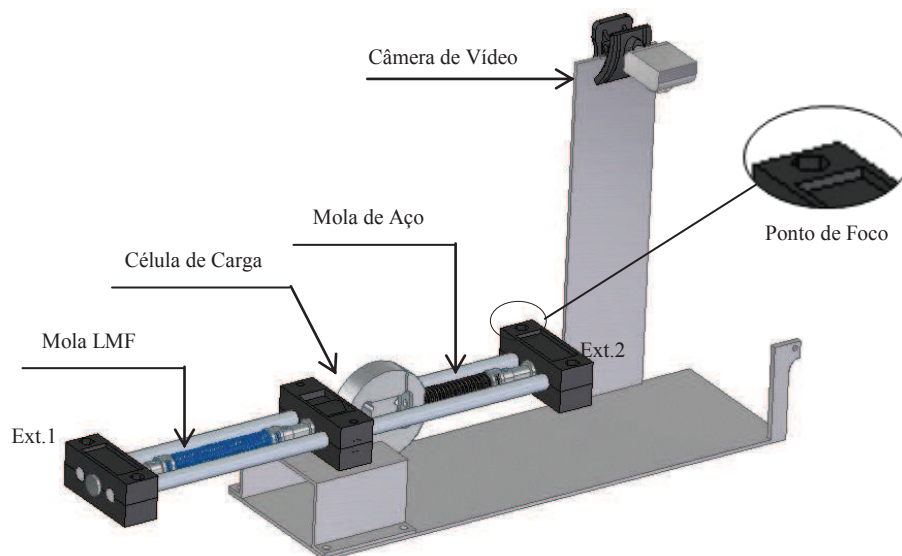


Figura 3.3 - Diagrama esquemático da estrutura dinâmica.

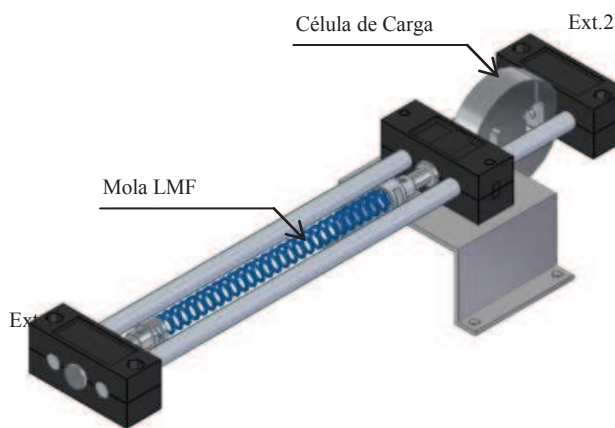


Figura 3.4 - Diagrama esquemático da estrutura estática, com a extremidade 2 presa através da célula de carga

A terceira configuração foi necessária para fazer o treinamento da mola atuador. Para essa configuração o atuador foi preso à célula de carga que ficou presa a base. Um anteparo de PVC de 35 mm de comprimento foi fixado à extremidade 1 para limitar o alongamento da mola de LMF, na extremidade 2. Uma massa de 1,2 kg foi presa através de um cabo de aço e suspensa por um suporte cilíndrico na lateral da bancada.

A definição da carga admitida baseou-se na literatura (FARIAS *et al.*, 2012) usando 80% do valor da carga máxima que o atuador conseguiu mover experimentalmente. O diagrama esquemático da montagem está mostrado na Figura 3.5.



capturada para análise do seu comportamento. O mesmo procedimento foi utilizado para o controle de força ficando o deslocamento livre, porém, sendo monitorado. O atuador LMF e a estrutura foram controlados e monitorados com a ajuda de um sistema de aquisição e controle de dados conectado a um computador. Uma fonte de corrente foi utilizada para possibilitar a corrente de aquecimento do LMF. Esta corrente foi controlada através da saída do sistema de controle. Na Figura 3.6 está mostrado esquematicamente à configuração para esse experimento. Para esta configuração foram coletados resultados experimentais do atuador nas seguintes situações:

- 1 – Atuador sem treinamento com controle de força e posição observada;
- 2 – Atuador sem treinamento com controle de posição e força observada;
- 3 – Atuador treinado com controle de força e posição observada;
- 4 – Atuador treinado com controle de posição e força observada.

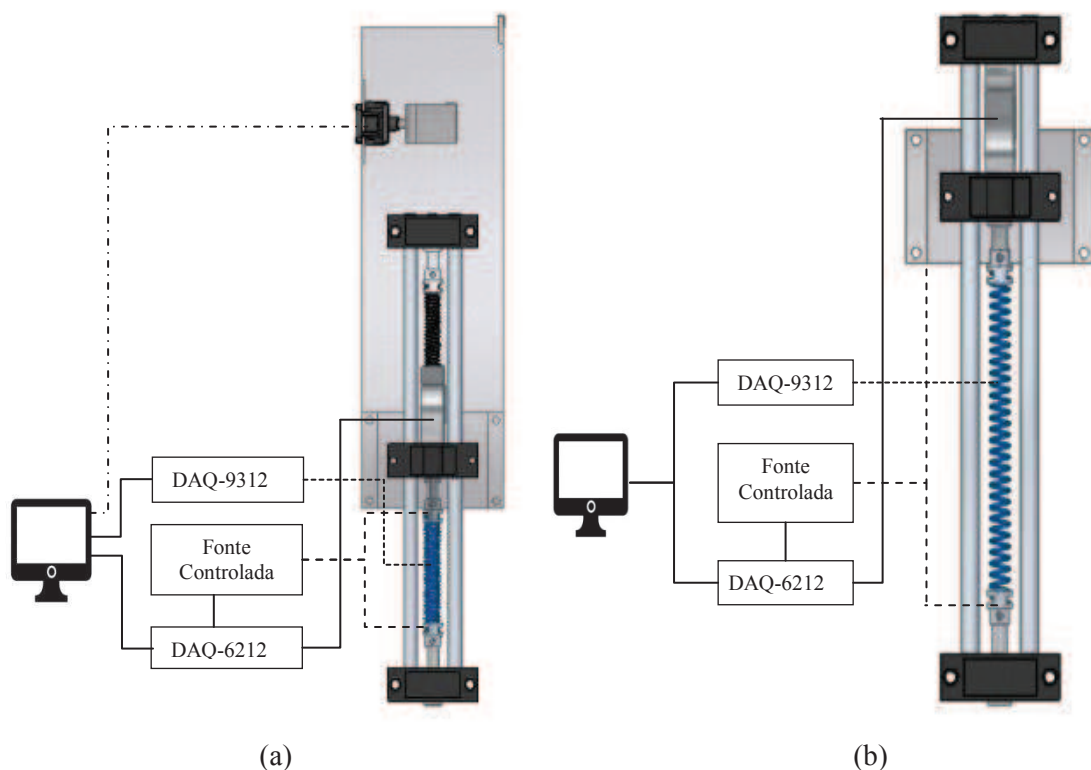


Figura 3.6 - Diagrama esquemático do controlador de força e de posição (a) estrutura dinâmica (b) estrutura estática

Para o controle de força, utilizou-se uma planta estática, instalando de um lado a mola LMF e do outro a célula de carga para medição da força aplicada à estrutura. No controle do deslocamento, utilizou-se a mesma estrutura, contudo adicionou-se a mola

restauradora fixada entre a célula de carga e a estrutura. Com isso, a força imposta pela LMF, a qual foi medida através da célula de carga, provoca um deslocamento da estrutura que é medido com a câmera monitorada através do computador.

Adicionalmente utilizou-se a interface DAQ-NI-6212, para aquisição e controle da planta. Foram utilizadas duas saídas analógicas para controle das fontes e uma entrada analógica para aquisição dos dados referentes à força ou ao deslocamento. Também, uma interface DAQ-NI-9312, conectada a um termopar do tipo K, para aquisição da temperatura da mola helicoidal LMF.

A rotina de treinamento, bem como o controlador Fuzzy, foram elaboradas em ambiente LabVIEW® (Figura 3.7), devido a facilidade de iteração em tempo real com as variáveis do controlador Fuzzy, além das variáveis da planta.



Figura 3.7 - Interface gráfica do sistema de controle

### 3.4.2. Metodologia e configuração para o treinamento do atuador

O atuador foi submetido ao processo de treinamento que constitui em ciclos completos de deformação e aquecimento para recuperação de forma, perfazendo um total de 1000 ciclos. Cada ciclo completo corresponde a 150 % de deformação por tração à temperatura ambiente (estado deformado) durante 35 segundos, seguido de aquecimento a 150 °C durante 25 segundos para recuperação de forma (estado recuperado).

Para caracterização e aplicação de controle no atuador de liga com memória de forma foram adotadas as seguintes metodologias e configurações experimentais (Figura 3.8):

- 1 – O atuador foi colocado em série com a célula de carga e uma massa;

- 2 – Na outra extremidade foi colocado um anteparo para limitar o deslocamento máximo do atuador;
- 3 – Entre as extremidades do atuador foi conectada uma fonte controlada por tensão;
- 4 – A célula de carga e a fonte foram ligadas a um conversor analógico-digital;
- 5 – Um termopar foi colocado na espira intermediária do atuador e ligado a conversor A/D;
- 6 – Uma câmera de vídeo foi posicionada a fim de possibilitar acompanhar todo o seu deslocamento;
- 7 – Os conversores e a câmera foram ligados a um computador.

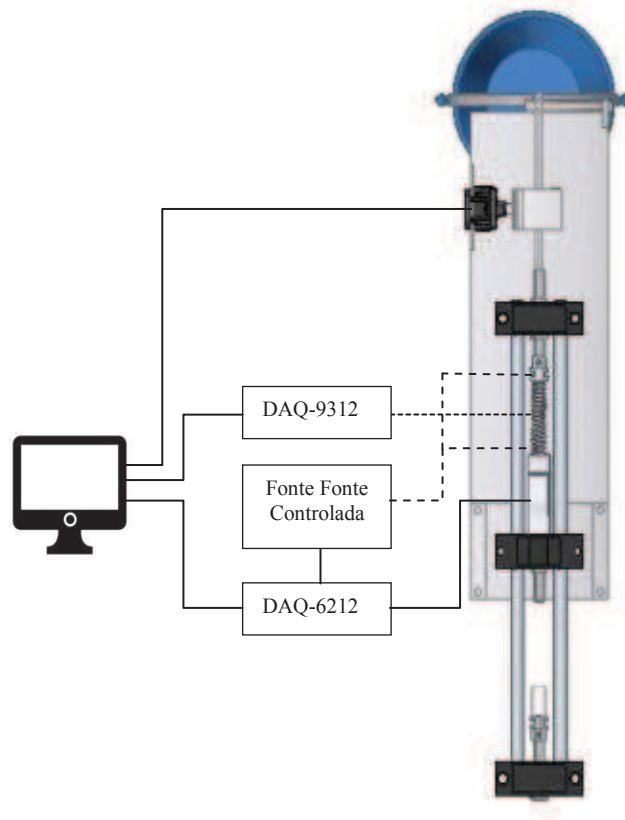


Figura 3.8 - Diagrama esquemático da montagem utilizada no treinamento.

FARIAS (2012) demonstrou que o fio de LMF se alonga permanentemente quando submetido ao ciclo térmico utilizando a carga máxima, devendo-se, para resolver este problema, utilizar 80 % da carga máxima. No entanto, na mola LMF, para resolução desse problema foi necessário reduzir a carga máxima em 50 %.

### 3.3 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A estrutura escolhida proporcionou a montagem de um processo com carga dinâmica e estática sobre o atuador LMF. Para o treinamento da mola buscou-se o ciclo de trabalho máximo de forma a atingir uma corrente que correspondesse em uma temperatura que garantisse a transformação de fase de martensita final.

A partir destes testes iniciais foi possível dimensionar a fonte de alimentação com as especificações encontradas nos testes, tensão de 12 V e corrente máxima de 20 A. Devido à resistência da mola LMF ser muito baixa, a aquisição referente aos dados de corrente seria um ponto crítico, contudo, devido às características do sistema, a informação da corrente tornou-se não essencial.

No próximo capítulo apresentar-se-á a caracterização do modelo proposto que serviu de base para desenvolvimento do controlador Fuzzy.

## CAPÍTULO IV

### 4 ENSAIOS PRELIMINARES DO ATUADOR E PROJETO DO CONTROLADOR FUZZY

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Para a realização dos ensaios com o atuador com memória de forma foi necessário realizar algumas caracterizações. Inicialmente o atuador foi submetido a um tratamento térmico para ativar a memória do material. Em seguida, com uma amostra do fio utilizado para fabricar o atuador, foi realizado um ensaio de Calorimetria Diferencial Controlado (*DSC - Differential Scanning Calorimetry*). Neste ensaio foram determinadas as temperaturas de transformação de fase do material que serviram como referência para aplicação de calor.

#### 4.2 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico é necessário para que o material com memória de forma adquira a memória quando houver aplicação de calor. De maneira geral o material com memória de forma, neste caso o fio, vem de um processo de fabricação de conformação mecânica e que, quando executados a frio, deixam o material encruado com tensões mecânicas internas elevadas. Neste caso, para o material com memória de forma, o tratamento térmico alivia as tensões internas deixando-o maleável caracteristicamente na fase martensita. Para a fabricação do atuador foi utilizado uma liga de NiTi com 1,016 mm de diâmetro e composição de 55%Ni e 45%Ti (em peso). O fio foi conformado mecanicamente ao redor de um cilindro de aço com diâmetro de 11,96 mm e, em seguida, o conjunto foi submetido ao tratamento térmico definido. O tratamento térmico foi realizado em um forno elétrico mantendo a temperatura de 450 °C por 25 minutos e em seguida resfriado naturalmente ao ar. Na Figura 4.1 é apresentada a montagem do atuador

tipo mola helicoidal fabricado para esta pesquisa. Foram fabricadas três molas para realização dos experimentos



Figura 4.1 - Concepção da mola LMF

### 4.3 ENSAIO DE CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA

Um método muito comum para caracterização da LMF é a utilização da técnica de calorimetria diferencial de varredura. Nessa técnica se mede a quantidade de calor absorvida ou liberada por uma amostra ao ser submetida a um ciclo térmico de aquecimento ou arrefecimento que ultrapasse o intervalo das temperaturas desejadas. Para os materiais com memória de forma o DSC determina as temperaturas de transformação de fase, ou seja, o início e final das fases martensita e austenita do material. Para essa amostra o DSC foi realizado no intervalo de temperatura de  $-40$  a  $170^{\circ}\text{C}$  e taxa de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (Figura 4.2).

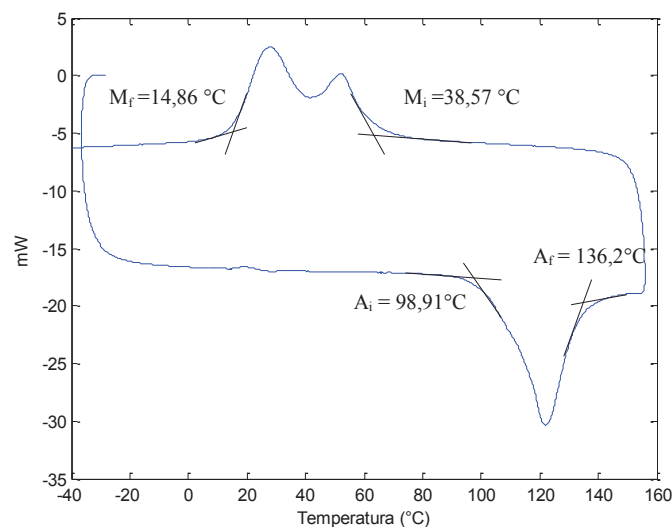


Figura 4.2 – DSC Fio NiTi após tratamento

Utilizando o método das tangentes, foram consideradas as temperaturas de martensita inicial 38,57 °C e final 14,86 °C aproximadamente. Para a fase austenita as temperaturas apresentadas foram 98,91 °C austenita inicial e 136,2 °C austenita final. Outro pico apareceu próximo à fase martensita (fase romboédrica), mas não foi analisado porque, para essa situação de funcionamento como atuador, essa fase não tem influência.

#### 4.4 MODELAGEM DA PLANTA

Para a definição da planta foram realizados ensaios com a estrutura estática e dinâmica. No ensaio com a estrutura estática verificou-se a força máxima exercida pelo atuador LMF e o comportamento da temperatura (Figura 4.3). Enquanto que, no ensaio com a estrutura dinâmica, verificou-se o deslocamento máximo exercido pelo atuador e o comportamento da temperatura (Figura 4.5).

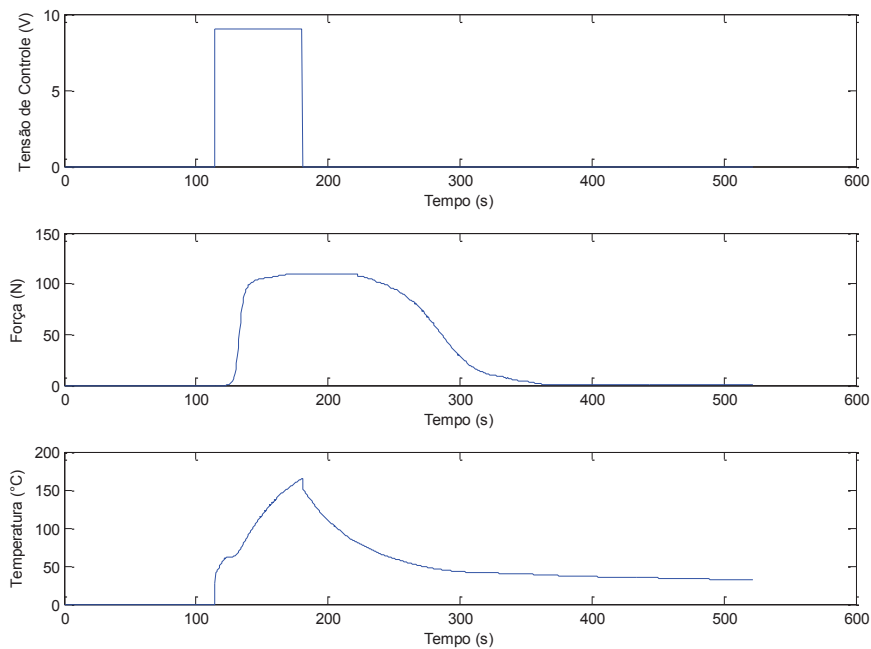


Figura 4.3 - Resposta do sistema ao pulso para o ensaio com a estrutura estática.

Através do gráfico (Figura 4.3) pode-se verificar que a mola começou a tracionar quando a temperatura chegou em 60,14 °C e atingiu seu ápice de 10,92 N ao atingir a temperatura de 155,20 °C. A duração do sinal de controle foi de 65,6 s, a planta atrasou em 7,8 s para iniciar a resposta de força chegou ao valor máximo em 49,9 s e retornou ao valor mínimo em 152,8 s. O tempo total de resposta ao pulso foi de 252,7 s. A histerese pode ser verificada no gráfico de força x temperatura (Figura 4.4).

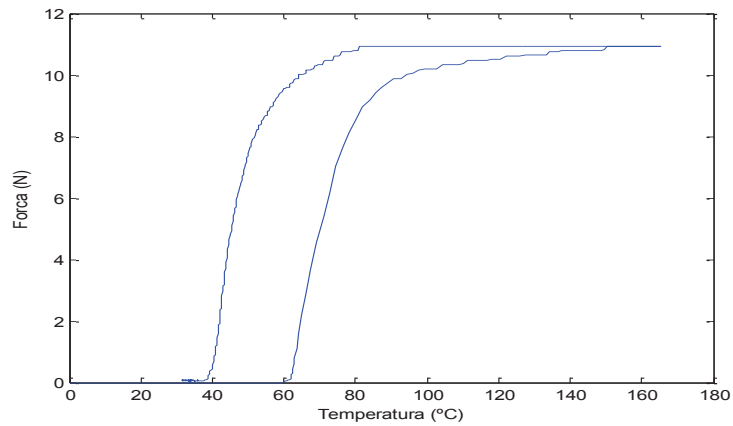


Figura 4.4 - Gráfico da força x temperatura com a estrutura estática.

O segundo ensaio de modelagem foi realizado com a estrutura dinâmica, utilizando o mesmo pulso que foi aplicado à planta com estrutura estática, a fim de verificar seu comportamento, com respeito ao deslocamento máximo exercido pela mola LMF e o comportamento da temperatura.

Verificou-se que as mesmas características de tempo de resposta foram obtidas, tanto com a estrutura estática quanto com a estrutura dinâmica. O deslocamento máximo foi de 18,35 mm (Figura 4.5).

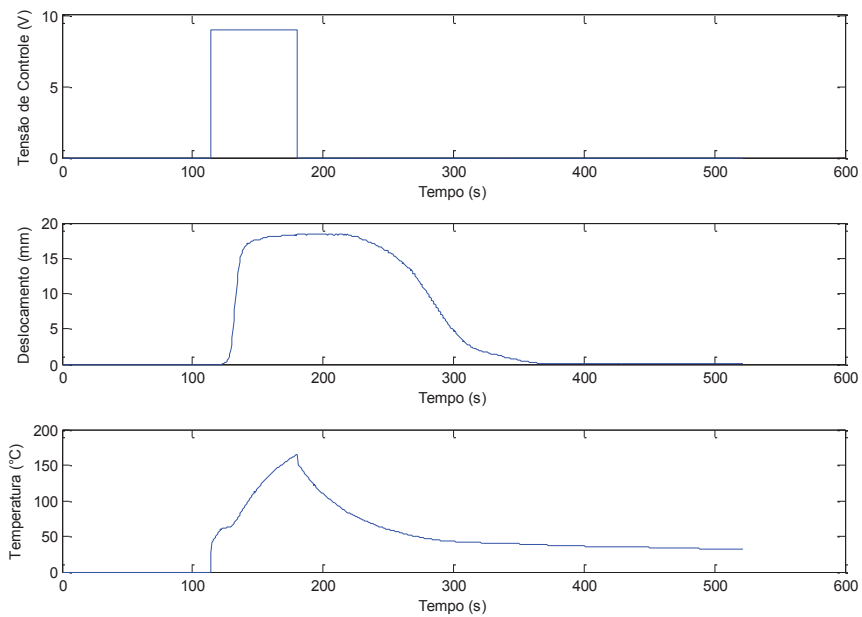


Figura 4.5 - Resposta do sistema ao pulso com a estrutura dinâmica.

## 4.5 PROJETO DO CONTROLADOR

A partir dos dados de caracterização do sistema foi possível iniciar o projeto do controlador Fuzzy, utilizando as técnicas já descritas no capítulo 2.

Na mesma interface para aquisição dos valores de resposta do sistema, adicionou-se o controlador, como representado na Figura 4.6. Na interface de saída são adquiridos os os dados e traduzidos para a linguagem Fuzzy. A interface de entrada converte a saída Fuzzy do controlador para um valor preciso a ser fornecido ao sistema. A definição dos conjuntos Fuzzy também faz parte dessa estrutura, representando as regras que incluem os universos de discursos usados nas variáveis de entrada e saída.

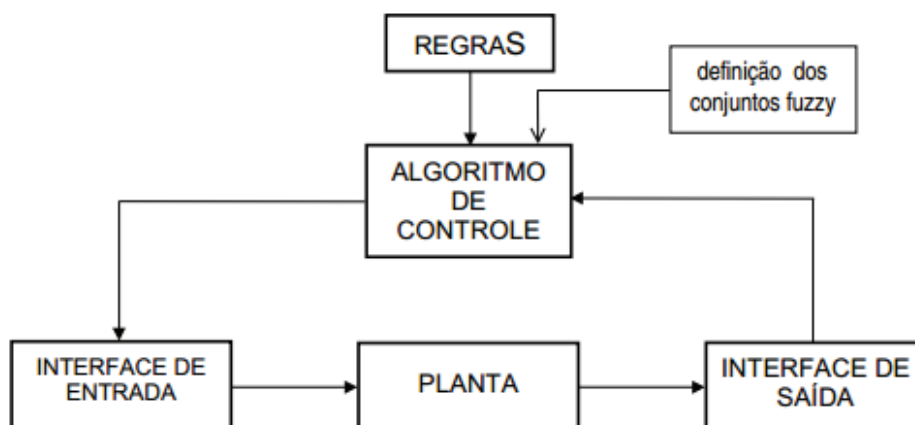


Figura 4.6 - diagrama de bloco do controlador Fuzzy

Por fim, o algoritmo de controle, usando as regras disponíveis, gera a decisão sobre a próxima entrada, a partir de um determinado estado do processo.

Optou-se pelo controlador Fuzzy do tipo MANDAMI, a definição das variáveis de controle foram criadas sobre o erro e variação do erro, com o universo de discurso normalizado conforme figuras 4.7 e 4.8. Na figura 4.9, mostra-se a variável de saída, o universo de discurso será discreto.

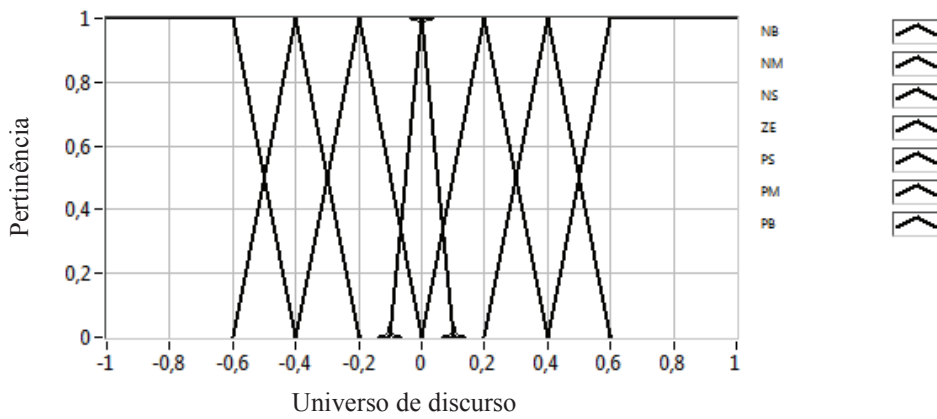


Figura 4.7 - Variável de Controle – Erro

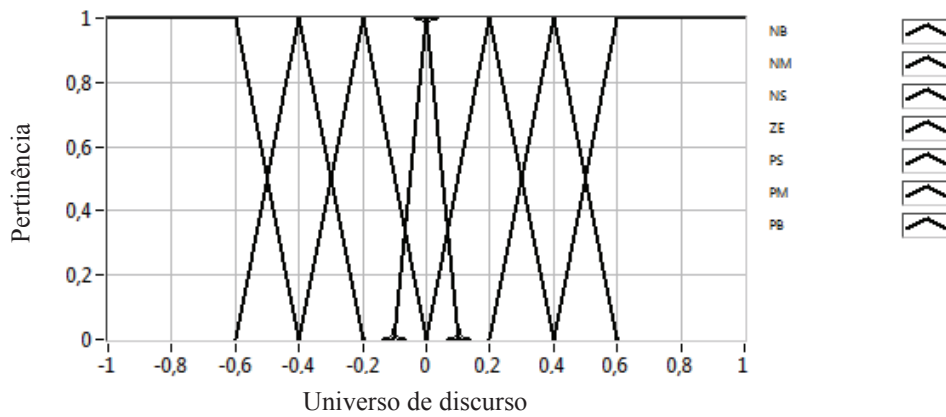


Figura 4.8 - Variável de controle - Variação do Erro

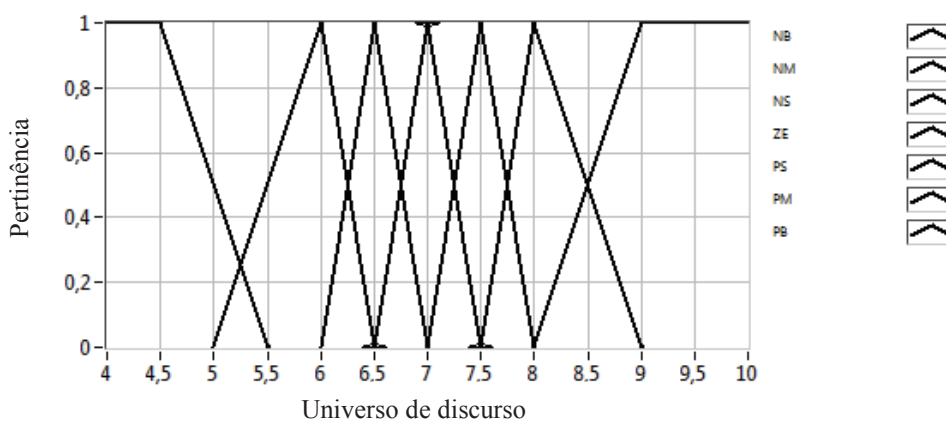


Figura 4.9 - Variável de Saída – Controle

Os conjuntos de borda utilizados foram os do tipo trapezoidal e os internos são do tipo triangular, cada variável possui sete conjuntos, denominados: NB (negative big), NM

(negative medium), NS (negative small), ZE (zero), PS (positive small), PM (positive medium), PB (positive big).

Tabela 4.1 – Conjunto de borda do erro

Conjunto: Erro	Tipo	Pontos
<b>NB</b>	Trapezoid	-1,05; -1,05; -0,6; -0,4
<b>NM</b>	Triangle	-0,6; -0,4; -0,2
<b>NS</b>	Triangle	-0,4; -0,2; 0,0
<b>ZE</b>	Triangle	-0,1; 0,0; 0,1
<b>PS</b>	Triangle	0,0; 0,2; 0,4
<b>PM</b>	Triangle	0,2; 0,4; 0,6
<b>PB</b>	Trapezoid	0,4; 0,6; 1,05; 1,05

Tabela 4.2 – Conjunto de borda da variação do erro

Conjunto: Var. Erro	Tipo	Pontos
<b>NB</b>	Trapezoid	-1,05; -1,05; -0,6; -0,4
<b>NM</b>	Triangle	-0,6; -0,4; -0,2
<b>NS</b>	Triangle	-0,4; -0,2; 0,0
<b>ZE</b>	Triangle	-0,1; 0,0; 0,1
<b>PS</b>	Triangle	0,0; 0,2; 0,4
<b>PM</b>	Triangle	0,2; 0,4; 0,6
<b>PB</b>	Trapezoid	0,4; 0,6; 1,05; 1,05

Tabela 4.3 – Conjunto de borda da saída

Conjunto: Controle	Tipo	Pontos
<b>NB</b>	Trapezoid	3,95; 3,95; 4,5; 5,5
<b>NM</b>	Triangle	5; 6; 6,5
<b>NS</b>	Triangle	6; 6,5; 7
<b>ZE</b>	Triangle	6,5; 7; 7,5
<b>PS</b>	Triangle	7; 7,5; 8
<b>PM</b>	Triangle	7,5; 8; 9
<b>PB</b>	Trapezoid	8; 9; 10,05; 10,05

O método de defuzzificação foi centro da área. As regras de controle são apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Regra de controle para defuzzificação

Erro\Var. Erro	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
<b>NB</b>	NB	NB	NB	NB	NB	NS	ZE
<b>NM</b>	ZE	NB	NB	NB	NM	ZE	PS
<b>NS</b>	NB	NB	NB	NB	ZE	PS	PM
<b>ZE</b>	NB	ZE	NM	NM	NS	PM	PB
<b>PS</b>	NM	NS	PM	PB	PB	PB	PB
<b>PM</b>	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
<b>PB</b>	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

A superfície de controle (Figura 4.10a) e o mapa de contorno (Figura 4.10b) gerada pelo sistema LabVIEW permite visualizar como as regras criadas em função das variáveis de erro e variação de erro irão atuar sobre o controle. Através da Figura 4.10, consegue-se perceber que a sensibilidade do controle aumenta conforme aumenta positivamente o erro e a variação do erro.

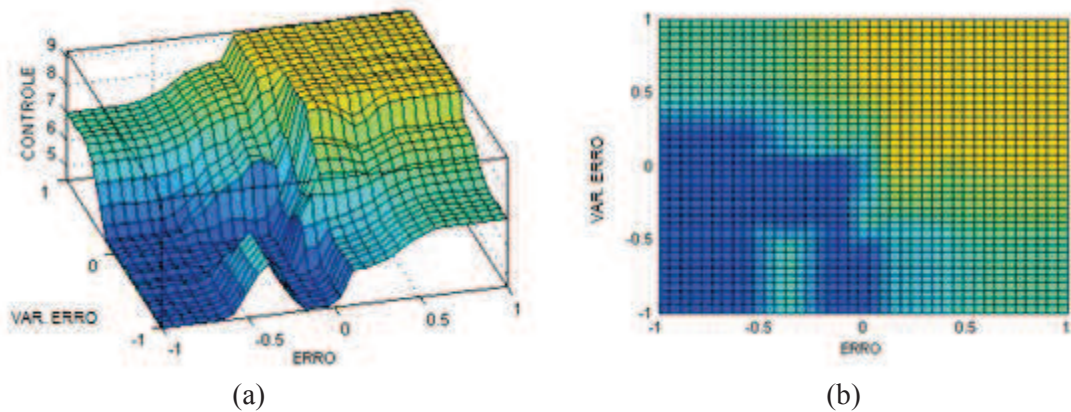


Figura 4.10 (a) Superfície de controle. (b) Mapa de contorno.

## 4.6 CONCLUSÕES

A partir das características da planta foi possível realizar o projeto do controlador Fuzzy que melhor se adequou à planta. O ambiente de programação também ajudou a realizar os ajustes finos com o sistema em tempo real.

A grande vantagem do controle Fuzzy está no fato de não necessitar de um modelo matemático, e sim a percepção de seu comportamento.

Os resultados experimentais do controlador são apresentados no capítulo 5, bem como as conclusões finais.

## **CAPÍTULO V**

### **5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

#### **5.1. INTRODUÇÃO**

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos ensaios experimentais feitos com estrutura dinâmica e estática usando o atuador LMF sem e com treinamento. Além de verificar a capacidade do controlador a força e o deslocamento da estrutura.

#### **5.2. ENSAIOS DE ACIONAMENTO DO SISTEMA**

Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios realizados com a estrutura dinâmica com o controle de força sendo o deslocamento apenas monitorado. Uma referência aleatória foi aplicada à planta através do controlador Fuzzy variando entre 0 e 40 N. O tempo de permanência em cada patamar de referência ficou fixado em 95 segundos para que houvesse tempo de estabilização do atuador, no caso de ocorrer sobressinal. O comportamento da temperatura foi plotado com o sinal de controle para comparações do atuador de LMF com e sem treinamento. Na Figura 5.1, é mostrada a curva de resposta da força com o atuador sem treinamento. O gráfico de temperatura ficou entre 40 e 54 °C para as referências de força entre 12 e 40 N com os picos de temperatura, entre o intervalo de 0 a 100 s, correspondendo a um sobressinal de força de 10 % devido a um pico de temperatura de 51,24 °C. O controlador, neste mesmo intervalo de tempo, deixou de aquecer o atuador para manter a força dentro do patamar de referência e, devido ao retardo no tempo de resposta, após a queda de 5 °C de temperatura a força começou a decair rapidamente, provocando um novo ciclo de aquecimento. Dessa forma, nesse intervalo de tempo o controlador não teve tempo suficiente para estabilizar o sinal. Situação semelhante ocorreu durante o intervalo entre 100 e 200 s, contudo, o controlador conseguiu melhor resposta a partir do terceiro ciclo de referência, após 200 s, onde a variação do sinal de força não ultrapassou 5 % da referência.

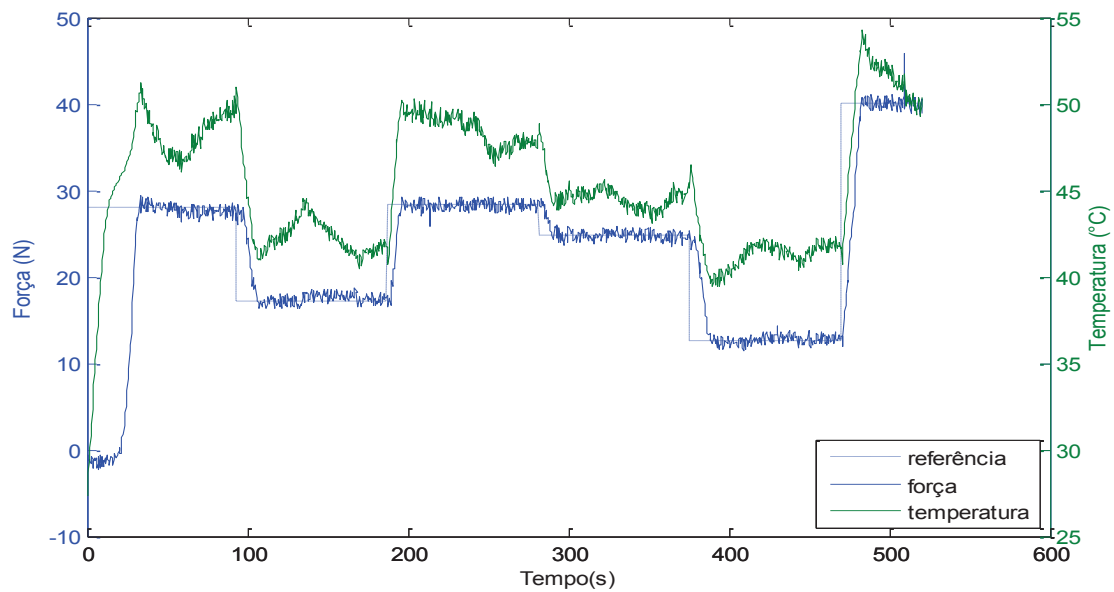


Figura 5.1 – Curva de resposta da força, estrutura dinâmica com atuador sem treinamento.

Após o treinamento (Figura 5.2), o atuador tornou-se mais estável com relação ao controle, pois o sinal de força não ultrapassou 5 % em todos os ciclos de referência. No entanto, para os mesmos patamares de referência de força do atuador sem treinamento, ocorreu um acréscimo na faixa de temperatura de trabalho ficando entre 52 °C e 95 °C. O último patamar de referência, 40 N, não foi atingido pelo atuador mesmo com a ascensão constante da curva de temperatura, a força conseguiu um valor máximo de 37,76 N. Também cabe destacar que o comportamento da temperatura em função dos patamares de referência impostos à planta, após o treinamento, ficou mais estável não acontecendo quedas bruscas como ocorridas no atuador sem treinamento.

Com o controle de força, foi observado o deslocamento provocado pelo atuador sem e com treinamento respectivamente (Figura 5.3). Para a mesma referência de força, o atuador com treinamento manteve-se em média 1,57 mm acima da posição do atuador sem treinamento, verifica-se que não houve maior deslocamento e sim uma alteração da constante de elasticidade da mola LMF.

Após o ensaio de controle de força do atuador com a estrutura dinâmica e observação do deslocamento, realizou-se um ensaio de controle de posição com a observação da força exercida utilizando o atuador com e sem treinamento. Os resultados foram agrupados em relação ao atuador com e sem treinamento são apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5.

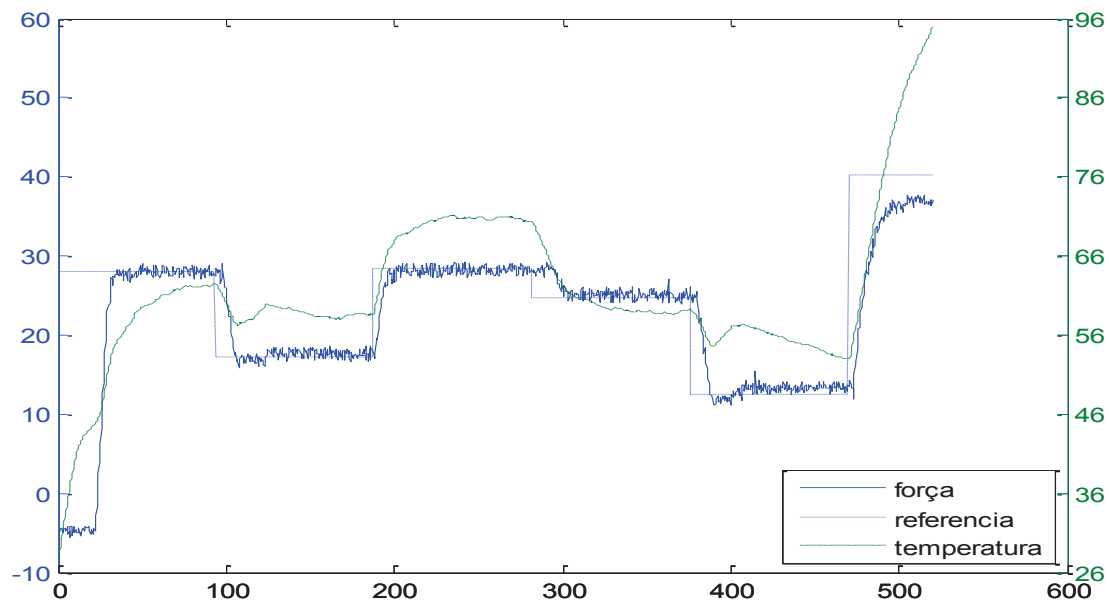


Figura 5.2 - Curva de resposta da força, estrutura dinâmica com atuador treinado.

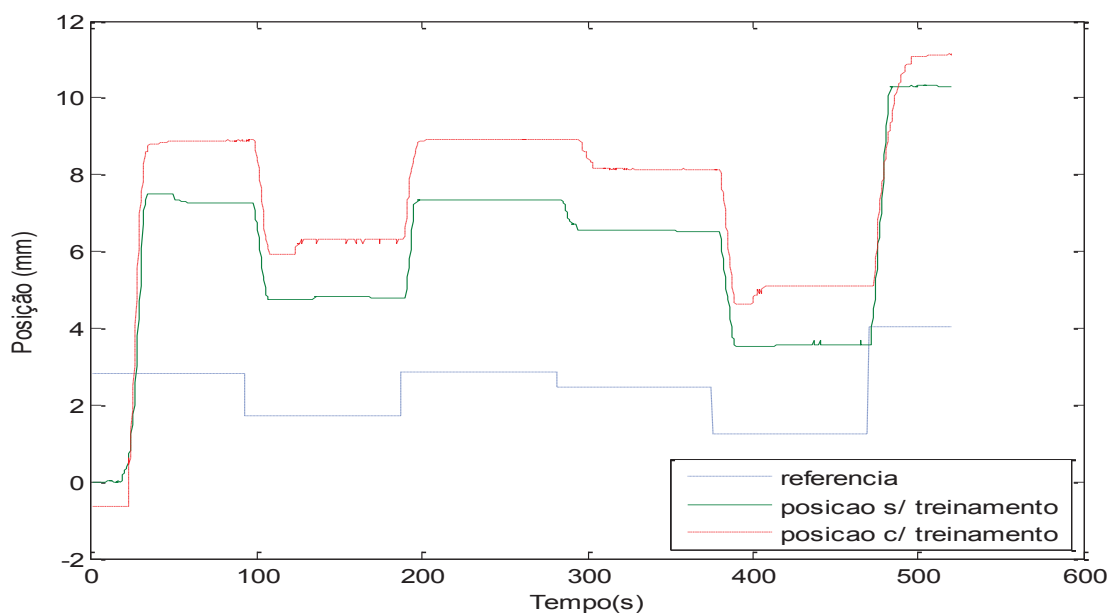


Figura 5.3 – Curva de resposta dos deslocamentos observados, atuador sem e com treinamento.

Na Figura 5.4 está demonstrado o controle de posição com atuador LMF com e sem treinamento. O posicionamento do atuador sem treinamento possui melhor exatidão que o treinado, pois o erro em regime do controle de posição com atuador sem treinamento ficou em 2,56 %, enquanto que após o treinamento, o erro de regime passou para 8,84 %, e a temperatura média após o treinamento aumentou em 14 °C (Figura 5.5).

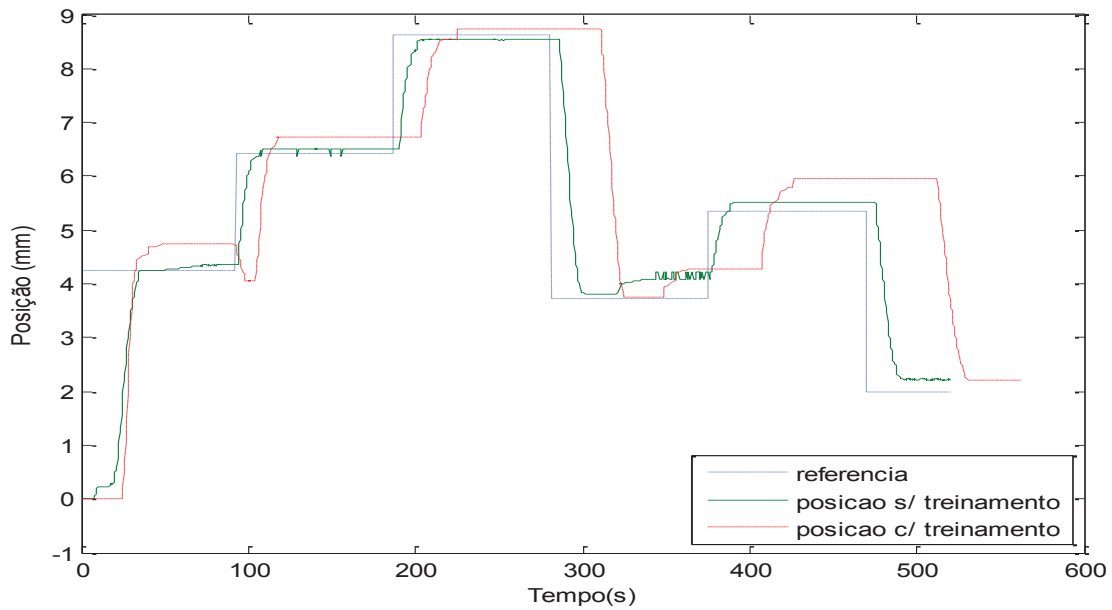


Figura 5.4 – Curva de resposta da posição, estrutura dinâmica, atuador com e sem treinamento.

Conforme pode ser visto na Figura 5.5, com o treinamento, a temperatura se tornou mais estável, ou seja, a temperatura do atuador LMF apresenta uma curva muito semelhante ao comportamento da temperatura do mesmo sem treinamento, no entanto, apresentou um aumento médio de 14 °C para realizar o mesmo controle de posição quando sem treinamento.

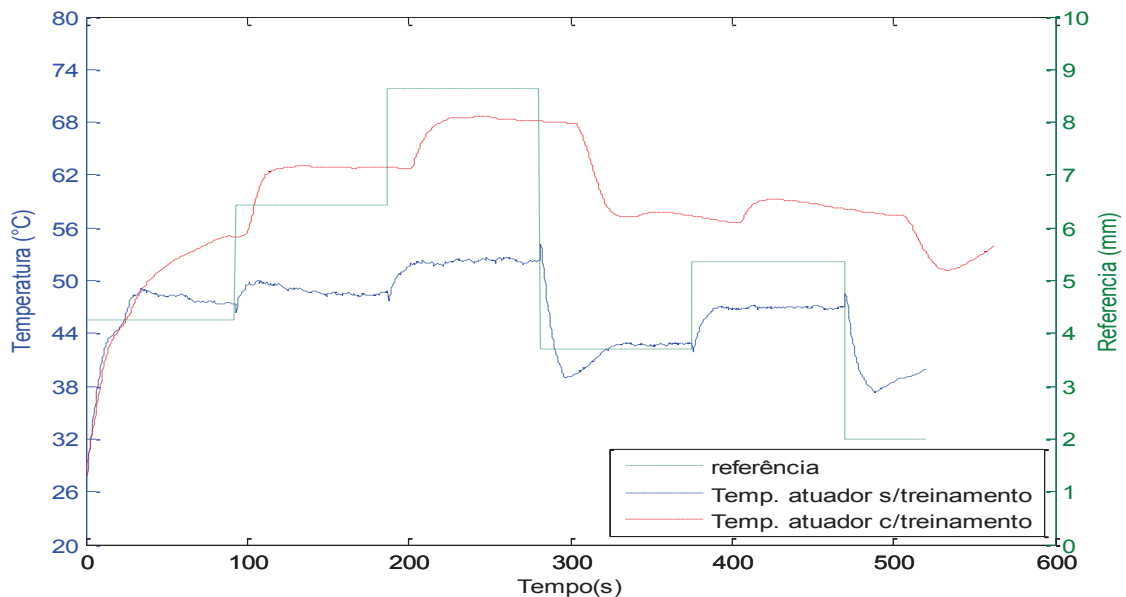


Figura 5.5 - Comportamento da temperatura, atuadores com e sem treinamento.

No entanto, na Figura 5.6 verifica-se que o atuador sem treinamento necessitou menos força para atingir a posição solicitada, em média 3,57 N a menos.

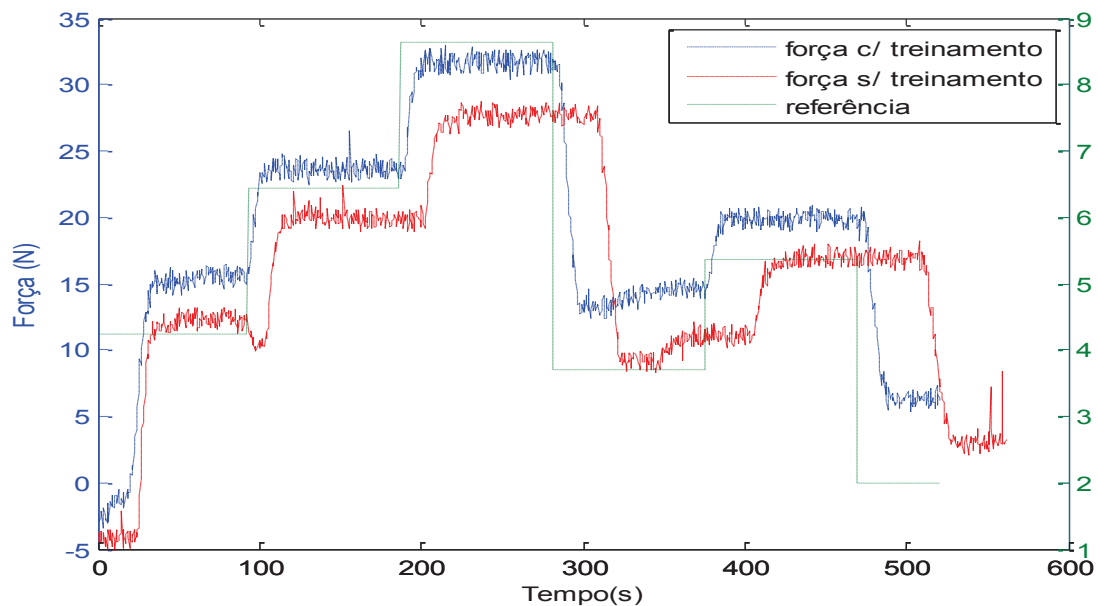


Figura 5.6 - Força observada com e sem treinamento, estrutura dinâmica.

Na sequência foram realizados ensaios de força com a estrutura estática analisando a mudança da constante de elasticidade do atuador para um determinado comprimento.

Sem treinamento, na condição da estrutura estática, o atuador iniciou com 36 N diferentemente do atuador treinado que não exerceu força inicial (Figura 5.7).

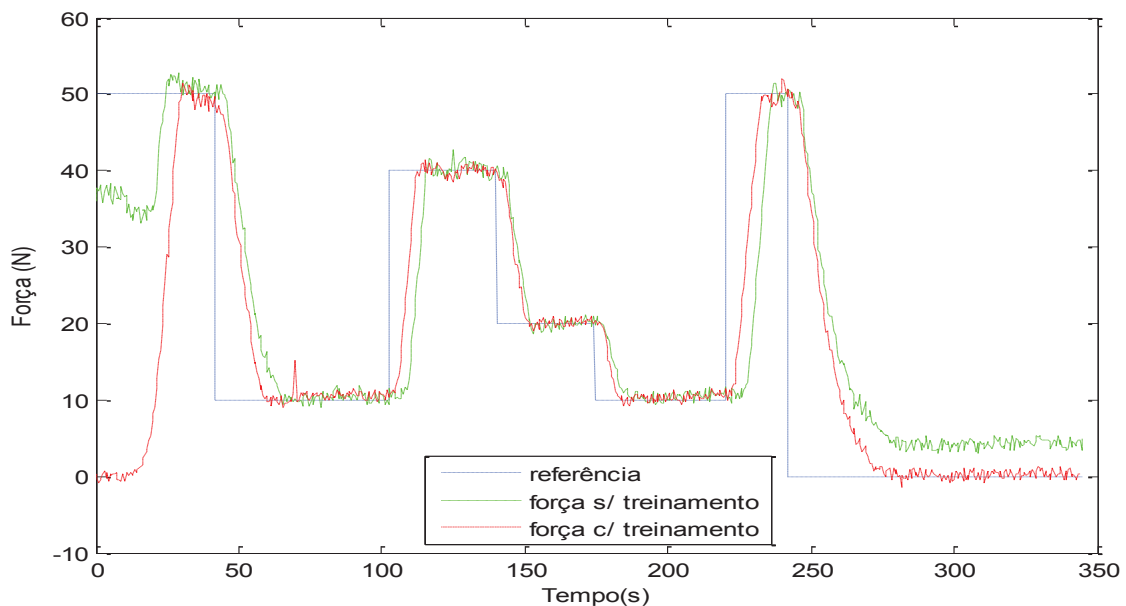


Figura 5.7 – Curva de resposta da força, estrutura estática

Esse comportamento pode ser devido a uma pré-carga oriunda de uma maior rigidez do atuador sem treinamento. Após a ativação do atuador foi possível controlar a

força entre 10 e 50 N, contudo o atuador sem treinamento não atingiu o referencial zero de força como no treinado.

As curvas da Figura 5.8 reforçam a ideia da estabilidade do atuador após o treinamento, uma vez que, para as mesmas referências, a temperatura do atuador com treinamento se apresenta mais estável. Entretanto, fica evidente o acréscimo da temperatura para os mesmos ciclos de trabalho.

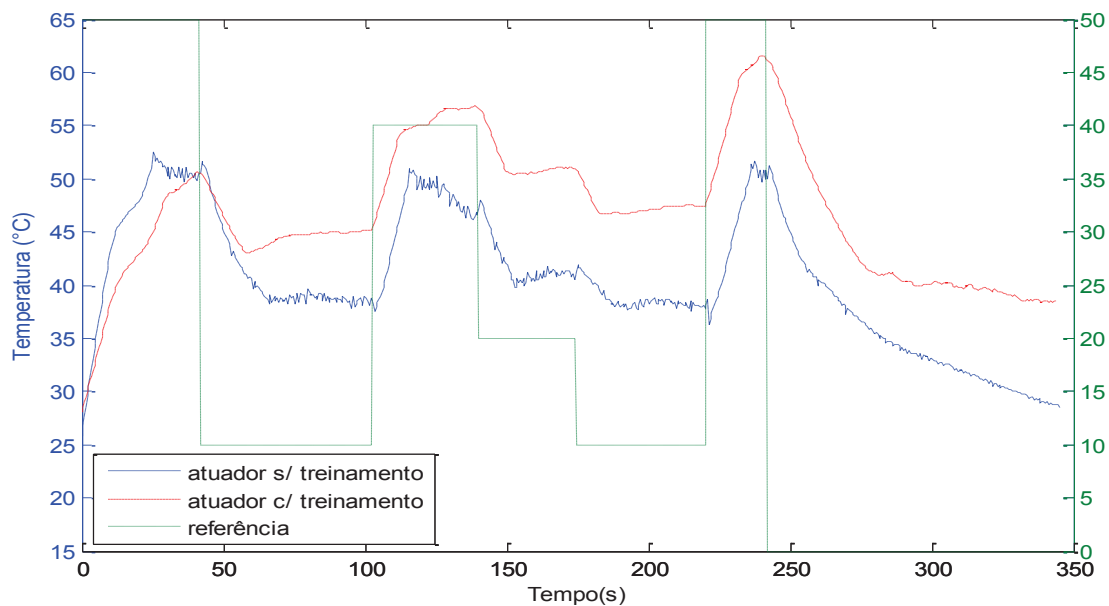
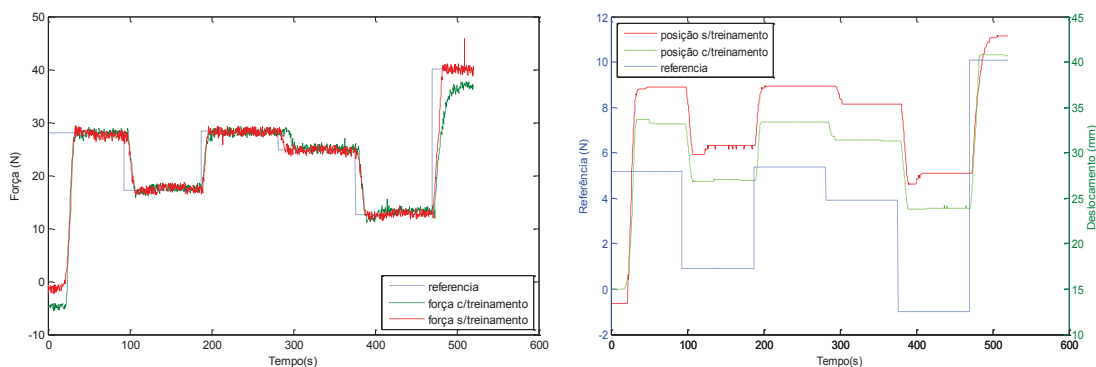


Figura 5.8 – Comportamento da temperatura, estrutura estática.

Comparando os gráficos da Figura 5.9a e 5.9b, onde tem-se o controle de força e o deslocamento observado para o atuador com e sem treinamento, pode-se verificar que após o treinamento, para as mesmas referências de força, o atuador deslocou-se em média 1,56 mm menos que antes do treinamento.



(a)

(b)

Figura 5.9 – Ensaio estrutura dinâmica. (a) controle de força. (b) deslocamento observado.

Desta forma, ao relacionar-se a força dinâmica controlada com o deslocamento observado, tem-se a constante de elasticidade dinâmica do atuador LMF (Figura 5.10). A constante de elasticidade dinâmica do atuador LMF após o treinamento aumenta devido ao menor deslocamento da mola LMF.

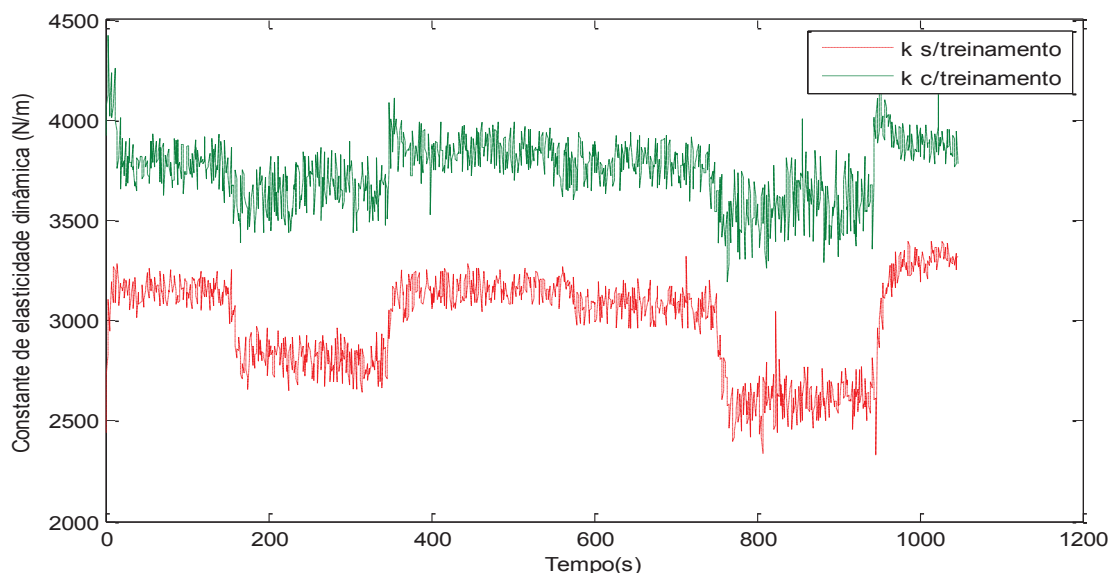


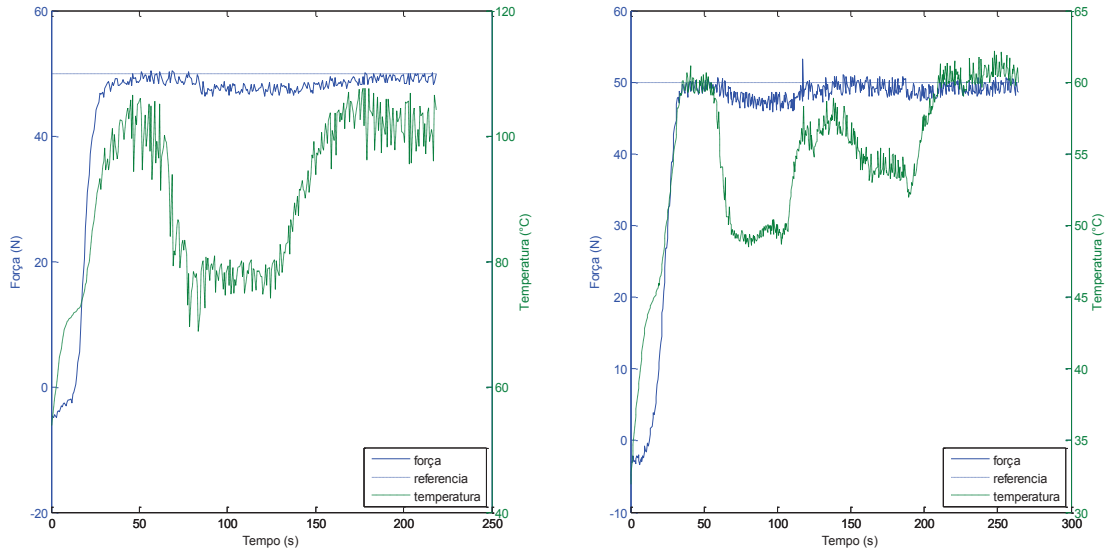
Figura 5.10 – Constante de elasticidade dinâmica da mola LMF.

Além dos ensaios de controle de força e posição do atuador LMF, também foram realizados ensaios com distúrbios com o intuito de averiguar a robustez do controlador. O distúrbio neste ensaio foi introduzido com um ventilador soprando ar na temperatura ambiente sobre o atuador LMF. Dependendo da proximidade e velocidade do atuador, pode-se reduzir a temperatura da mola LMF em até 10 °C.

Inicialmente utilizou-se a estrutura dinâmica para o ensaio de força, verificando-se o comportamento do atuador durante o distúrbio. Na Figura 5.11 é mostrado o gráfico da força com distúrbio na temperatura utilizando um atuador antes e após o treinamento térmico.

Após 60s, o atuador atingiu a referência (50 N), quando foi aplicado um distúrbio sobre a mola LMF durante 60 s, no atuador treinado (Figura 5.11a), o retorno ao valor de referência demorou outros 60 s, enquanto que no atuador sem o treinamento (Figura 5.11b) conseguiu recuperar o sistema em menos de 20 s, contudo, a rápida recuperação provocou um sobre sinal e o sistema apenas se estabilizou após 100 s do distúrbio inicial. Mesmo a temperatura não retornando ao valor inicial antes do distúrbio, o controlador conseguiu

retornar a força ao patamar de referência, essa condição pode ser devido à histerese existente entre a relação de força e temperatura, onde para a mesma relação de força pode existir dois patamares de temperatura.



(a) (b)  
 Figura 5.11 – Controle de Força, (a) com treinamento. (b) sem treinamento.

O segundo ensaio, ainda com a estrutura dinâmica, foi o controle de posição conforme mostrado na Figura 5.12.

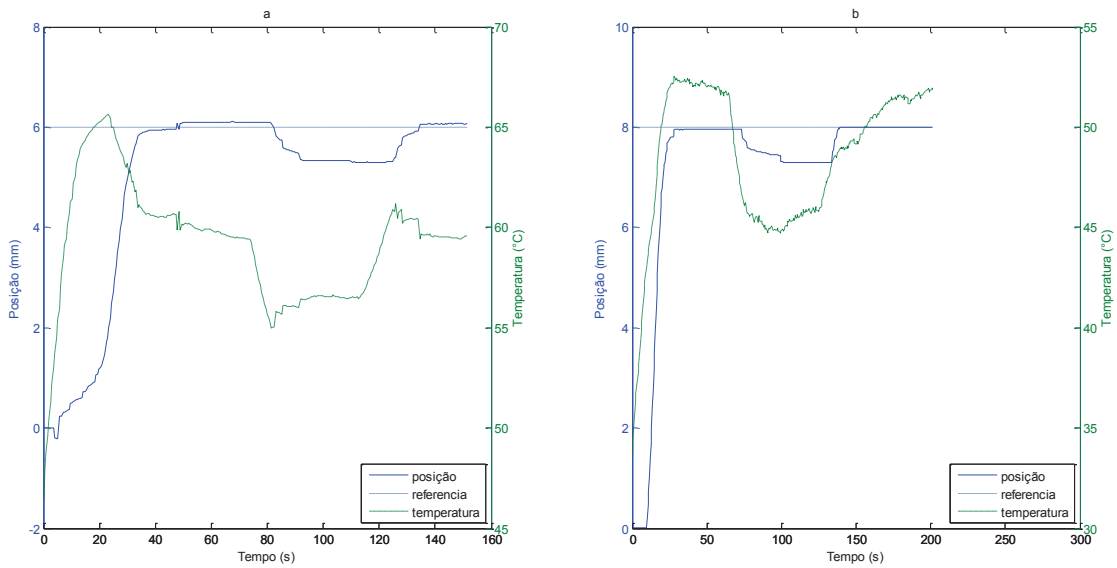


Figura 5.12 - Controle de Posição, (a) com treinamento. (b) sem treinamento.

No controle de posição com o atuador treinado (Figura 5.12a), a posição da planta estabilizou com 2 % acima do sinal de controle. Após 70 s aplicou-se o distúrbio de temperatura sobre a planta durante 40 s, o controlador conseguiu estabilizar em 10 s. Por outro lado, no atuador sem treinamento (Figura 5.12b), a estabilização ocorreu com 1,2 % e a recuperação da planta, com o mesmo distúrbio do anterior, ficou em 6 s.

No último ensaio o distúrbio foi aplicado na estrutura estática (Figura 5.13). No controle de força com a estrutura estática, o atuador de LMF treinado (Figura 5.13a) conseguiu estabilizar com 60 s após sua ativação, mesmo com o comportamento da temperatura ascendente durante o respectivo período. A aplicação do distúrbio de temperatura, durante 50 s, provocou uma redução de força, contudo não foi suficiente para interromper o comportamento ascendente da temperatura, devido a isso, a recuperação da planta se deu em 2 s após a retirada do distúrbio. No ensaio com o atuador de LMF sem treinamento (Figura 5.13b), a recuperação da planta foi mais lenta, 40 s. Nestes dois ensaios em particular, devido à estrutura estática, o atuador de LMF, conseguiu exercer uma força máxima de até 120 N sobre a estrutura.

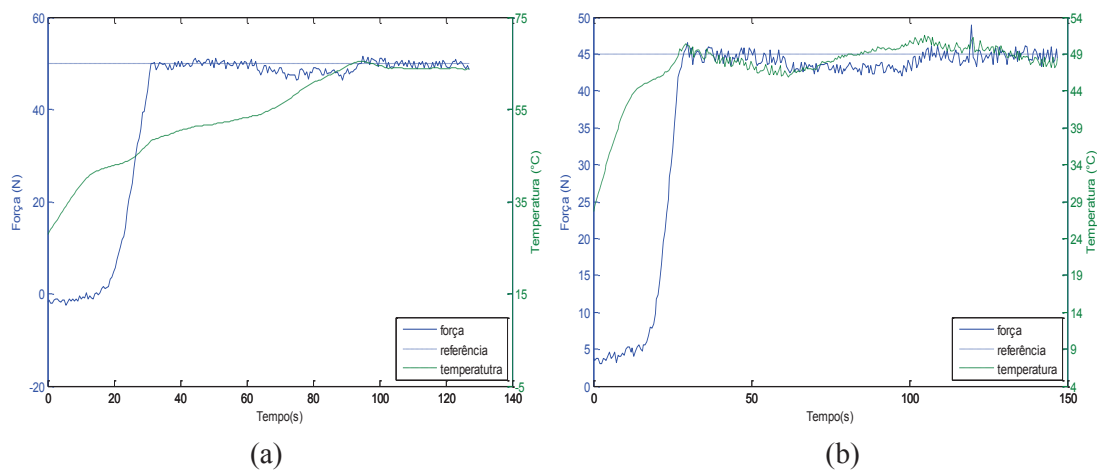


Figura 5.13 - Controle de Força, (a) com treinamento. (b) sem treinamento.

### 5.3. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Na estrutura dinâmica o deslocamento ficou abaixo de 60 mm que era o valor esperado para o atuador de LMF tipo mola helicoidal, considerando seu comprimento de projeto. Isso pode ter ocorrido devido ao alongamento natural que o atuador sofreria quando em regime de trabalho e/ou por baixo carregamento oferecido pela mola de retorno

ao atuador. Essa última hipótese se refere a uma característica dos materiais com memória de forma de que precisa de carregamento para exercer maiores contrações. Outro fato ocorrido é que ao retornar a posição inicial e, depois de algum tempo, o atuador de LMF ficava com uma curvatura como uma flambagem no sentido axial. Isso ocorre porque a mola de retorno chega à posição de repouso e o atuador ainda continua se expandindo. Como o atuador não consegue vencer a força de contração da mola de retorno acaba flambando.

Em comparação aos tempos de resposta dos atuadores com e sem treinamento, não houve mudança significativa, o que se pode observar foi que após o treinamento a constante de elasticidade dinâmica do atuador LMF aumentou em média 26,10 % em relação a constante de elasticidade dinâmica do atuador sem treinamento.

Outro ponto a se considerar quando se trata da mola de LMF é o tempo de arrefecimento, pois o acréscimo da temperatura de trabalho após os treinamento fez com que o atuador demorasse o dobro do tempo para atingir valores de referências pequenos.

O controlador não entendeu como distúrbio as variações provocadas menores que 5 °C, pois havia potência suficiente na fonte de alimentação para aquecer o atuador LMF, entretanto, para distúrbios com variações acima de 5 °C o controlador tenta compensar o distúrbio até saturar, isso explica o atraso, de 10 s em média, entre o distúrbio inserido e a perda de força do atuador LMF.

A utilização da mola LMF sem passar pelo treinamento pode ser útil em aplicações que não exijam grande deslocamento e que tenha o ciclo de trabalho baixo, uma vez que, o atuador consegue exercer os mesmos deslocamentos e/ou força de um atuador treinado, porém com ciclo de temperatura abaixo de 20 °C aproximadamente.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido nessa pesquisa possibilitou identificar as características de um atuador tipo mola helicoidal construída a partir de um fio de liga de memória de forma de níquel-titânio. No atuador foi possível controlar a posição e a força a partir de um controlador inteligente do tipo Fuzzy, além de verificar o seu comportamento com ou sem treinamento.

Os estudos foram realizados experimentalmente norteados pela utilização de técnicas de inteligência computacional (lógica nebulosa) o que permitiram verificar as características do atuador antes e depois do treinamento.

Os resultados obtidos demonstram a capacidade de utilização do atuador tipo mola de LMF como atuador unidirecional com ou sem treinamento. Sem treinamento foi observado que atingiria a mesma força que com o atuador treinado com a vantagem de a temperatura ser menor em aproximadamente 14 °C. A desvantagem foi não atingir completamente a estabilização do atuador tipo mola. Já com o treinamento, foi observado que o atuador oscilou menos sobre o ponto de referência, entretanto, a temperatura de trabalho foi maior. Se o foco de atuação for o controle de posição, o atuador de LMF sem treinamento tem a vantagem de exercer menos força para atingir a referência em comparação com treinamento.

Com relação à tolerância aos distúrbios de temperatura o atuador com treinamento se comportou melhor do que sem o treinamento devido à estabilidade no comportamento de temperatura conseguido por ação do treinamento.

#### **5.4. PROPOSTA PARA OUTROS TRABALHOS**

O trabalho serviu para melhor compreensão do comportamento do atuador tipo mola helicoidal de LMF, como também permitiu o aprofundamento do conhecimento no ferramental eletroeletrônico necessário para ativação de fio. Sendo assim, é possível elencar algumas propostas para outros trabalhos que darão continuidade a este.

- Otimização da estrutura mecânica de sustentação da mola LMF (atuador), que garantam menor atrito e forças torcionais para que a força do atuador seja totalmente transformada no trabalho que se deseja;
- Caracterização da mudança de resistência elétrica do atuador com a temperatura, para que o controle seja feito baseado na variação de resistência elétrica eliminando a utilização de sensores discretos;
- Estudar o comportamento de outras molas com treinamentos e números de ciclos variados possibilitando identificar o ponto ótimo de utilização do atuador tipo mola helicoidal;
- Otimização da fonte de potência elétrica para que seja possível atingir temperaturas mais elevadas possibilitando que outros diâmetros de fios possam ser utilizados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, R. A. A. et al. **Shape memory alloy helical springs: modeling, simulation and experimental analysis.** Mechanics of Solids in Brazil 2009. [S.I.]: Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2009. p. 169-181.
- AHN, K. K.; KHA, N. B. Position control of shape memory alloy actuators using self tuning fuzzy PID controller. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, v. 4, n. 6, p. 756-762, 2006.
- AN, S.-M. et al. 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.
- ARBAB, S. C. et al. Superelastic behavior modeling in shape memory alloys. **Journal dePhysiqueIV**, **112**, p. 205-208, 2003.
- BIRMAN, V. Review of mechanics of shape memory alloy structures. **Applied Mechanics Reviews**, v. 50, p. 629-645, 1997.
- 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. et al. 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.
- CABRERA, J. A. et al. Arquitectura eficiente para la implementación hardware de sistemas de inferencia difusos. **Ingiería Electrónica, Automática y Comunicaciones**, v. 23, n. 1, p. 59-66, 2003.
- CHO, K. J. et al. Review of manufacturing processes for soft biomimetic robots. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 10, n. 3, p. 171-181, 2009.
- CHOI, S. B. Position control of a single-link mechanism activated by shape memory alloy springs: experimental results. **Smart Materials and Structures**, **15**, p. 51-58, 2006.
- DA SILVA, E. P. Beam shape feedback control by means of a shape memory actuator. **Materials & Design**, v. 28, n. 5, p. 1592-1596, 2007.

- DELAEY, R. et al. Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations – Part 1: Structural and microstructural changes associated with the transformations. **Journal of Materials Science**, v. 9, p. 1521-1535, 1974.
- DIAS, F. M. R. M. F. **Técnicas de controlo não-linear baseadas em Redes Neurais: do algoritmo à implementação**. Univerdidade de Aveiro. Aveiro. 2005.
- DONG, Y. et al. A changeable aerofoil actuated by shape memory alloy springs. **Materials Science and Engineering: A**, v. 485, p. 243-250, June 2008.
- DUTTA, S. M. et al. Modeling and control of a shape memory alloy actuator. **International symposium on intelligent control**, p. 1007-1012, 2005.
- FAUSETT, L. **Fundamental of Neural Networks - Architetures, Algorithms and Applications**. [S.I.]: Prentice Hall, 1994.
- FERNANDES, F. M. B. **Ligas com Memória de Forma**. Lisboa. 2003.
- 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.I.]: Berlin: Springer, v. VII, 1996.
- GEDOUIN, P. A. et al. Experimental comparison of classical PID and model-free control: Position control of a shape memory alloy active spring. **Control Engineering Practice**, **19**, p. 433-441, 2011.
- HAN, H. P. et al. Buckling enhancement of epoxy columns using embedded shape memory alloy spring actuators. **Composite Structures**, v. 72, p. 200-211, 2004.
- HESSELBACH, J. Shape memory actuators. **adaptronics and smart structures**, Berlin, p. 143-160, 1995.
- JACKSON, C. M. et al. **55 - Nitinol - The Alloy with a Memory: Its Physical Metalurgy, Properties, and Applications: A Report**. Nasa. Washington. 1972.
- JACKSON, C. M. et al. 55-Nitinol-the alloy with memory: Its physical metallurgy, properties, and applications, 1972.
- JAYENDER, R. V. P. J.; NIKUMB, M. O. S. Modeling and gain scheduled control of shape memory alloy actuators. **Proc. of the IEEE Conf. on Control Applications**, p. 767-772, 2005.
- KAUFFMAN, G.; MAYO, I. Memory Metal. **Chem Matters**, p. 4-7, October 1993.
- KAZUHIRO OTSUKA, C. M. W. Shape Memory Materials. [S.I.]: Cambridge University Press, 1998. p. 284.
- KHO, J. S. et al. **Finger-sized climbing robot using artificial proleg**. International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). [S.I.]: IEEE RAS and EMBS. 2010. p. 610-615.

- KIM, B. et al. An earthworm like micro robot using shape memory alloy actuator. **Sensor and Actuators A: Physical**, v. 125, n. 2, p. 429-437, 2006.
- KRANOSELSKII, M.; POKROVSKII, A. **System with hysteresis**. Moscow: Nauka, 1983.
- KRISHNAN, H. et al. Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the memory effects associated with martensitic transformations - Part 2: The macroscopic mechanical behaviour. **Journal of Materials Science**, v. 9, p. 1536-1544, 1974.
- LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications**. Berlin: Springer, 2008.
- LEE, S.-K.; KIM, B. Design parametric study based fabrication and evaluation of in-pipe moving mechanism using shape memory alloy actuators. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 22, n. Issue 1, 2008. 96-102.
- LEESTER-SHÄDEL, M. et al. Micro actuator on the basis of thin SMA foils. **Microsystem Technologies**, 14, 2008. 697-704.
- MENCIASSI, A. et al. **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. et al. Effect of cyclic deformation on the pseudoelasticity characteristics of Ti-Ni alloys. **Metallurgical Transactions**, n. 17A, p. 115-120, 1986.
- MOHAMMAD, H. E.; HASHEM, A. Nonlinear control of a shape memory alloy actuated manipulator. **Trans. of the ASME**, v. 124, n. 4, p. 566-575, 2002.
- NESPOLI, A. et al. The high potential of shape memory alloy in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators. **Sensors and Actuators A: Physical**, p. 149-160, 2010.
- NOGUEIRA, M. M. **Aplicando Lógica Fuzzy no Controle de Robôs Móveis usando Dispositivos Lógicos Programáveis e a Linguagem VHDL**. UNESP. Ilha Solteira, SP, p. 96. 2013.
- OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. **Shape Memory Materials**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- PAIVA, A.; SAVI, M. A. An overview of constitutive models for shape memory alloys. **Mathematical Problems in Engineering**, p. 1-30, 2006.
- 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.
- REZENDE, S. O. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri: Editora Manole Ltda, 2005.

- RIBEIRO, V. M. C. **Controlo de sistemas dinâmicos com rede neuronais artificiais**. Universidade de Aveiro. [S.I.]. 2008.
- ROGERS, C. Intelligent Materials. **Scientific American**, p. 154-157, September 1995.
- SANTOS JUNIOR, A. A. D. **Elementos de Máquinas I - Molas helicoidas e planas**. Unicamp. Campinas, p. 1-18. 2001.
- SAVI, M. A. et al. Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma. **2º Congresso Temático de Aplicações de Dinâmica e Controle da Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional (SBMAC)**, São José dos Campos, SP, Agosto 2003. 18-22.
- SHAMELI, E. et al. Stability analysis and nonlinear control of a miniature shape memory alloy actuator for precise applications. **Mechatronics**, **15**, p. 471-486, 2005.
- SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- SHHEIBIA, T. A. A. E. **Controle de um Braço Robótico Utilizando uma Abordagem de Agentes Inteligentes**. UFPB. Campina Grande, PB, p. 98. 2001.
- SILVA JUNIOR, A. **Caracterização dinâmica de um protótipo de stockbridge pseudoelástico**. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2011.
- ŠITTNER, P. et al. Recovery stress generation in shape memory ti50ni45cu5 thin wires. **Materials Science and 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. et al. 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.
- SUN, Q. P. et al. 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.
- TAI, N. T. et al. Predictive position and force for shape memory alloy cylinders. **Journal of Mechanical Science and Technology**, p. 1717-1728, 2010.
- TORRES-JARA, E. et al. Composable flexible small actuators built from thin shape memory alloy sheets. **Robotics & Automation Magazine**, **17**, 2010. 78-87.
- TRIMMER, B. A. et al. **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.
- VEERAMANI, A. S. et al. Hysteretic recurrent neural networks: a tool for modeling hysteretic materials and systems. **Smart Materials and Structures**, USA, 2009.
- VISINTIN, A. **Differential Models of Hysteresis**. Berlin: Springer, 1994.

- WAHL, A. M. **Mechanical Spring**. Cleveland, Ohio: Penton Publishing Company, 1944.
- WANG, Z. et al. A Micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin. **Sensors and Actuators A: Physical**, 144, 2008. 354-360.
- WARAM, T. C. **Actuator Design Using Shape Memory Alloys**. 2<sup>a</sup>. ed. Ontario, Canada: Hamilton, 1993.
- WASILEVSKI, R. J. On the Nature of the Martensitic Transformation. **Metallurgical Transactions**, v. 6A, p. 1405-1418, 1975.
- 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.I.]: AIAA journal of Guidance and Control. 1997.
- YAN, S. Z. et al. A gripper actuated by a pair. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, n. 8, p. 459-466, 2007.
- YANG, K.; GU, C. L. A Novel robot hand with embedded shape memory alloy actuators. **Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 216, n. 7, p. 737-745, 2002.
- ZHONG, Z. W.; YEONG, C. K. Development of a gripper using SMA wire. **Sensors and Actuators A: Physical**, 126, 2006. 375-381.