

APLICAÇÃO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA MAGNÉTICAS EM  
ATUADORES LINEARES

Renata Mercante Born

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO  
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

---

Prof. Theodoro Antoun Netto, Ph.D.

---

Prof. Marcelo Amorim Savi, D.Sc.

---

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, D.Sc.

---

Prof. João Carlos Ribeiro Plácido, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

BORN, RENATA MERCANTE

Aplicação de Ligas com Memória de  
Forma Magnéticas em Atuadores  
Lineares [Rio de Janeiro] 2007

XVII, 91 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
M.Sc., Engenharia Oceânica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal  
do Rio de Janeiro, COPPE

1. Ligas com Memória de Forma  
Magnéticas 2. Aplicação em Atuadores  
Lineares

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedico esta dissertação  
aos meus pais Alberto (in memoriam) e Fani,  
ao meu marido Eduardo Born,  
aos meus irmãos Anita e Rafael  
pelo amor e incentivo a mim sempre dados.

## **Agradecimentos**

- Primeiramente agradeço a Deus por me dar forças e me iluminar durante toda minha trajetória para escrever e pesquisar esta dissertação. Nos momentos mais difíceis de minha existência, Ele trouxe paz e alegria ao meu coração.
- Agradeço aos meus pais Alberto (in memoriam) e Fani pela educação recebida, pelo constante amor que me deram, pela alegria usufruída em minha infância com meus irmãos, por todo apoio e base fornecidos, por me incentivarem a cursar o Mestrado e por sempre priorizarem o estudo científico.
- Agradeço ao meu marido Eduardo Born por me incentivar a começar, desenvolver e concluir este trabalho nos prazos determinados. Pelo apoio dado em todos os aspectos para concretização do trabalho. Pelo estímulo à Cultura Intelectual e ao estudo. Pela paciência em me entender nos momentos de estresse, cansaço, choro e desespero. Por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis da minha vida me apoiando e opinando em qualquer situação. Por nos presentear com esse bebezinho que está dentro de mim hoje. Por sempre me tratar com muito carinho, dedicação e amor.
- Agradeço à Universidade Federal do Rio de Janeiro, a COPPE, ao Centro de Tecnologia, ao Departamento de Engenharia Oceânica, ao Laboratório de Tecnologia Submarina e a PETROBRAS/CENPES por ampliarem meus conhecimentos acadêmicos e profissionais e, por ceder suas dependências para escrever esta dissertação.
- Agradeço aos mestres, em especial ao orientador Theodoro Antoun Netto e ao professor Marcelo Amorim Savi pelas dúvidas respondidas, correções, explicações, aulas, paciência, disponibilidade e todo auxílio na realização desta dissertação.
- Agradeço aos mestres Ilson Paranhos Pasqualino e João Carlos Ribeiro Plácido por aceitarem o convite em participar da banca examinadora.

- Agradeço ao Coordenador do Grupo de Automação de Poços da PETROBRAS/CENPES, meu chefe e amigo Eng. José Luiz Arias Vidal pela oportunidade em me colocar no mercado de trabalho, por me autorizar a cursar o Mestrado concomitantemente com meu trabalho contribuindo para a minha formação, por me incentivar ao estudo, por me ensinar como agir profissionalmente mostrando ser um engenheiro honesto e digno e por me apoiar e acompanhar todas as etapas na elaboração deste trabalho como um todo, ficando comigo no CENPES até altas horas da noite explicando, orientando e criticando matematicamente esta dissertação.
- Agradeço aos amigos João Luiz dos Santos Lorenzo e Ricardo Muñoz Freitas apoio durante todo o Curso de Mestrado.
- Agradeço a toda minha família, principalmente meus irmãos Anita e Rafael, minha avós Rosa e Annita, meus sogros Harry e Janete, meus cunhados Hélio, Daniel e Hilda, meu sobrinho fofo Moisés pelo incentivo durante o curso.
- Agradeço a doutoranda Luciana Loureiro da Silva que me ajudou por muitas vezes respondendo e explicando minhas dúvidas sobre os Materiais com Memória de Forma Magnéticos e ao amigo Samuel dos Santos Carvalho diretor da empresa ARTSAM que contribuiu com a montagem gráfica de alguns desenhos desta dissertação.
- Enfim, agradeço a todos que me deram um pouco de experiência e me fizeram amadurecer para a vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## APLICAÇÃO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA MAGNÉTICAS EM ATUADORES LINEARES

Renata Mercante Born

Junho/2007

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Programa: Engenharia Oceânica

Neste trabalho é abordado o tema Aplicação de Ligas com Memória de Forma Magnéticas (MSMA) em Atuadores Lineares. Uma introdução é feita explicando sobre os Materiais Inteligentes. É abordado o tema Ligas com Memória de Forma Magnética, suas aplicações, uma comparação entre os Materiais Inteligentes e uma revisão bibliográfica breve sobre a metodologia do tema. É realizado um resumo do artigo publicado por Bjorn Kiefer e Dimitris C. Lagoudas (2005), onde são abordadas a reorientação macroscópica e a magnetização associada nas Ligas com Memória de Forma Magnética, em particular do modelo utilizado da amostra individual de cristal NiMnGa e sua modelagem fenomenológica do comportamento constitutivo. Além disso, também é explicado o seu caso bidimensional, no qual a aplicação de um campo magnético transversal produz esforço de reorientação axial na mesma amostra sob constante tensão axial compressiva. É aplicado um modelo fenomenológico termodinamicamente consistente através de um atuador típico com MSMA baseado no modelo de Kiefer e Lagoudas e é demonstrado o efeito de memória de forma magnética simulando o modelo desenvolvido no software LABVIEW comparando suas respostas. Por fim, são feitas conclusões e sugestões para trabalhos futuros com as Ligas com Memória de Forma Magnética.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## MAGNETIC SHAPE MEMORY ALLOYS APPLICATION IN LINEAR ACTUATORS

Renata Mercante Born

June/2007

Advisor: Theodoro Antoun Netto

Department: Oceanic Engineering

This work presents a magnetic shape memory alloys (MSMA) application in linear actuators. An introduction is shown explaining about Intelligent Materials. A topic of Magnetic Shape Memory Alloys with their applications, a comparison among the Intelligent Materials and a bibliographical review about the methodology theme is shown. A summary is done about Bjorn Kiefer e Dimitris C. Lagoudas (2005), paper where it shows the macroscopic reorientation and the magnetization associated in magnetic shape memory alloys, in particular the model used of the single crystal sample NiMnGa and its phenomenological constitutive model. In addition, this model is applied to a bidimensional case in which the application of a transverse magnetic field produces axial reorientation strain in the same NiMnGa single crystal under a constant compressive axial stress. A thermodynamically consistent phenomenological model is shown by a MSMA actuator typical based on Kiefer and Lagoudas model. The magnetic shape memory effect (MSME) is show by simulating the development model in LABVIEW software and comparing your answers. Finally, it presents conclusions and suggestions for future work with Magnetic Shape Memory Alloys.



## INDICE ANALÍTICO

<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Introdução aos Materiais Inteligentes</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Tipos de Magnetismo em Materiais</b> .....	<b>7</b>
1.2.1 Paramagnetismo .....	7
1.2.2 Diamagnetismo .....	8
1.2.3 Ferromagnetismo .....	9
<b>2 Ligas com Memória de Forma Magnéticas</b> .....	<b>12</b>
2.1 Fenômeno de Transformação de Fase por Indução Magnética .....	15
2.2 Fenômeno de Reorientação Martensítica por Indução Magnética .....	17
2.3 Aplicações dos Materiais Inteligentes .....	19
2.3.1 Aplicações com Material SMA .....	19
2.3.2 Aplicações com Material Magnetostrictivo .....	22
2.3.3 Aplicações com Material MSMA .....	24
2.4 Comparação entre os Materiais Inteligentes .....	29
<b>3 Modelo Constitutivo de Kieffer e Lagoudas (2005)</b> .....	<b>30</b>
3.1 Modelagem Fenomenológica .....	35
3.2 Redução das Equações para o Caso 2-D .....	38
3.3 Determinação Numérica dos Parâmetros do Modelo .....	43
<b>4 Aplicação de um Modelo MSMA baseado no Modelo de Kieffer e Lagoudas</b> .....	<b>46</b>
4.1 Modelo Desenvolvido de um Atuador MSMA .....	46
4.2 Modelagem do Modelo do Atuador MSMA .....	48
4.2.1 - 1º Caso: Sistema Sem Mola .....	48
4.2.2 - 2º Caso: Aplicando Campo Magnético Variável no Sistema com Mola .....	49
4.2.3 - 3º Caso: Retorno do Sistema com Mola até Parar .....	52
4.3 Determinação dos Parâmetros do Modelo .....	54
4.4 Simulação no LabView do Modelo Constitutivo do atuador MSMA .....	55
4.4.1 1ª Simulação: Cálculo da Corrente, Tensão, Potência e Energia dado um Valor para o Campo Magnético .....	55
4.4.2 2ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Sem Mola .....	56
4.4.3 3ª Simulação: Aumento do Campo Magnético sem Mola e com Mola até Alcançar a Saturação do Material MSMA .....	60
4.4.4 4ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Com Mola com $k = 10$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico .....	61
4.4.5 5ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Com Mola com $k = 25$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico .....	64
4.4.6 6ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Com Mola com $k = 50$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico .....	69
4.4.7 7ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Com Mola com $k = 100$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico .....	73
<b>5 Discussão Geral do Trabalho</b> .....	<b>77</b>

<b>5.1 Conclusão .....</b>	<b>78</b>
<b>5.2 Trabalhos Futuros.....</b>	<b>79</b>
<b><i>Apêndice A.....</i></b>	<b><i>81</i></b>
<b><i>Apêndice B.....</i></b>	<b><i>86</i></b>
<b><i>Apêndice C.....</i></b>	<b><i>87</i></b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Transformações de fase em um material com memória de forma .....	4
Figura 2 – (a) Pseudo-elasticidade e ciclo de histerese; (b) Efeito de memória de forma com deformação residual .....	5
Figura 3 – Processo de Magnetização no plano $(1\bar{1}0)$ de um monocristal Terfenol-D em presença do campo H aplicado na direção $[11\bar{2}]$ .....	11
Figura 4 – Diagrama fração volumétrica de martensita-temperatura.....	15
Figura 5 – Representação esquemática dos mecanismos de deformação por reorientação da martensita para MSMA.....	18
Figura 6 – Cateter Vascular.....	20
Figura 7 – Aparelhos Ortodônticos.....	21
Figura 8 – Medidores de Temperatura, Pressão e Tensão.....	22
Figura 9 – Sensor de Posição .....	23
Figura 10 – Sensor de Microposicionamento .....	23
Figura 11 – Estrutura básica de um atuador MSMA .....	24
Figura 12 – Estrutura básica de uma válvula de controle de fluxo de ar com elemento ativo MSMA.....	26
Figura 13 – Estrutura básica de um motor linear MSM.....	27
Figura 14 – Atuador MSMA que é utilizado como motor linear.....	27
Figura 15 – Elemento MSM se encontra dentro da bomba.....	28
Figura 16 – Estrutura de cristal da fase austenítica e as variantes martensíticas tetragonais da liga NiMnGa.....	31
Figura 17 – Microestrutura da liga MSMA NiMnGa.....	31
Figura 18 – Esquema de várias configurações de uma amostra de monocristal de NiMnGa <sub>32</sub>	32
Figura 19 – O processo de reorientação da variante com estrutura fixa de domínio $\alpha = 1$ .	39
Figura 20 – Esquema de reorientação axial versus campo magnético transversal para diferentes níveis de tensão .....	45
Figura 21 – Esquema do Sistema Sem Mola com $k = 0$ .....	48
Figura 22 – Atuador MSMA .....	49
Figura 23 – Aplicando campo magnético no sistema.....	50
Figura 24 – Diagrama de forças para campo magnético aplicado .....	51
Figura 25 – Retorno do Sistema.....	52
Figura 26 – Diagrama de forças para redução de campo magnético .....	53
Figura 27 – Gráfico Campo Magnético H (kA/m) x Deformação $\epsilon(.)$ do Sistema Sem Mola ( $k = 0$ ) para os Modelos Polinomial e Trigonométrico para as tensões $\sigma = -5, -4, -3, -2, -1$ MPa .....	59
Figura 28 – Gráfico em 3D com eixos H(kA/m) x $\epsilon(.)$ x $\sigma$ (MPa) do Sistema Sem Mola ( $k = 0$ ) .....	60
Figura 29 – Gráfico Campo Magnético H (kA/m) x Deformação $\epsilon(.)$ do Sistema Com Mola $k = 10$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico e tensões aproximadas $\sigma = 0,9; 0,8; 0,6; 0,3$ e $0,1$ MPa .....	63

Figura 30 – Gráfico em 3D com eixos $H(\text{kA/m}) \times \epsilon(.) \times \sigma(\text{MPa})$ do Sistema Com Mola $k = 10$ .....	64
Figura 31 – Gráfico Campo Magnético $H(\text{kA/m}) \times$ Deformação $\epsilon(.)$ do Sistema Com Mola $k = 25$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico e tensões aproximadas $\sigma = 2,2; 2,0; 1,4; 0,8$ e $0,4\text{MPa}$ .....	67
Figura 32 – Gráfico em 3D com eixos $H(\text{kA/m}) \times \epsilon(.) \times \sigma(\text{MPa})$ do Sistema Com Mola $k = 25$ .....	68
Figura 33 – Gráfico Campo Magnético $H(\text{kA/m}) \times$ Deformação $\epsilon(.)$ do Sistema Com Mola $k = 50$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico e tensões aproximadas $\sigma = 4,1; 3,7; 2,8; 1,6$ e $0,7\text{MPa}$ .....	71
Figura 34 – Gráfico em 3D com eixos $H(\text{kA/m}) \times \epsilon(.) \times \sigma(\text{MPa})$ do Sistema Com Mola $k = 50$ .....	72
Figura 35 – Gráfico Campo Magnético $H(\text{kA/m}) \times$ Deformação $\epsilon(.)$ do Sistema Com Mola $k = 100$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico e tensões aproximadas $\sigma = 7,0; 6,7; 5,3; 3,2$ e $1,4\text{MPa}$ .....	75
Figura 36 – Gráfico em 3D com eixos $H(\text{kA/m}) \times \epsilon(.) \times \sigma(\text{MPa})$ do Sistema Com Mola $k = 100$ .....	76
Figura 37 – Programa Desenvolvido no Software LabView para Simulação do Atuador MSMA .....	82
Figura 38 – Diagrama de Blocos do Atuador MSMA Desenvolvido no Software Labview .....	83
Figura 39 – Simulação no LabView Utilizando Parâmetros Ajustáveis .....	84
Figura 40 – Parâmetros de Entrada e Saída do Atuador MSMA Simulado no Software LabView .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os Materiais Inteligentes.....	29
Tabela 2 – Relação entre constantes do material e parâmetros do modelo do cristal $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ , para os modelos polinomial e trigonométrico.....	42
Tabela 3 – Constantes do cristal $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ por unidade.....	43
Tabela 4 – Valores dos parâmetros ajustáveis e da força orientadora do cristal $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ por unidade para os modelos polinomial e trigonométrico.....	44
Tabela 5 – Sistema Sem Mola com $k = 0$ para Tensão $\sigma = -1\text{MPa}$ .....	57
Tabela 6 – Sistema com $k = 0$ para $\sigma = -2\text{MPa}$ .....	57
Tabela 7 – Sistema com $k = 0$ para $\sigma = -3\text{MPa}$ .....	58
Tabela 8 – Sistema com $k = 0$ para $\sigma = -4\text{MPa}$ .....	58
Tabela 9 – Sistema com $k = 0$ para $\sigma = -5\text{MPa}$ .....	58
Tabela 10 – Sistema Com Mola $k = 10$ .....	62
Tabela 11 – Sistema Com Mola para $k = 25$ .....	66
Tabela 12 – Sistema Com Mola para $k = 50$ .....	70
Tabela 13 – Sistema Com Mola para $k = 100$ .....	74
Tabela 14 – Temperatura de Curie dos Compósitos.....	86

## ÍNDICE DE NOMECLATURA

$A_t$	área transversal
$H^{s(1,2)}$	campo magnético correspondente ao princípio do processo de reorientação na ida
$H^{s(2,1)}$	campo magnético correspondente ao princípio do processo de reorientação na volta
$H^{f(1,2)}$	campo magnético correspondente ao término do processo de reorientação na ida
$H^{f(2,1)}$	campo magnético correspondente ao término do processo de reorientação na volta
$\varepsilon_r$	deformação residual
$e_x$	eixo x
$e_y$	eixo y
$f^\xi$	em função da variante martensítica
$G_0$	energia livre de Gibbs inicial
$E_{mag}$	energia magnetomotriz
$\pi^\xi$	força da fração volumétrica da variante martensítica
$\pi^\alpha$	força da fração volumétrica do domínio magnético
$F_m$	força da mola
$F_a$	força de atrito
$\pi^r$	força de deformação por reorientação
$\pi^{\theta_i}$	força de rotação dos momentos magnéticos
$F_{MSMA}$	força do material com memória de forma magnético
$F_{mat}$	força do material
$F_{mec}$	força mecânica
$Y^{\xi,p}$	força orientadora do modelo polinomial
$Y^{\xi,p}A$	força orientadora do modelo polinomial de avanço
$Y^{\xi,p}R$	força orientadora do modelo polinomial de retorno
$Y^{\xi,c}$	força orientadora do modelo trigonométrico
$Y^{\xi,c}A$	força orientadora do modelo trigonométrico de avanço
$Y^{\xi,c}R$	força orientadora do modelo trigonométrico de retorno
$\pi^{\xi(1,2)}$	força termodinâmica da fração volumétrica martensítica de ida
$\pi^{\xi(2,1)}$	força termodinâmica da fração volumétrica martensítica de volta
$\phi^\xi$	função de reorientação
$\phi^\alpha$	função do movimento da parede do domínio magnético
$\vec{N}$	vetor normal
$A^p$	parâmetro ajustável do modelo polinomial
$B_1^p$	parâmetro ajustável do modelo polinomial

$B_2^p$	parâmetro ajustável do modelo polinomial
$C^p$	parâmetro ajustável do modelo polinomial
$A^c$	parâmetro ajustável do modelo trigonométrico
$B_1^c$	parâmetro ajustável do modelo trigonométrico
$B_2^c$	parâmetro ajustável do modelo trigonométrico
$C^c$	parâmetro ajustável do modelo trigonométrico
$\mu_0$	permissividade magnética no vácuo
$\bar{P}$	vetor peso
$P_{\text{cons}}$	potência consumida
$P_{\text{form}}$	potência fornecida
$\Delta l$	quantidade escalar que a barra MSMA deslocou
$\Delta x$	quantidade escalar que a massa deslocou
$Y^\alpha$	quantidade escalar relacionada à dissipação do movimento de rotação
$Y^\xi$	quantidade escalar relacionada à dissipação do movimento do limite duplo
$X_m$	suscetibilidade magnética
$\sigma^b$	tensão de bloqueio
$\sigma^{sv}$	tensão inicial
$\Delta S$	tensor de área
$\varepsilon^r$	tensor de deformação por reorientação
$\varepsilon^{-tr}$	tensor de deformação por transformação
$\varepsilon^{te}$	tensor de deformação termo-elástico
$F_{tw}$	força de união ( <i>twinning force</i> )
2-D	bidimensional
$A$	área
A	fase austenítica
A/m	Ampère por metro
$A_f$	finalização da transformação austenítica
Al	Alumínio
AP	parâmetro ajustável do modelo polinomial
As	Arsênio
$A_s$	inicialização da transformação austenítica
AT	parâmetro ajustável do modelo trigonométrico
B	campo magnético efetivo
B1P	parâmetro ajustável do modelo polinomial
B1T	parâmetro ajustável do modelo trigonométrico
B2P	parâmetro ajustável do modelo polinomial
B2T	parâmetro ajustável do modelo trigonométrico
Bi	Bismuto
C	constante
Co	Cobalto
CP	parâmetro ajustável do modelo polinomial

Cr	Crômio
CGS	Centímetro-Grama-Segundo
CT	parâmetro ajustável do modelo trigonométrico
Cu	Cobre
DS	tensor de área
Dy	Disprósio
E	deformação
Eu	Európio
F	Força
Fe	Ferro
$Y^{\xi,c}R$	força orientadora do modelo trigonométrico de retorno
FSMA	liga com memória de forma ferromagnética
FV	fração volumétrica da variante martensítica
FYPA	força magnética do modelo polinomial de avanço
FYPAM	força magnética do modelo polinomial de avanço com mola
FYPR	força magnética do modelo polinomial de retorno
FYPRM	força magnética do modelo polinomial de retorno com mola
FYTA	força magnética do modelo trigonométrico de avanço
FYTAM	força magnética do modelo trigonométrico de avanço com mola
FYTR	força magnética do modelo trigonométrico de retorno
FYTRM	força magnética do modelo trigonométrico de retorno com mola
G	energia livre de Gibbs
Ga	Gálio
Gd	Gadolínio
$H$	Henry
H	intensidade de campo magnético
HFA	campo magnético correspondente ao término do processo de reorientação na ida
HFR	campo magnético correspondente ao término do processo de reorientação na volta
HSA	campo magnético correspondente ao princípio do processo de reorientação na ida
HSR	campo magnético correspondente ao princípio do processo de reorientação na volta
$i$	corrente
$i$	quatro regiões das combinações das variantes martensíticas e domínios magnéticos
J	Joule
k	$10^3$
K	constante da mola
$K$	Kelvin
$l$	comprimento da barra
L	comprimento da barra
L	indutância
lb	comprimento da bobina
M	magnetização
m	massa do carrinho
M0	permissividade magnética no vácuo



M <sup>sat</sup>	Magnetização de Saturação
Mn	Manganês
MPa	Mega Pascal
MS	magnetização de saturação
MSM	memória de forma magnética
MSMA	liga com memória de forma magnética
MSME	efeito de memória de forma magnética
Mt	fase martensítica
Mtf	finalização da transformação martensítica
Mts	inicialização da transformação martensítica
N	Newton
<i>N</i>	número de espiras
Ni	Níquel
NOL	Naval Ordnance Laboratory
O	Oxigênio
Oe	Oersted
Pd	Paládio
pi	3,14
Pt	Platina
R	resistência
s	entropia específica
Sb	Antimônio
SMA	liga com memória de forma
SME	efeito de memória de forma
SS	tensão
SSF	tensão fixa
SSPA	tensão polinomial de avanço
SSPAM	tensão do modelo polinomial de avanço com mola
SSPR	tensão polinomial de retorno
SSPRM	tensão do modelo polinomial de retorno com mola
SSTA	tensão trigonométrica de avanço
SSTAM	tensão do modelo trigonométrico de avanço com mola
SSTR	tensão trigonométrica de retorno
SSTRM	tensão do modelo trigonométrico de retorno com mola
ST	deformação
STF	deformação fixa
STPA	deformação do modelo polinomial de avanço
STPAM	deformação do modelo polinomial de avanço com mola
STPR	deformação do modelo polinomial de retorno
STPRM	deformação do modelo polinomial de retorno com mola
STTA	deformação do modelo trigonométrico de avanço
STTAM	deformação do modelo trigonométrico de avanço com mola
STTR	deformação do modelo trigonométrico de retorno
STTRM	deformação do modelo trigonométrico de retorno com mola
Ti	Titânio

u	deslocamento da massa
upa	deslocamento da massa no modelo polinomial no avanço
upam	deslocamento da massa no modelo polinomial no avanço com mola
upr	deslocamento da massa no modelo polinomial no retorno
uprm	deslocamento da massa no modelo polinomial no retorno com mola
upta	deslocamento da massa no modelo trigonométrico no avanço
uptam	deslocamento da massa no modelo trigonométrico no avanço com mola
uptr	deslocamento da massa no modelo trigonométrico no retorno
uptrm	deslocamento da massa no modelo trigonométrico no retorno com mola
V	voltagem
W	Watts
x	comprimento do material MSMA
X	deslocamento da massa
Y	Ítrio
YPA	força orientadora do modelo polinomial de avanço
YPF	força orientadora do modelo polinomial
YPR	força orientadora do modelo polinomial de retorno
YTA	força orientadora do modelo trigonométrico de avanço
YTF	força orientadora do modelo trigonométrico
YTR	força orientadora do modelo trigonométrico de retorno
Z	deformação máxima do modelo experimental de Tickle (2000)
Zn	Zinco
$\alpha$	domínio magnético
$\varepsilon$	deformação
$\zeta$	conjunto genérico de variáveis internas
$\mu$	permeabilidade do vácuo
$\xi$	fração volumétrica
$\rho$	densidade de massa
$\sigma$	tensão de Cauchy = tensão
T	temperatura

## Capítulo 1

### 1 Introdução

#### 1.1 Introdução aos Materiais Inteligentes

A utilização dos chamados materiais inteligentes tem crescido consideravelmente nos últimos anos, ocupando um importante espaço no projeto de sistemas mecânicos. Esta classe de materiais, usualmente utilizada como sensores e atuadores nos chamados sistemas inteligentes, possui características adaptativas, modificando sua forma ou propriedades físicas a partir da imposição de um campo elétrico, magnético, temperatura ou tensão. Em linhas gerais, pode-se dizer que, atualmente, alguns dos materiais inteligentes mais conhecidos são os materiais magnetostrictivos, as ligas com memória de forma e as ligas com memória de forma magnéticas.

O termo *ligas com memória de forma* (SMAs, do inglês “*shape memory alloys*”) é aplicado ao grupo de materiais metálicos que demonstram a habilidade de retornar para um tamanho ou forma previamente definido quando submetidos a um procedimento termomecânico apropriado (Hodgson *et al.*, 1992). Ou seja, memória de forma é a capacidade que alguns materiais têm de recuperar sua forma original mesmo após sofrerem deformações relativamente grandes, como imposição de um campo de temperatura e/ou de tensões, através de transformações de fase induzidas no material.

As propriedades das SMAs são conhecidas desde a década de 30, no entanto somente na década de 60 é que as SMAs começaram a despertar interesse tecnológico. Em 1962, Buehler e colaboradores do *U.S. Naval Ordnance Laboratory*, descobriram o efeito de memória de forma numa liga equiatômica de Ni-Ti, que passou a ser conhecida como Nitinol, como uma alusão às iniciais do laboratório (NOL). Ainda na década de 60, Raychem desenvolveu a primeira aplicação industrial das SMAs na indústria aeronáutica. Em 1975,

Andreasen, da Universidade de Iowa, realizou o primeiro implante de aparelho dentário superelástico (Mantovani, 2000; Hodgson et al., 1992). Hoje em dia, essas aplicações estão bastante difundidas nos mais diversos campos da ciência, indústria aeroespacial e engenharias. As excepcionais propriedades das ligas com memória de forma têm despertado um interesse crescente em aplicações com atuadores.

Embora uma grande variedade de ligas exiba o efeito de memória de forma, somente aquelas que podem recuperar uma quantidade substancialmente grande de deformação ou geram uma significativa força de restituição sobre a mudança da forma, possuem interesses comerciais. Dentre estas, vale destacar as ligas baseadas em Níquel-Titânio (NiTi) e as ligas a base de Cobre, tais como: Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni (Hodgson *et al.*, 1992). As ligas a base de NiTi são as mais utilizadas em aplicações comerciais por combinar as propriedades associadas às ligas com memória de forma com boas propriedades mecânicas. O Nitinol pode ser usado em dispositivos de alto desempenho com deformações recuperáveis na faixa de 6%, ao passo que a liga CuZnAl com deformações recuperáveis de aproximadamente 2%.

O fenômeno de transformações de fase é responsável pelas propriedades das SMAs. Estas transformações são processos orientados, envolvendo fases sólidas que ocorrem a velocidades muito elevadas. Atribui-se a causa dessas transformações à diferença de energia livre entre as estruturas constituintes envolvidas no processo, o que induz modificações nas ligas químicas, tornando as transformações de fase de caráter essencialmente cristalográfico (Wasilevski, 1975).

Basicamente, as ligas com memória de forma apresentam duas fases cristalográficas distintas: a austenita (A) e a martensita (Mt) (Smart, 2001). As transformações de fase são da fase austenítica, no estado livre de tensões e altas temperaturas, para as diversas variantes da fase martensítica a baixas temperaturas. A martensita é uma fase que, livre de tensões, é estável a baixas temperaturas e pode ser induzida tanto por tensão quanto por temperatura. É facilmente deformável, atingindo grandes percentuais de deformação em tensões relativamente baixas (Hodgson *et al.*, 1992). Quando a martensita é induzida por temperatura ela é conhecida como martensita maclada, ou em inglês, “*twinned*” ou martensita auto-acomodável e pode apresentar diferentes orientações cristalográficas, até vinte e quatro

variantes para o caso mais geral (Fubakubo, 1987) e sua estrutura depende do tipo de transformação sofrida pelo material (Otsuka & Ren, 1999; Wu & Lin, 2000). E quando a martensita é induzida por um carregamento de tensão, existe apenas uma orientação cristalográfica, alinhada com a orientação do carregamento de tensão. Esta é a martensita não-maclada, ou em inglês, “*detwinned*”. A austenita (**A**) é uma fase estável somente a altas temperaturas e possui uma estrutura cúbica de corpo centrado bem ordenada que apresenta apenas uma variante. A transformação de fase martensítica é o fato que justifica a recuperação da forma que acontece nas ligas com memória de forma. Esta transformação ocorre em uma faixa de temperatura que varia de acordo com a composição química de cada liga.

As ligas com memória de forma apresentam alguns comportamentos termomecânicos típicos: transformação de fase devida à variação de temperatura, efeitos de memória de forma (**SME**), entre outros.

Tomando-se os materiais com memória de forma sem tensões mecânicas a alta temperatura na fase austenítica e fazendo o seu aquecimento, ocorre uma transformação gradual para a fase martensítica. Diferentes variantes de martensita são obtidas durante o processo de aquecimento. Durante a transformação da austenita para martensita (e a transformação inversa obtida por resfriamento) uma importante variável de estado é considerada. Esta variável de estado é conhecida como fração volumétrica da martensita, simbolizada por  $\xi$  ( $0 \leq \xi \leq 1$ ) onde  $\xi = 1$  e  $\xi = 0$  correspondem à fase completamente martensítica e completamente austenítica, respectivamente. São associadas à variável de estado  $\xi$  quatro valores de temperatura denotadas por  $M_{tf}$ ,  $M_{ts}$ ,  $A_s$ ,  $A_f$ , que caracterizam a finalização da transformação martensítica, inicialização da transformação martensítica, inicialização da transformação austenítica e finalização da transformação austenítica, respectivamente. Uma representação esquemática do fenômeno de transformação de fase durante o resfriamento/aquecimento de um material com memória de forma sem tensões mecânicas é apresentada na figura 1:

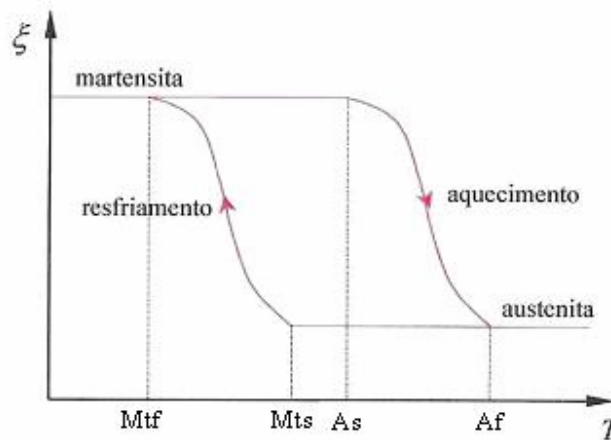


Figura 1 – Transformações de fase em um material com memória de forma

As transformações de fase induzidas por variações de temperatura constituem a base para o entendimento do fenômeno de recuperação das deformações exibido pelos materiais com memória de forma. Se o material com memória de forma está na fase martensítica  $\xi = 1$  e uma tensão unidirecional  $\sigma$  é aplicada, então para um valor crítico desta tensão, o qual depende da temperatura  $\sigma(T)$ , inicia-se a transformação das diferentes variantes da martensita, até que finalmente se obtenha uma única variante alinhada com o eixo de carregamento.

Um estado similar é obtido se o processo for iniciado aplicando o carregamento à liga com memória de forma na fase austenítica. Durante estas transformações de fase, as tensões internas da SMA são apenas ligeiramente alteradas e uma significativa deformação aparente é obtida. Se  $T > A_f$  durante o carregamento, a martensita é instável a esta temperatura e a deformação pode ser completamente restituída pelo descarregamento. As curvas tensão-deformação do ciclo de carregamento-descarregamento têm a característica de ciclos de histerese, como mostrado na figura 2 (a) e o comportamento é classificado como “pseudo-elástico”. Por outro lado, se  $T < A_s$  durante o carregamento, uma deformação residual  $\varepsilon_r$  permanece após o descarregamento, conforme mostrado na figura 2 (b). Esta deformação

pode ser recuperada pelo aquecimento da SMA. Este efeito é o “efeito de memória de forma” que é explorado na concepção de atuadores baseados em material com memória de forma.

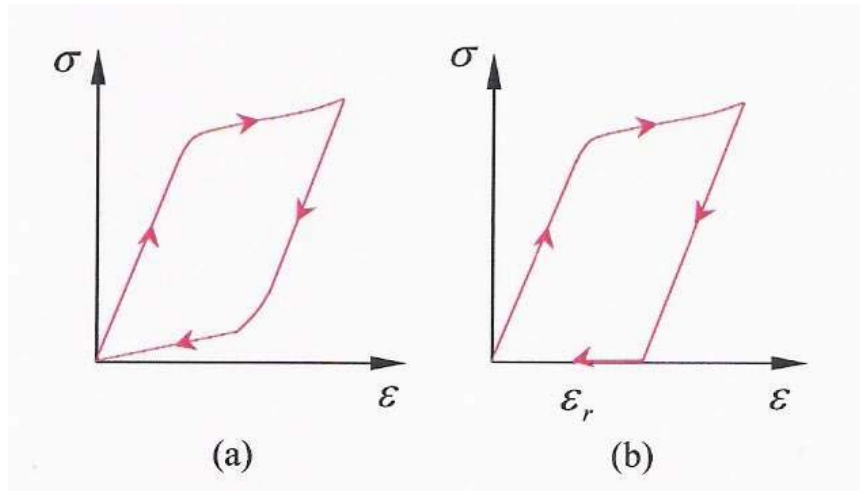


Figura 2 – (a) Pseudo-elasticidade e ciclo de histerese; (b) Efeito de memória de forma com deformação residual

Segundo Banks et al. (1996) um fato que limita o desenvolvimento de dispositivos de materiais com memória de forma (SMA) é a dificuldade de se obterem modelos dinâmicos precisos para estes materiais, uma vez que seu comportamento é caracterizado por grandes deformações e não linearidades.

Existe uma classe particular dos materiais inteligentes denominada Materiais com Memória de Forma Magnéticos que sofrem deformações quando submetidos a um campo magnético, além das formas de atuação usuais das SMAs convencionais que respondem à aplicação de campos de tensão e/ou temperatura. As Ligas com Memória de Forma Magnéticas (**MSMs**, do inglês “*Magnetic Shape Memory*”) ou Ligas com Memória de Forma Ferromagnéticas (**FSMAs**, do inglês “*Ferromagnetic Shape Memory Alloys*”) são muito promissoras, pois aliam as vantagens das SMAs tradicionais, eliminando a desvantagem do tempo de resposta associado às mudanças de temperatura.

A estrutura deste trabalho é como segue: No primeiro capítulo uma introdução foi feita explicando sobre as Ligas com Memória de Forma convencionais. No segundo capítulo, é

abordado o tema Ligas com Memória de Forma Magnética, suas aplicações e uma comparação entre os materiais inteligentes.

No terceiro capítulo é feito um resumo dos modelos Tickle (2000) e Kiefer e Lagoudas (2005) onde são abordadas a reorientação macroscópica e a magnetização associada nas Ligas com Memória de Forma Magnética, em particular na amostra individual de cristal de NiMnGa. Também são explicadas sua modelagem fenomenológica e a resposta do comportamento constitutivo em termos de deformação macroscópica e magnetização para promover um melhor entendimento do fenômeno físico que baseia o efeito de memória de forma magnético. Além disso, é analisado o seu caso especial 2-D, no qual a aplicação de um campo magnético transversal produz a reorientação axial na mesma amostra sob constante tensão axial compressiva. Essa reorientação da variante martensítica captura o efeito de memória de forma magnética usando variáveis de estado interno, as quais são selecionadas em consideração da microestrutura cristalográfica e magnética.

No quarto capítulo destina-se a aplicar um modelo constitutivo fenomenológico termodinamicamente consistente com Liga de Memória de Forma Magnética baseado no modelo de Kiefer e Lagoudas (2005) e demonstrar a deformação e o efeito de memória de forma magnética simulando o modelo desenvolvido no software LABVIEW comparando suas respostas.

Por fim, o quinto capítulo é destinado a uma discussão geral do modelo constitutivo introduzido, conclusão e uma perspectiva de possíveis extensões da abordagem apresentada em trabalhos futuros.



## 1.2 Tipos de Magnetismo em Materiais

Diferentes materiais podem apresentar comportamentos magnéticos variados devido ao modo de interação dos átomos com o campo magnético e com os átomos vizinhos. Portanto, em termos da resposta à ação de um campo magnético externo nos materiais, os tipos de magnetismo em materiais são classificados como paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos.

### 1.2.1 Paramagnetismo

Quando uma amostra contendo  $N$  átomos, cada um com momento dipolo magnético, é colocada num campo magnético, os dipolos atômicos elementares tendem a alinhar-se com o campo magnético externo, assim intensificando o campo. Esta tendência ao alinhamento é denominada de paramagnetismo. No entanto, o processo de alinhamento é seriamente perturbado pela agitação térmica: oscilações casuais de átomos levam a colisões entre átomos. Em algumas destas colisões, a energia cinética se transfere para átomos já alinhados e rompe o seu alinhamento. Pode-se expressar o grau com que se encontra magnetizada uma dada amostra de um material dividindo-se o momento magnético da amostra pelo seu volume. Esta grandeza vetorial, o momento magnético por unidade de volume, denomina-se *magnetização*  $M$  da amostra. A unidade de  $M$  é o Ampère-metro quadrado por metro cúbico ou Ampère por metro ( $A/m$ ).

Em 1895, Pierre Curie descobriu experimentalmente que a magnetização  $M$  de uma amostra paramagnética é diretamente proporcional a  $B$ , o campo magnético efetivo no qual a amostra está imersa, e inversamente proporcional a temperatura kelvin  $T$ . Em forma de equação tem-se a fórmula abaixo, conhecido como Lei de Curie:

$$M = C \left( \frac{B}{T} \right), \text{ onde } C \text{ é uma constante.} \quad (1)$$

Até certo ponto, a magnetização  $M$  do material varia linearmente com o campo magnético aplicado e a temperatura  $T$ , segundo a lei de Curie. A lei de Curie é fisicamente razoável, visto que o crescimento de  $B$  tende a alinhar os dipolos elementares, isto é, a aumentar  $M$ , enquanto o crescimento de  $T$  tende a interferir neste alinhamento, isto é, a diminuir  $M$ , por agitação térmica. Ou seja, para campos suficientemente fortes ou temperaturas suficientemente baixas, esta lei deixa de ser válida. A lei de Curie é verificada experimentalmente, desde que a razão  $B/T$  não se torne muito grande.

Não é fácil obter o alinhamento total numa amostra paramagnética. Desde que os dipolos tendem a se alinhar, a suscetibilidade magnética, identificada por  $X_m$ , é positiva, mas de valor bastante baixo. Em geral,  $1 \cdot 10^{-5} < X_m < 1 \cdot 10^{-3}$ .

### 1.2.2 Diamagnetismo

Alguns materiais denominados diamagnéticos não possuem dipolos elementares permanentes por isso eles não são paramagnéticos. Porém, é possível induzir dipolos magnéticos nestes materiais pela ação de um campo magnético externo. Se uma amostra deste material for colocada num campo magnético não-uniforme uma força magnética (muito fraca) atuará sobre a amostra. Contudo, a amostra ao invés de ser atraída em direção ao pólo dominante será repelida ao campo atuante. Assim, o material sofre uma repulsão, mas é um efeito muito fraco.

Atribuiu-se esta diferença de comportamento, ao fato de que os dipolos magnéticos induzidos apontam no sentido oposto ao do campo magnético externo.

O diamagnetismo é uma manifestação da lei de indução de Faraday atuando sobre os elétrons atômicos. O diamagnetismo é uma propriedade de todos os átomos. Entretanto, o fenômeno é tão fraco que quando um átomo possui momento de dipolo magnético intrínseco, o efeito diamagnético fica mascarado pelos comportamentos mais fortes paramagnéticos ou ferromagnéticos.

Por sofrerem repulsão, a suscetibilidade magnética desses materiais é negativa, com valores bastante baixos  $-1.10^{-5} < X_m < -1.10^{-4}$ .

### 1.2.3 Ferromagnetismo

O ferro e diversos outros elementos (mais notavelmente o cobalto, o níquel, o gadolínio e o disprósio), bem como muitas ligas destes e outros elementos, apresentam uma interação especial, denominada *acoplamento de troca*, que permite o alinhamento dos dipolos atômicos em rigoroso paralelismo, apesar da perturbação em virtude dos movimentos térmicos dos átomos.

Nos materiais ferromagnéticos os dipolos elementares são permanentes e, aparentemente, se alinham na direção de um campo magnético aplicado, resultando em elevados níveis de magnetização. Ou seja, a *curva de magnetização* dá o grau de influência que um campo magnético aplicado exerce sobre o alinhamento dos dipolos magnéticos elementares que constituem o material. A suscetibilidade magnética pode chegar a valores na faixa de 100000.

Quando a temperatura de um material ferromagnético é elevada acima de um certo valor crítico, *temperatura de Curie*, o acoplamento de troca desaparece e o material torna-se simplesmente paramagnético. Para o ferro, a temperatura Curie é de 1043K (=770°C). O ferromagnetismo é, evidentemente, não só uma propriedade do átomo ou do íon individual, mas também uma conseqüência da interação com seus vizinhos na rede cristalina do sólido.

Magnetizando-se uma amostra, colocando-a num campo magnético externo de intensidade gradualmente crescente, ocorrem dois efeitos que contribuem para a magnetização da amostra. Um deles é o aumento de tamanho dos domínios que estejam favoravelmente orientados, à custa dos demais. O segundo é um desvio da orientação do conjunto dos dipolos de um domínio, tendendo a alinhar-se com o sentido do campo.

A variação positiva do campo aplicado produz curva de magnetização diferente da variação negativa. Isto é chamado de histerese.

O exemplo abaixo mostra o processo de reorientação do campo magnético e da direção cristalina para o elemento Terfenol-D, embora seja magnetostrictivo possui a mesma propriedade do material MSMA.

As variações do magnetismo resultantes da aplicação de um campo H ocasionam dois principais mecanismos: momento de rotação e o movimento dos limites do domínio.

Considere uma amostra desmagnetizada que foi submetida a um campo magnético orientado na direção  $[11\bar{2}]$ , conforme ilustrado na figura 3. Caso a amostra seja submetida a um baixo nível de campo, ocorrerá a mudança na magnetização primariamente influenciada pela expansão dos limites do domínio. Conseqüentemente, acarretará o alargamento dos domínios (estrutura por um todo).

Com o aumento do campo, os momentos de rotação orientam-se para o eixo preferencial, direção em que a menor quantidade de energia é requerida para magnetizar o material,  $[11\bar{1}]$ . Nesta condição, uma pequena alteração no campo produz grandes variações na magnetização ou deformação.

No estágio final (d), o material se comporta como um simples movimento por deslocamento do momento de rotação coerente com a direção do eixo preferencial alinhado ao campo aplicado. Ou seja, o momento de rotação se alinha completamente com o campo, produzindo a saturação.

Quando os momentos de rotação se alinham com o campo são geradas deformações no material.

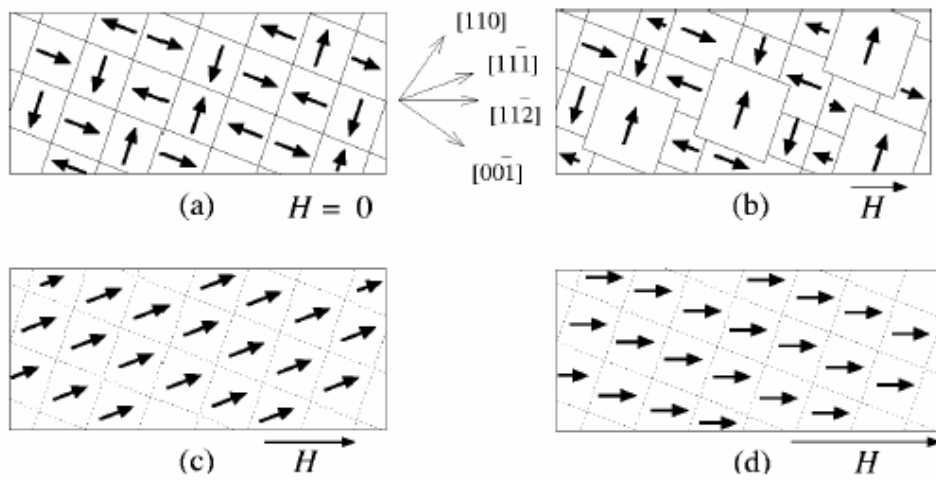


Figura 3 – Processo de Magnetização no plano  $(1\bar{1}0)$  de um monocristal Terfenol-D em presença do campo H aplicado na direção  $[11\bar{2}]$

A Figura 3 mostra (a) Estado desmagnetizado, (b) Crescimento da expansão dos limites do domínio, (c) Momento de rotação para o eixo preferencial  $[11\bar{1}]$  e (d) Alinhamento do momento de rotação com o campo aplicado (Smith, Dapino e Seelecke, 2003).

## *Capítulo 2*

### **2 Ligas com Memória de Forma Magnéticas**

As Ligas com Memória de Forma (SMAs) exibem grandes deformações de 2-8% quando sujeitas à carga térmica ou mecânica. Esta deformação é causada pela mudança na cristalografia associada com austenita reversível para a martensita da transformação de fase. As Ligas com Memória de Forma Magnética (MSMA) surgiram mais recentemente como uma adição muito interessante à classe de materiais inteligentes. Em acréscimo aos esforços originados a partir da temperatura ou comportamento de memória de forma convencional controlado por tensão, grandes deformações podem ser produzidas nestas ligas sob aplicação externa de campos magnéticos moderados. Dependendo da estrutura do cristal na fase martensítica, pode-se obter de 6% a 10% da resposta de deformação em um campo magnético menor que 800kA/m (Murray et al. 2000; Sozinov et al. 2003) na escala de temperatura de 150-333K (Heczko et al., 2003). Ou seja, em princípio, sob condições extremas, a transformação de fase da austenita para martensita também pode ser induzida nas MSMA sob a aplicação de campos magnéticos. A deformação macroscópica observável induzida na MSMA é causada pelo rearranjo microestrutural das variantes martensíticas. Já que as variantes cristalográficas da martensita possuem diferentes direções preferenciais de magnetização (eixo preferencial), os campos magnéticos aplicados podem ser utilizados para selecionar determinadas variantes sobre outras, resultando na mudança de forma macroscópica. A resposta constitutiva é histerética e não linear entre o campo magnético gerado e a deformação, que dá ao material característica interessante, em termos de possíveis aplicações.

Basicamente, a atuação magnética em ligas com memória de forma magnéticas dá origem a dois fenômenos distintos (Jules, 2003; Cui et al., 2004). Um explora as transformações de fase martensítica e inversa. O outro contempla o processo de reorientação da martensita.

A despeito das inúmeras aplicações das ligas com memória de forma magnéticas, a descrição de seu comportamento ainda é uma questão em aberto. Assim, existe a necessidade de uma análise mais precisa do comportamento termomecânico das MSMAs, que será feita neste trabalho, no caso a reorientação da variante martensítica induzida por campo magnético, que também tem recebido a terminologia de efeito de memória de forma magnética (MSME), efeito de memória de forma ferromagnética (FMSME) ou rearranjo variante induzido por campo magnético. O primeiro relato sobre o efeito de memória de forma magnética foi apresentado por Ullakko et al. (1996). Relataram deformações de quase 0,2%, detectados em experiências em cristais individuais sem tensão de NiMnGa. Trabalhos experimentais extensivos em compostos intermetálicos *off-stoichiometric* próximos da composição Ni<sub>2</sub>MnGa renderam maiores deformações induzidas por campo de 6% (Murray et al., 2000a) e de até 10% (O’Handley et al., 2003; Sozinov et al., 2003) em cristais individuais. Próximos da investigação de diferentes composições, os níveis de tensão de reorientação máximos foram aumentados por meio de tratamentos termomecânicos e pela utilização de um melhor entendimento no que se refere à estrutura cristalográfica das ligas com memória de forma magnética. Uma segunda liga, FePd, tem sido investigada em detalhe (Cui et al., 2004; James and Wutting, 1998; Shield, 2003; Yamamoto et al., 2004), e vários sistemas materiais adicionais também foram testados, tais como FeNiCoTi, FePt, CoNiGa, NiMnAl, entre outros (Murray et al., 1999; Fujita et al., 2000; Kakeshita et al., 2000; Wutting et al., 2000, 2001; Sozinov et al., 2003). Recentemente CoNiAl vem recebendo interesse considerável (Karaca et al., 2003; Morito et al., 2002). É necessário enfatizar que a maioria das experiências utilizou amostras monocristalinas.

Vários modelos foram propostos em literatura que capturam o processo de reorientação variante (deformação e efeito de memória de forma magnética). A abordagem adotada no atual trabalho é baseada no modelo de Bjorn Kiefer e Dimitris C. Lagoudas (2005) e é a minimização de uma função de energia livre.

Na modelagem constitutiva fenomenológica o sistema pode ser caracterizado por uma expressão de energia livre macroscópica que é uma função de variáveis de estado independentes. Portanto, é usual a utilização de variáveis internas de estado (Coleman e Gurtin, 1967). As variáveis de estado dependentes também existem e são conhecidas como

tensão ou entropia. Outra variável de estado adicional é a força de campo magnético que foi introduzida na expressão da energia livre (Kiefer e Lagoudas, 2004). Nesta abordagem de Kiefer e Lagoudas a fração volumétrica da variante martensítica foi identificada como variável de estado. Esta escolha foi motivada por mudanças na microestrutura cristalográfica e magnética do material que fornecem os mecanismos causando o comportamento macroscopicamente observável.

Este trabalho se propõe a implementar computacionalmente um modelo constitutivo com o auxílio do software comercial LabView e realizar um estudo de caso, vislumbrando demonstrar as principais propriedades dos materiais magnéticos, que são a deformação de uma liga com memória de forma magnética através de um campo magnético e o efeito de memória de forma. O modelo desenvolvido é um atuador, cuja atuação é feita de forma indireta por meio da deformação sofrida no material magnético que o compõe, no caso NiMnGa, utilizando o modelo simplificado bidimensional (2-D) de Kiefer e Lagoudas (2005).

Resumidamente, podem-se estabelecer as seguintes principais características vantajosas e os inconvenientes dos materiais com memória de forma magnética (MSMA):

*Vantagens:*

- Possibilitam a confecção de dispositivos atuadores, facilmente integráveis à estrutura;
- Podem ser ativados sob tensão, temperatura e campo magnético;
- Possuem tempo de resposta rápido.

*Desvantagens:*

- Limite de Temperatura.



## 2.1 Fenômeno de Transformação de Fase por Indução Magnética

O fenômeno de transformação de fase por indução magnética está relacionado a uma alteração nas temperaturas das transformações de fase martensítica e inversa ( $A \rightarrow Mt$  e  $Mt \rightarrow A$ , respectivamente) provocada pela aplicação de um campo magnético. Este fenômeno requer a aplicação de elevados campos magnéticos. Dentre as ligas com MSMA candidatas à utilização em atuadores controlados magneticamente cabe destacar as ligas do tipo FeNi (Shimizu & Kakashita, 1989). As ligas NiAlCo e FePd também pertencem a esta classe (Liang et al., 2003).

Liang et al. (2003) avaliam o trabalho gerado durante este ciclo de atuação magnética, baseados no diagrama energia livre-temperatura das ligas. Como conclusão, afirmam que para que uma MSMA seja utilizada como atuador reversível empregando este tipo de fenômeno, o processo de magnetização deve ser capaz de modificar as temperaturas de transformação de fase de tal forma que não haja interseção entre as temperaturas dos estados desmagnetizado e magnetizado. Neste contexto, eles atestam que a liga NiAlCo não apresenta características apropriadas para atuação reversível (b), enquanto a liga FePd (a), embora seja adequada, não é capaz de desenvolver grandes forças de atuação.

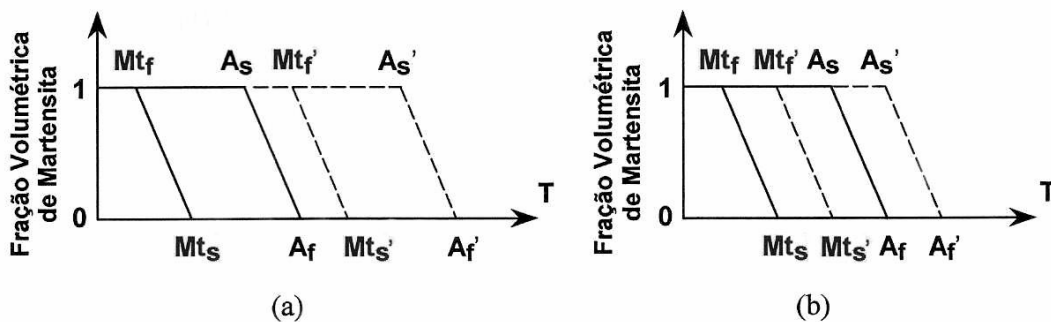


Figura 4 – Diagrama fração volumétrica de martensita-temperatura

Na figura 4 as linhas cheias representam o estado desmagnetizado e as linhas tracejadas representam o estado magnetizado (Liand et al, 2003). (a) Possibilidade de atuação magnética reversível; (b) Impossibilidade de atuação magnética reversível.

## 2.2 Fenômeno de Reorientação Martensítica por Indução Magnética

O fenômeno de reorientação martensítica por indução magnética diz respeito ao processo de reorientação da martensita obtido através da imposição de um campo magnético (Cui et al., 2004) que provoca o aparecimento de grandes deformações comparáveis àquelas alcançadas em um processo de reorientação obtido pela imposição de um campo de tensões. A principal propriedade responsável por este fenômeno é a *anisotropia magnética* que evita a magnetização espontânea da variante mais favoravelmente alinhada com o campo magnético. A restrição oferecida por esta anisotropia gera grandes forças nas interfaces das variantes geminadas que são necessárias ao processo de reorientação.

Segundo Vassiliev (2002), além da anisotropia magnética, mais dois requisitos devem ser preenchidos: (a) a martensita maclada deve ser magnética/ferromagnética para responder à influência do campo magnético; (b) a transformação martensítica deve ser termoelástica, ou seja, as interfaces das variantes devem possuir uma boa mobilidade para que, após a remoção do campo magnético, o material seja capaz de retornar à sua configuração original.

Poucas ligas reúnem estas características, utilizando campos magnéticos de baixa magnitude. As ligas mais empregadas nesta categoria são as chamadas ligas binárias como, por exemplo, FePd, FePt, ou ainda, as ligas à base de  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  conhecidas como *ligas de Heusler*. Esta última tem sido a mais explorada devido ao seu potencial para aplicações em atuadores, já que é capaz de desenvolver e recuperar (atuação reversível) deformações da ordem de 6% para uma estrutura cristalina tetragonal e até 9,4% para uma estrutura tetragonal (Sozinov et al., 2002), utilizando campos magnéticos inferiores a 1 Tesla =  $10^4$  Gauss (Vassiliev, 2002). A título de comparação, James & Wuttig (1998) atestam para uma liga  $\text{Fe}_7\text{Pd}_3$  uma deformação de 0,6% com a aplicação de campos magnéticos semelhantes. No entanto, a liga  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  apresenta algumas limitações como, por exemplo, o fato de apresentar fratura frágil e elevados índices de tensões residuais que, por vezes, ocasiona a fratura do material devido apenas à variação de temperatura.

Para entender melhor o mecanismo de deformação das MSMA, considere a figura 5 que ilustra o comportamento de materiais magnéticos com baixa e alta anisotropia durante a aplicação do campo magnético horizontal. Em materiais com baixa anisotropia magnética, com a aplicação do campo, há um alinhamento da direção da magnetização de todas as variantes do material. Para que isso aconteça, é necessário girar a magnetização de todas aquelas variantes que não estão alinhadas com o campo. Já em materiais com alta anisotropia magnética, com a aplicação do campo, há uma movimentação das interfaces das variantes, de maneira que a variante que possui a direção de magnetização alinhada com o campo torna-se predominante. Vale ressaltar que a energia despendida para movimentar as interfaces (no caso de alta anisotropia) é muito inferior àquela necessária para girar a direção de magnetização das diversas variantes (como no caso de baixa anisotropia). Além disso, a deformação alcançada em ligas com alta anisotropia é bem maior que a desenvolvida em materiais com baixa anisotropia. Na figura 5, as setas representam a magnetização espontânea de cada variante. O estado inicial superior de ambos os casos corresponde à configuração formada e com campo magnético nulo. Enquanto a condição inferior indica a máxima deformação alcançada em cada processo para um campo magnético saturado.

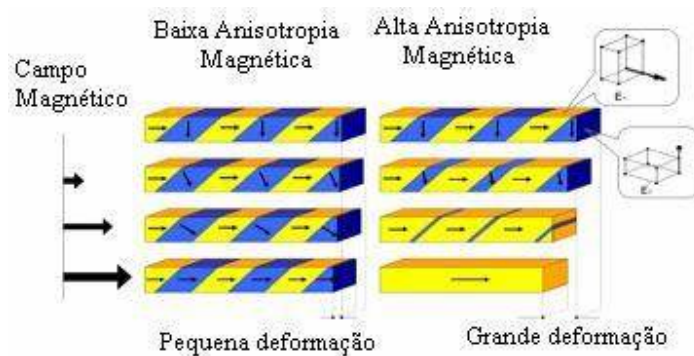


Figura 5 – Representação esquemática dos mecanismos de deformação por reorientação da martensita para MSMA

## **2.3 Aplicações dos Materiais Inteligentes**

Materiais com memória de forma (SMA) são empregados na área médica com os cateteres vasculares e aparelhos para tratamento de escoliose, entre outros; na área odontológica com os aparelhos ortodônticos; na robótica com os “muscle wires” e indústria aeroespacial.

Materiais magnetostrictivos são empregados como atuadores; na área automotiva; biomédica com medidores de temperatura, pressão e tensão; microposicionamento em grandes regimes de forças e sensores de nível.

Materiais com memória de forma magnética (MSMA) são empregados como atuadores, válvulas e motores lineares.

### **2.3.1 Aplicações com Material SMA**

#### *2.3.1.1 Cateteres Vasculares*

O “stent” é uma estrutura utilizada para manter o segmento do vaso aberto após a realização da angioplastia, isto é, abertura de um vaso arterial ou venoso que estava parcial ou totalmente obstruído. O stent com SMA é amplamente utilizado nas especialidades como radiologia intervencionista, cirurgia vascular e cardiologia. Antes de ser colocado no corpo humano, o stent sofre uma compressão encontrando-se e seu estado martensítico e sua forma é modificada. É introduzido no vaso e com o aquecimento da temperatura do corpo, ele se expande retornando a sua forma original.

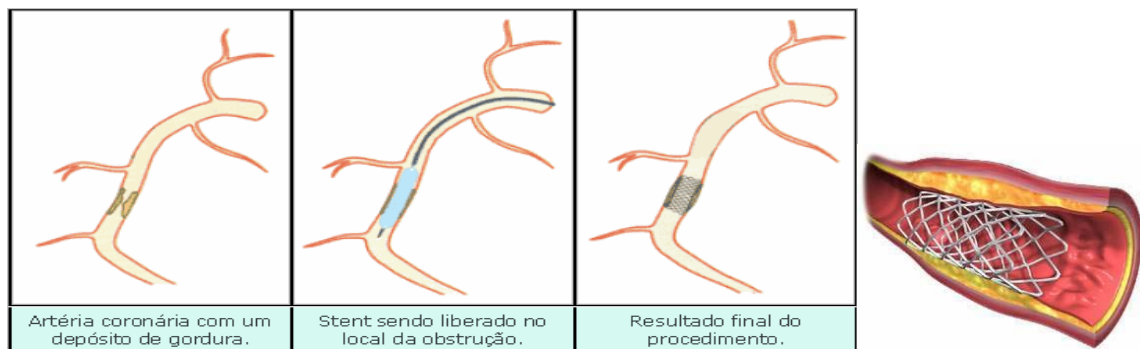
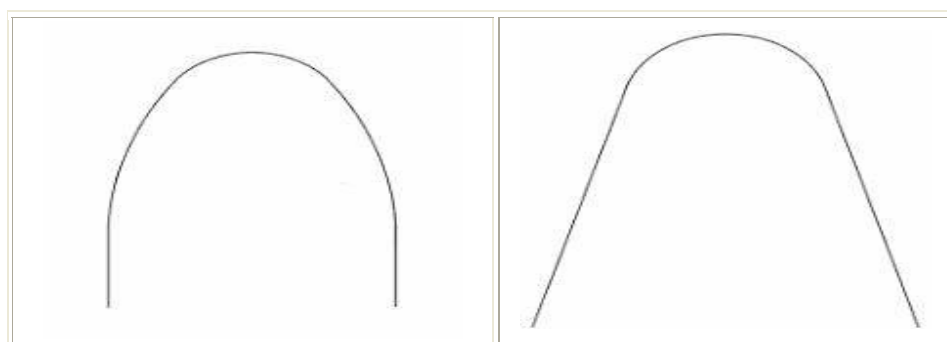


Figura 6 – Cateter Vascular

### 2.3.1.2 Aparelhos Ortodônticos

As SMAs apresentam, durante os trechos de transformação de fase, elevados índices de deformação para uma pequena variação de tensão. Assim, o uso das SMAs em aparelhos ortodônticos elimina a necessidade de repetidos apertos, acelerando o processo corretivo. Os aparelhos com memória de forma proporcionam um maior conforto aos pacientes durante a instalação e também no processo corretivo. Na figura 7 seguem formas de arcos ortodônticos, da liga de Nitinol (NiTi), disponíveis para uso.



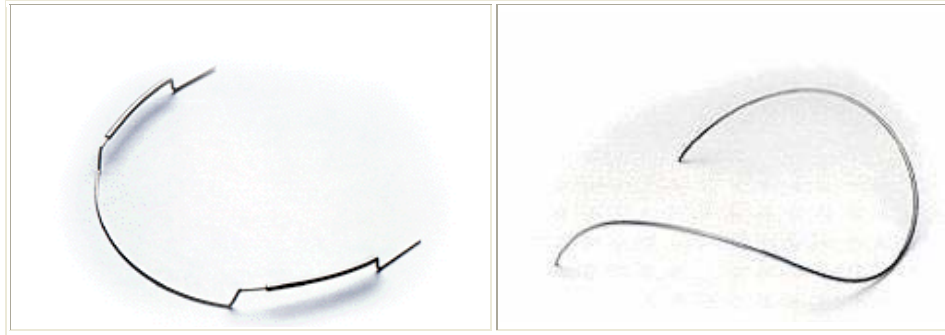


Figura 7 – Aparelhos Ortodônticos

### *2.3.1.3 Robótica*

A liga com memória de forma SMA é utilizada na robótica como “muscle wires”. Os muscle wires são fios que se comportam como músculos relaxam e contraem num atuador. Para demonstrar o efeito de memória de forma, deformam-se arames de nitinol (liga de NiTi) em temperatura ambiente. Em seguida, os arames são aquecidos de 60 a 70°C readquirindo a forma retilínea inicial.

## 2.3.2 Aplicações com Material Magnetoestrictivo

### 2.3.2.1 Medidores de Temperatura, Pressão e Tensão

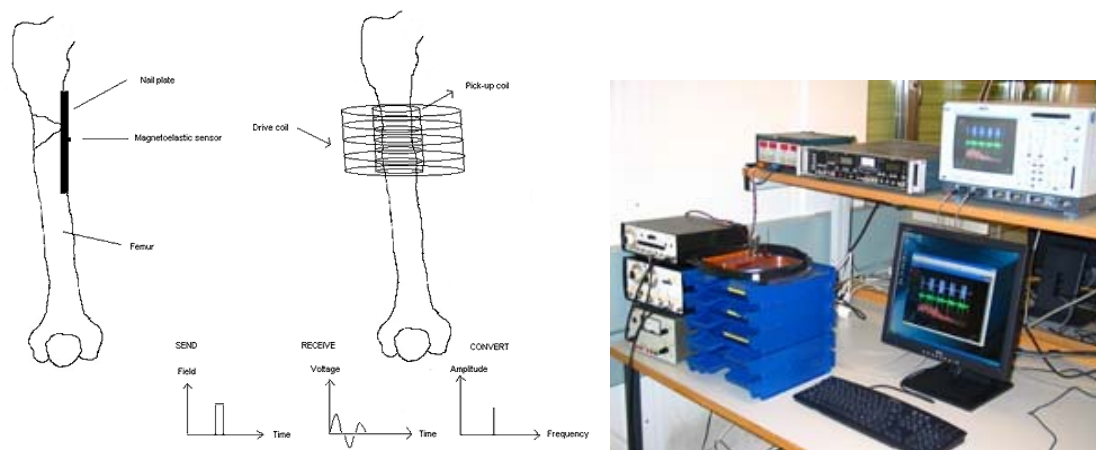


Figura 8 – Medidores de Temperatura, Pressão e Tensão

Este material é composto de uma fita feita de material magnetoestrictivo que é excitado por um campo magnético alternado. Pode ser utilizado para medir temperatura, tensão e pressão.

#### 2.3.2.2 Automotiva

São sensores de posição aplicados na indústria automotiva. Os sensores medem deslocamentos de 250 mm sem perda no desempenho na escala de 72.3 a 250.1 mm. É um sensor robusto e ideal para aplicações onde a repetibilidade e acurácia são requeridas dentro de um custo efetivo.





Figura 9 – Sensor de Posição

### *2.3.2.3 Microposicionamento*

Protótipo desenvolvido pelo Laboratório de Propulsão da Nasa. Este mecanismo foi desenvolvido com a capacidade de microposicionar dispositivos em grandes deslocamentos com incrementos menores que  $1\ \mu\text{m}$  em ambientes com baixas temperaturas. Pode ser aplicado em ajuste de microscópios, elementos óticos, telescópicos, interferômetros, etc.

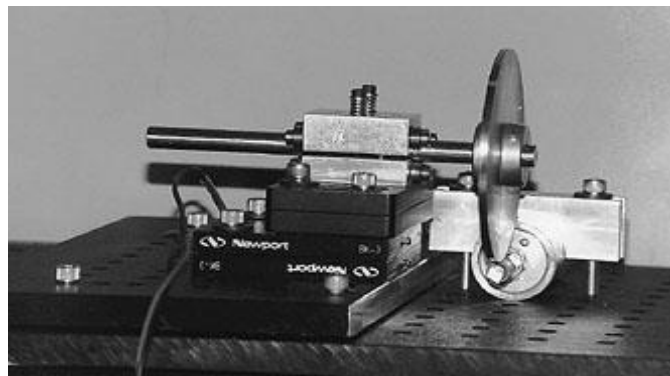


Figura 10 – Sensor de Microposicionamento

### 2.3.3 Aplicações com Material MSMA

#### 2.3.3.1 Atuadores

Exemplos de benefícios dos atuadores com memória de forma magnética são possuir precisão no deslocamento do curso, operam em baixas voltagens (até 200 Volts) e têm movimentos rápidos em virtude de suas elevadas frequências de operação.

A estrutura básica do movimento dos atuadores MSM pode ser vista na figura 11. Nesta topologia o elemento MSM e o núcleo ferromagnético estão localizados no mesmo circuito magnético e o campo magnético é gerado pelas bobinas. As bobinas funcionam como indutores. A força do campo magnético dentro do elemento MSM depende somente das correntes das bobinas.

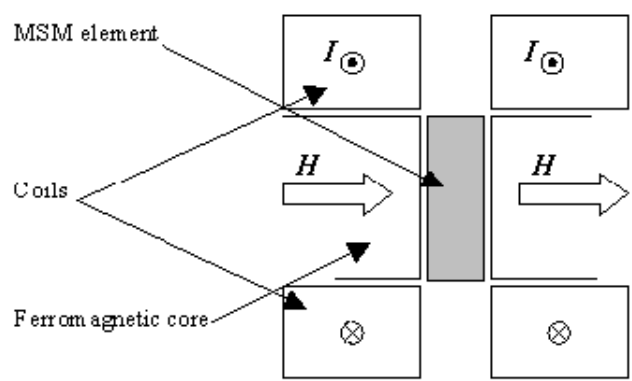


Figura 11 – Estrutura básica de um atuador MSMA

A figura 11 mostra a estrutura básica de um atuador MSMA (Suorsa, Tellinen, et al, 2002).

Quando exposto ao campo magnético o elemento MSM gera uma tensão compressiva. A tensão compressiva é uma função da força do campo magnético que é por sua vez uma função das correntes das bobinas.

Portanto, quando se controla as correntes das bobinas, pode-se controlar a aceleração do atuador MSM. Esta relação afeta o controle da posição do atuador. Para aplicações de

controle de posição é benéfico ter um algoritmo inteligente de controle, que faça a relação entre as correntes das bobinas e o movimento do atuador.

O elemento MSM é a peça central do atuador MSM. A força induzida do campo magnético de um elemento depende de sua área de seção transversal. O deslocamento depende por sua vez do comprimento do elemento MSM. Estes afetam as medidas do atuador.

Os atuadores MSM da empresa AdaptaMat produzem cursos de até 5 milímetros e forças de até 2kN, usando elementos de MSM até 100 milímetros de comprimento. Além disso, existe a possibilidade de serem feitos atuadores maiores.

Os benefícios do material MSM são alta exatidão, o tempo de resposta curto e deformações consideráveis. Com grandes deformações comparadas aos outros materiais (SMA e magnetostrictivo) é possível desenvolver um atuador simples e robusto.

#### *2.3.3.2 Válvulas*

O atuador MSM também pode ser usado em uma válvula de controle de fluxo de ar. No mercado já existem válvulas para controlar o fluxo de ar utilizando MSMA. Um exemplo de operação da válvula MSMA é utilizá-la em 40Hz de frequência, quando se abre e se fecha a válvula para controlar a saída de fluxo de ar. Em aplicações com válvulas, o tempo de resposta do atuador MSM é rápido e chega a uma velocidade menor que 4ms. Como a mudança de forma das MSMA está ligada a intensidade do campo magnético, a abertura da válvula pode ser controlada pela intensidade da corrente da bobina magnética. Esta mudança de forma do MSM torna a estrutura mais robusta e fácil de operar. Uma construção simplificada desta válvula MSM pode ser vista na figura 12.

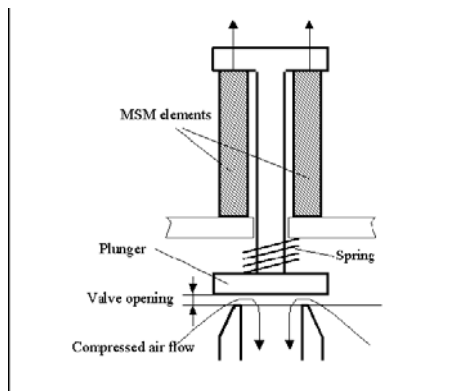


Figura 12 – Estrutura básica de uma válvula de controle de fluxo de ar com elemento ativo MSMA

A figura 12 mostra a estrutura básica de uma válvula de controle de fluxo de ar com elemento ativo MSMA (Suorsa, Tellinen, et al, 2002).

### 2.3.3.3 Motores Lineares

Quando se deseja alcançar um curso muito grande de deslocamento utiliza-se um sistema mecânico para amplificar o movimento. Isto pode ser feito usando a estrutura linear de um motor MSM.

O motor linear consiste em três partes: atuador, braçadeira dianteira e braçadeira traseira. A estrutura básica de um motor linear MSM pode ser vista na figura 13. O atuador está conectado na braçadeira traseira e se movimenta com a braçadeira dianteira. No movimento de ida a braçadeira traseira se abre e o atuador se movimenta em direção a braçadeira dianteira e o eixo do motor se movimenta. Depois, a braçadeira traseira fecha-se travando o eixo nesta nova posição e a braçadeira dianteira abra-se movendo o atuador para trás, retornando a sua posição original. Repetindo-se este movimento em seqüência, ocorre uma mudança de posição do eixo do atuador. Mudando a ordem da seqüência o sentido do movimento também é mudado.

O motor linear MSM também pode ser usado como um atuador MSM. As especificações básicas de operação do motor linear MSM são: velocidade média do eixo de

40mm/s sem carga, variações de 10%, tempo de resposta menor que 1ms, força de 1N e deslocamento de 25,5mm.

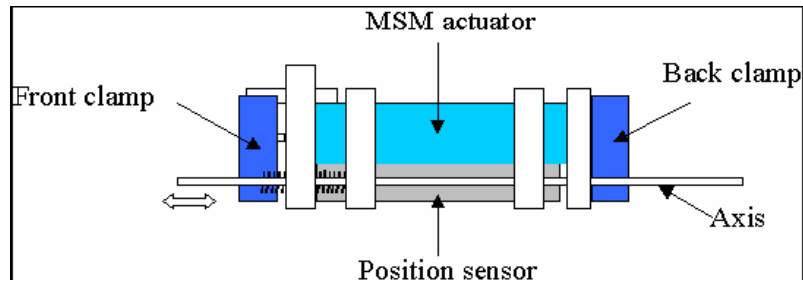


Figura 13 – Estrutura básica de um motor linear MSM

A figura 13 mostra a estrutura básica de um motor linear MSMA (Suorsa, Tellinen, et al, 2002).

O atuador que é utilizado como motor linear mostrado na figura 14 e construído pela empresa AdaptaMat tem o material MSM como elemento ativo, possui 15mm de comprimento e pode operar em altas frequências, gerando forças de até 1kN. Dependendo da construção do atuador, a força pode ser maior.

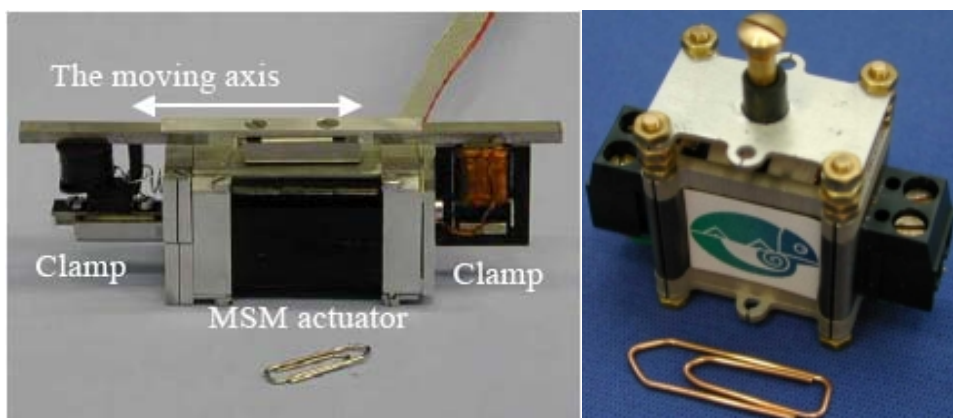


Figura 14 – Atuador MSMA que é utilizado como motor linear

A figura 14 mostra um atuador MSMA que é utilizado como motor linear (Suorsa, Tellinen, et al, 2002).

#### 2.3.3.4 Bombas

As aplicações com atuadores, motores e válvulas lineares com MSM mostradas neste trabalho apenas usam uma direção do movimento do material MSM, porém em dois sentidos. A aplicação de uma bomba MSM demonstra a possibilidade de utilizar duas direções de movimento do material MSM.

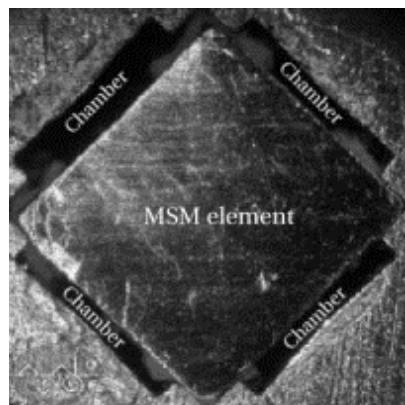


Figura 15 – Elemento MSM se encontra dentro da bomba

A figura 15 mostra uma bomba com MSMA (Suorsa, Tellinen, et al, 2002).

O sistema de bomba MSM consiste em três partes: a própria bomba e duas válvulas. Como pode ser visto na figura 15, a bomba tem quatro câmaras separadas. O elemento MSM esvazia e enche estas câmaras conforme se deforma. Com este procedimento pode-se gerar pressão. Há diversas possibilidades de como utilizar válvulas e câmaras para se executar uma bomba. Uma maneira simples é utilizar somente as câmaras e abrir e fechar as válvulas.

## 2.4 Comparação entre os Materiais Inteligentes

Tabela 1 – Comparação entre os Materiais Inteligentes

	PZE	PZEM	Nitinol SMA	Terfenol-D	NiMnGa MSMA
Mecanismo de Atuação	piezo elétrico	Piezo elétrico Multi camadas	Liga com Memória de Forma	Magneto estritivo	Liga com Memória de Forma Magnética
Max deformação	0,13%	0,07%	2% a 8%	0,2%	6% a 10%
Temp Curie (°C)	200 a 350	200 a 350	-	380	103*
Fator acoplamento/balanco energia (%)	75	70	-	75	75
Campo máx para deformação	2MV/m	2MV/m	-	240kA/m	400kA/m
Histereses	10%	>10%	Alta	2%	Alta
Temp Operação	100°C	100°C	-	150°C	70°C*

\* Pode aumentar ao modificar a proporção dos elementos NiMnGa

Memória de Forma (SMA)	Memória de Forma Magnética (MSMA)
Atuação por aquecimento e resfriamento	Atuação por campo magnético externo
NiTi, NiTiCu, CuZnAl, CuAlNi	NiMnGa, FePt, FePd, CoNiGa
Há necessidade de condutores elétricos para aquecimento da amostra para atuação como resistência elétrica	Não há necessidade de condutores elétricos para aquecimento da amostra como resistência elétrica, pois é atuado com campo magnético
Atuador que geralmente funciona em tração	Atuador que geralmente funciona em compressão
Faixa típica de operação de tensão de 200 a 800 MPa	Faixa típica de operação de tensão de 1 a 3 MPa, dependendo do twinning stress (pré-carga)
Frequência máx 5 Hz	Frequência máx 380-500Hz
Biocompatível (stent, aparelho ortodôntico)	Não é biocompatível
Fadiga: 10 milhões de ciclos	Fadiga: 100 milhões de ciclos
Formato comercial: Arames	Formato comercial: Barras

## *Capítulo 3*

### **3 Modelo Constitutivo de Kiefer e Lagoudas (2005)**

Através dos experimentos desenvolvidos Kiefer e Lagoudas (2005) demonstraram as reorientações das variantes martensíticas induzidas por um campo magnético. As deformações macroscópicas das ligas com memória de forma magnética são oriundas das alterações microestruturais na distribuição de variantes martensíticas resultando em diferentes escalas macroscópicas e microscópicas. Constantou-se também que as ligas com memória de forma magnéticas NiMnGa, na sua forma cristalográfica austenítica, possuem bordas em forma de cubo com extensão de  $a_0$  e apresentam-se com uma simetria tetragonal. Durante a fase martensítica, quando se expõe o material MSMA a uma bobina magnética, cada variante martensítica é magnetizada ao longo de uma direção cristalográfica preferencial chamada de eixo magnético fácil, que é alinhado com a aresta menor da unidade de célula tetragonal conforme ilustra a figura 16 (Kiefer e Lagoudas, 2005). Esta direção da magnetização pode ser tanto positiva como negativa. É importante ressaltar que a aplicação de um campo magnético poderá ser utilizada para favorecer variantes selecionadas umas sobre as outras. Este processo é denominado de reorientação das variantes martensíticas induzidas pelo campo magnético cujo mecanismo microestrutural causa o efeito macroscópico de memória de forma magnético esperado.

Na figura 16 observam-se três variantes martensíticas tetragonais possíveis com suas respectivas arestas sendo “a” maior e “c” a menor. As setas indicam as possíveis orientações da magnetização de saturação dentro de cada variante – vetores de magnetização (Kiefer e Lagoudas, 2005).



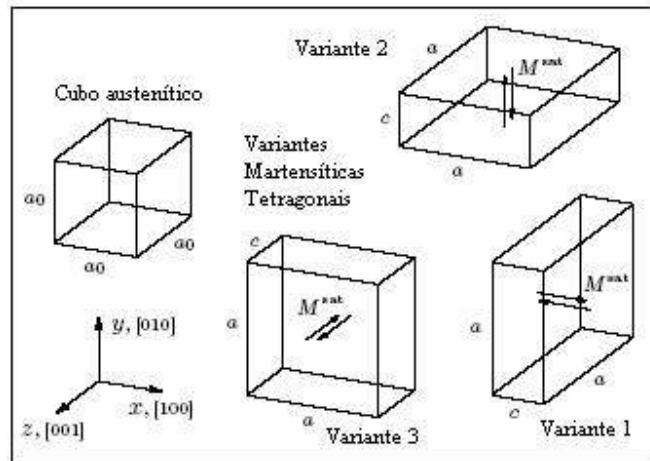


Figura 16 – Estrutura de cristal da fase austenítica e as variantes martensíticas tetragonais da liga NiMnGa



Figura 17 – Microestrutura da liga MSMA NiMnGa

A figura 17 mostra a microestrutura da liga MSMA (James e Kinderlehrer, 1990).

Tickle e James (1999), Tickle et al., (1999) e Tickle (2000) através de experiemntos relataram na literatura que o processo de reorientação pode ser mensurado. Na figura 18 (Kiefer e Lagoudas, 2005) é apresentado o esquema ilustrativo do fenômeno de reorientação. O material com memória de forma magnética (MSMA) NiMnGa é submetido a uma tensão constante em baixa temperatura causando a transformação da fase austenita para martensita. Quando se aplica uma tensão axial compressiva sobre o material surge a configuração da variante martensítica 1. Esta tensão compressiva é mantida constante durante toda a

experiência entre um limite inferior dado pela tensão  $\sigma^{sv}$  e um superior dado pela tensão de bloqueio  $\sigma^b$ , pois fora destes limites o efeito de memória de forma magnética causado pelo processo de reorientação martensítico é suprimido, isto é, o material MSMA não sofre deformação (Tickle e James, 1999).

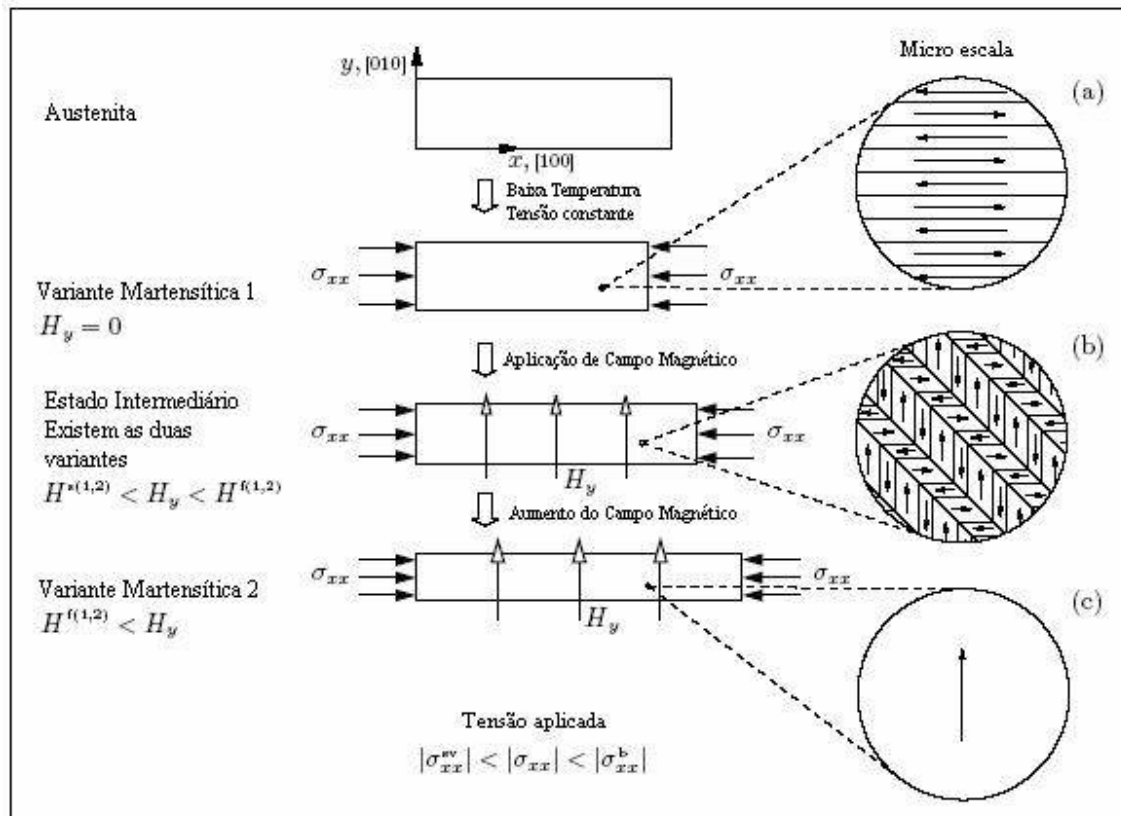


Figura 18 – Esquema de várias configurações de uma amostra de monocristal de NiMnGa

A figura 18 mostra o esquema de várias configurações de uma amostra de monocristal de NiMnGa, as letras (a), (b) e (c) ilustram os arranjos microestruturais magnéticos e cristalográficos das variantes martensíticas e domínios magnéticos (Kiefer e Lagoudas, 2005).

No estado da variante martensítica 1 a microestrutura magnética cristalográfica é mostrada na letra (a) da figura 18. Para este estado inicial a visão da microescala ilustra

vários domínios magnéticos. Esses domínios magnéticos estão representados por setas com sentidos contrários onde a magnetização é homogênea e são separados por paredes de domínio indicadas por linhas horizontais (Kittel, 1949; Cullity, 1972; Spaldin, 2003). Na escala considerada, as paredes de domínio são de espessura zero. Em função da simetria tetragonal considerada da martensita, os vetores de magnetização são orientados ao longo da direção [100] horizontal que é o eixo fácil da variante 1 e apontam ou na direção da coordenada positiva ou na direção da coordenada negativa, dependendo do domínio. Não existe campo magnético externo aplicado nesta configuração inicial.

No esquema (b) da figura 18 um nível de campo magnético é aplicado de maneira intermediária, cujo valor está entre os valores limites de  $H^{s(1,2)}$  e  $H^{f(1,2)}$ . Os símbolos s e f representam o início e o término do processo de reorientação da variante 1 para a variante 2, respectivamente. Linhas verticais e horizontais indicam as paredes de domínio magnético. Em referido estado, as duas variantes coexistem e formam uma configuração gêmea com dois tipos de domínios magnéticos, vertical e horizontal. O material de memória de forma magnético é magnetizado com a aplicação de um campo magnético externo. Concomitantemente aumenta-se gradativamente o campo magnético causando a deformação macroscópica da amostra NiMnGa.

Quando se aplica um campo magnético transversal  $H_y$  acima do valor crítico  $H^{f(1,2)}$  ocorre a transformação da variante 1 para a variante 2, que pode ser observado no esquema (c) da mesma figura 18. Desta forma, a reorientação e a deformação são máximas. Aumentando o nível do campo magnético muito acima do valor crítico  $H^{f(1,2)}$ , no qual o processo de reorientação atingiu seu limite, não causará nenhuma deformação adicional no material. Nesta fase há uma reorientação dos domínios para um único domínio magnético.

Analisando-se em conjunto as figuras 16 e 18 e comparando-se com as formas tetragonais das variantes da amostra NiMnGa, durante o processo de reorientação a aresta maior  $a$  da variante 2 passa a ser a aresta menor  $c$  da variante 1 ao longo da direção [100], e portanto, transformando a variante 1 em variante 3.

A combinação da evolução da variante martensítica com as alterações na estrutura de domínio magnético resultam na deformação macroscópica do material e portanto no efeito de memória de forma magnética (MSME).

Em geral, o processo de magnetizar uma amostra de liga com memória de forma magnética (MSMA) envolve vários mecanismos que são: a redistribuição das variantes martensíticas, o movimento de parede de domínio magnético e a rotação da magnetização com afastamento do eixo magnético preferencial. Na medida em que há mudança da variante martensítica 1 para a martensítica 2 ocorre modificações na fração volumétrica das variantes.

Um quadro geral termo-magneto-mecânico (modelagem) também deve ser estabelecido, o que é realizado no próximo item.

### 3.1 Modelagem Fenomenológica

Kiefer e Lagoudas (2005) propõem um modelo constitutivo que mostra o efeito de memória de forma causado pelo processo de reorientação. O particular interesse é associar a resposta não linear e histerética da deformação macroscópica através da aplicação de campo magnético na presença de tensão compressiva. A condição termodinâmica do corpo do material com memória de forma NiMnGa pode ser caracterizada pela função  $G$  de energia livre de Gibbs, que depende da temperatura  $T$  de variáveis de condição independente, do tensor  $\sigma$  de tensão de Cauchy e da força  $H$  de campo magnético, assim como de um conjunto de variáveis internas de condição. Além da tensão de deformação  $\varepsilon^r$  de reorientação inelástica, as variáveis internas de condição são dadas por um conjunto genérico  $\zeta$ .

A energia livre de Gibbs deve geralmente conter uma parte magnética e uma magnetoelástica. A contribuição magnetoelástica é desprezada, já que as tensões associadas são pelo menos duas ordens de magnitude menores em MSMA do que as tensões causadas pelo rearranjo da variante (Tickle e James, 1999). A parte magnética contém a energia magnetocristalina anisotrópica e os termos da energia Zeeman, que foram identificados como as forças magnéticas impulsionadoras para a reorientação variante e o processo associado de magnetização. A energia de Zeeman é a principal força no processo de redistribuição de domínios magnéticos e pode ser interpretada como energia potencial associada com a interação entre a magnetização do material e o campo magnético aplicado. O modelo prevê a aplicação de um campo magnético transversal produzindo reorientação axial no cristal NiMnGa mantendo-se a tensão constante compressiva. Portanto, a energia livre de Gibbs proposta por Kiefer e Lagoudas (2005) é:

$$G = \hat{G}(T, \sigma, H, \varepsilon^r, \zeta) = u - sT - \frac{1}{\rho} \sigma : \varepsilon^{te} - \frac{\mu_0}{\rho} H \cdot M, \quad (2)$$

Onde  $s$  é a entropia específica,  $\rho$  é a densidade de massa,  $\varepsilon^{te}$  o tensor de deformação termo-elástico,  $\mu_0$  a permeabilidade do espaço livre e  $M$  a magnetização.

$$\text{A deformação total é dada por: } \varepsilon = \varepsilon^{te} + \varepsilon^r + \varepsilon^{tr}, \quad (3)$$

Onde  $\varepsilon^r$  é a deformação por reorientação e  $\varepsilon^{tr}$  a deformação por transformação.

Em seguida ao reconhecido procedimento de Coleman e Noll (1963), a combinação da primeira e segunda leis da termodinâmica produz a *desigualdade Clausius-Duhem*, que é apresentada na forma local como:

$$\begin{aligned} & -\rho \left( s + \frac{\partial G}{\partial T} \right) \dot{T} - \left( \varepsilon^{te} + \rho \frac{\partial G}{\partial \sigma} \right) : \dot{\sigma} - \left( \mu_0 M + \rho \frac{\partial G}{\partial H} \right) \dot{H} \\ & + \left( \sigma - \rho \frac{\partial G}{\partial \varepsilon^r} \right) : \dot{\varepsilon}^r - \rho \frac{\partial G}{\partial \zeta} \cdot \dot{\zeta} - \frac{1}{T} \mathbf{q} \cdot \nabla T \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

As taxas  $\dot{T}$ ,  $\dot{\sigma}$  e  $\dot{H}$  aparecem de forma linear na equação acima. Através da premissa constitutiva da energia livre de Gibbs, os seus coeficientes colocados em parênteses apenas dependem do conjunto de variáveis de condições  $(T, \sigma, H, \varepsilon^r, \zeta)$ , não de suas taxas. Assim sendo, para que a desigualdade não seja afetada por processos arbitrários, esses coeficientes devem desaparecer, o que leva às relações constitutivas da entropia, tensão termoelástica e magnetização, respectivamente:

$$s = -\frac{\partial G}{\partial T}; \quad \varepsilon^{te} = -\rho \frac{\partial G}{\partial \sigma}; \quad M = -\frac{\rho}{\mu_0} \frac{\partial G}{\partial H} \quad (5)$$

As variáveis internas de estado deste modelo de Kiefer e Lagoudas foram selecionadas através do arranjo 2-D da microestrutura, onde duas variantes martensíticas e dois tipos de domínios magnéticos coexistem. Portanto, as variáveis internas de estado são: a fração de volume  $\xi$  da variante 2 martensítica escalar e a fração de volume  $\alpha$  de domínio magnético 2. De modo corresponde, a fração de volume da variante 1 é  $(1 - \xi)$ , e a do domínio 1 é  $(1 - \alpha)$ . A terceira variável interna é a tensão de reorientação  $\varepsilon^r$ . Para responder pela rotação local dos vetores de magnetização, os ângulos  $\theta_i$ , com  $\left( -\frac{\pi}{2} \leq \theta_i \leq \frac{\pi}{2} \right)$  são apresentados como variáveis adicionais de condição interna, onde o subscrito  $i$  se refere a uma das quatro regiões das combinações das variantes martensíticas e domínios magnéticos no arranjo em questão.

Derivando-se a energia livre total em relação às variáveis de condição interna, por exemplo, a deformação por reorientação, a fração de volume da variante martensítica, fração de volume de domínio magnético e a rotação dos momentos magnéticos, as seguintes forças termodinâmicas impulsionadoras são derivadas:

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}^r &:= \sigma - \rho \frac{\partial G}{\partial \varepsilon^r} = \sigma^{\text{eff}}; & \tilde{\pi}^\xi &:= -\rho \frac{\partial G}{\partial \xi}; & \pi^\alpha &:= -\rho \frac{\partial G}{\partial \alpha} \\ \pi^{\theta_1} &:= -\rho \frac{\partial G}{\partial \theta_1}; & \pi^{\theta_2} &:= -\rho \frac{\partial G}{\partial \theta_2}; & \pi^{\theta_3} &:= -\rho \frac{\partial G}{\partial \theta_3}; & \pi^{\theta_4} &:= -\rho \frac{\partial G}{\partial \theta_4} \end{aligned} \quad (6)$$

Portanto, a função de reorientação  $\phi^\xi$  em termos de força termodinâmica  $\pi^\xi$  é dada por:

$$\phi^\xi(\sigma, H, \xi, \alpha) = \begin{cases} \pi^\xi - Y^\xi, & \dot{\xi} > 0 \\ -\pi^\xi - Y^\xi, & \dot{\xi} < 0 \end{cases}, \text{ onde } Y^\xi \text{ é a quantidade escalar positiva fisicamente}$$

relacionada à dissipação interna associada com o movimento do limite duplo. (7)

De forma análoga, a função associada com a movimentação de parede do domínio magnético  $\phi^\alpha$  em termos de força termodinâmica  $\pi^\alpha$  é dada por:

$$\phi^\alpha(\sigma, H, \xi, \alpha) = \begin{cases} \pi^\alpha - Y^\alpha, & \dot{\alpha} > 0 \\ -\pi^\alpha - Y^\alpha, & \dot{\alpha} < 0 \end{cases}, \text{ onde } Y^\alpha \text{ é a quantidade escalar positiva fisicamente}$$

relacionada à dissipação interna associada com o movimento de rotação. (8)

### 3.2 Redução das Equações para o Caso 2-D

O modelo utilizado neste trabalho foi proposto por Kiefer e Lagoudas (2005). Visando a simplicidade, as equações do modelo foram reduzidas para um caso 2-D, onde duas considerações são feitas para exemplo numérico especial a ser considerado. Primeiro, este caso está restrito à modelagem do processo de reorientação da variante com uma estrutura fixa de domínio magnético de  $\alpha = 1$  (para  $|H| > 0$ ). Assim, um domínio magnético é eliminado completamente à custa do domínio mais favoravelmente orientado e as paredes do domínio magnético, portanto, não estão presentes. Portanto, a força orientadora associada ao movimento da parede do domínio foi omitida, uma vez que a microestrutura magnética não pode evoluir no caso considerado, ou seja,  $\pi^\alpha = 0$ . O domínio único é ideal, porque após a aplicação de campos magnéticos relativamente baixos, as paredes do domínio são essencialmente eliminadas (Tickle, 2000; O'Handley et al., 2003). A segunda consideração para restringir este exemplo numérico é o de infinita anisotropia magnética. Isso inibe a rotação dos vetores de magnetização com relação aos eixos magnéticos livres. Desde que se presume que as rotações de magnetização local devem ser inibidas, a dependência da energia livre nos ângulos de rotação é eliminada e as forças orientadoras associadas são equivalentemente iguais a zero, ou seja,  $\pi^\theta = 0$ .



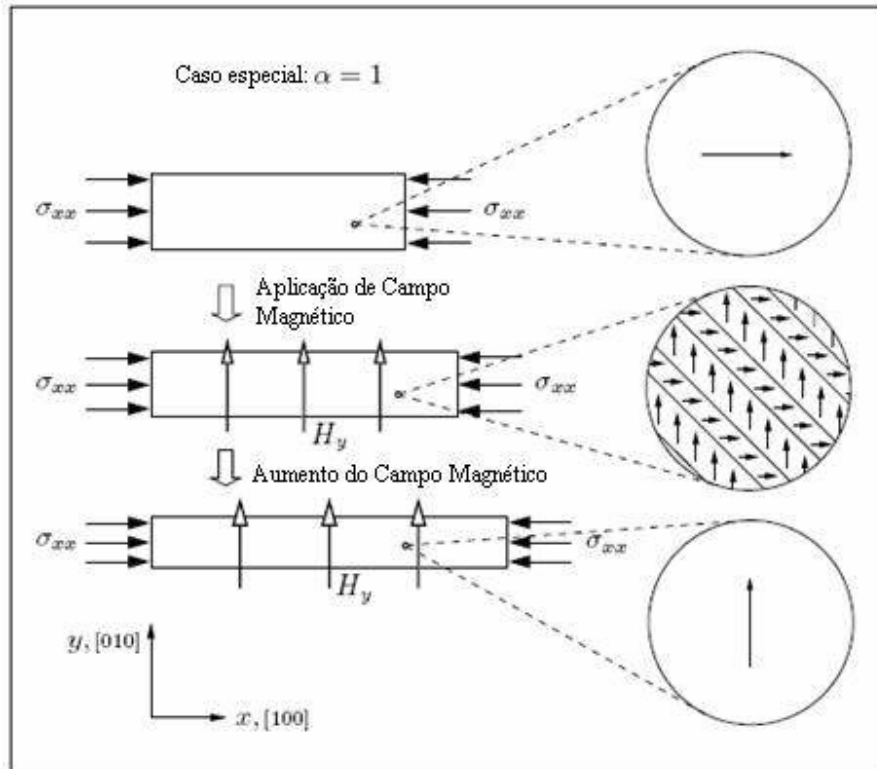


Figura 19 – O processo de reorientação da variante com estrutura fixa de domínio  $\alpha = 1$

A natureza assumida da microestrutura magnética e cristalográfica está ilustrada esquematicamente na figura 19 (Kiefer e Lagoudas, 2005).

No caso de  $\alpha = 1$  e  $\theta_i = 0$  a expressão de energia livre se reduz a:

$$G = -\frac{1}{2\rho} S \sigma^2 - \frac{\mu_0}{\rho} M^{\text{sat}} \xi H + \frac{1}{\rho} f^\xi(\xi, \varepsilon^r) + G_0(T) \quad (9)$$

As equações constitutivas para as variáveis de estado dependente e a força de acionamento termodinâmica para o movimento do limite duplo, reduzem-se para:

$$\text{Entropia: } s = -\frac{\partial G}{\partial T} = \frac{\partial G_0}{\partial T} = \text{constante}, \quad (10)$$

$$\text{Tensão Termoelástica: } \varepsilon^{te} = -\rho \frac{\partial G}{\partial \sigma} = S\sigma, \quad (11)$$

$$\text{Magnetização: } M = -\frac{\rho}{\mu_0} \frac{\partial G}{\partial H} = M^{\text{sat}} [(1 - \xi)\mathbf{e}_x + \xi\mathbf{e}_y] \quad (12)$$

A entropia é apenas uma função de temperatura, e assim sendo deve ser constante por todo o processo de reorientação caso sejam assumidas condições isotermais. Isso significa que as mudanças de entropia em razão de efeitos dissipativos devem ser equilibradas por transferência apropriada de calor para que seja mantida uma temperatura constante.

No exemplo 2-D considerado, a amostra é polarizada em um único estado de variante 1 aplicando-se uma tensão axial, que é mantida constante. Um campo magnético externo e transversal é usado para favorecer a variante martensítica 2, na qual a magnetização é orientada ao longo do eixo  $y$  e transversal. A diferença nas dimensões cristalográficas das duas variantes resulta na deformação axial observada.

A resposta do material é considerada em um ponto do material onde os campos são homogêneos. Assume-se então que o estado da tensão  $\sigma$  deve ser uniaxial, ou seja,  $\pi^r = \sigma = \text{constante} < 0$  onde  $\sigma^{\text{sv}} < |\sigma| < \sigma^{\text{b}}$ . (13)

Para completar a formulação do modelo constitutivo 2-D de Kiefer e Lagoudas, um modelo para a força orientadora deve ser especificado. Vários tipos de modelos foram apresentados na literatura no contexto de transformação de fase martensítica de ligas de memória de forma convencionais, como o modelo exponencial (Tanaks, 1986; Sato e Tanaka, 1988), modelo polinomial (Lagoudas et al., 1996; Boyd e Lagoudas, 1996), e o modelo trigonométrico (Liang e Rogers, 1990; Lagoudas et al., 1996). Neste trabalho serão utilizados os modelos polinomial e trigonométrico, onde as funções serão adaptadas no contexto do processo de reorientação da variante martensítica.

Então, seguindo os passos descritos no artigo Kiefer e Lagoudas (2005) chegam-se as equações da força orientadora para a reorientação da variante, dada por:

Modelo Polinomial:

Reorientação 1 → 2:

$$\pi^\xi = \sigma \varepsilon^{r,\max} + \frac{1}{2} \Delta S \sigma^2 + \mu_0 M^{\text{sat}} H - A^P \xi - B_1^P - B_2^P = Y^{\xi,p} \quad (14)$$

Reorientação 2 → 1:

$$\pi^\xi = \sigma \varepsilon^{r,\max} + \frac{1}{2} \Delta S \sigma^2 + \mu_0 M^{\text{sat}} H - C^p \xi - B_1^p - B_2^p = -Y^{\xi,p} \quad (15)$$

Modelo Trigonométrico:

Reorientação 1 → 2:

$$\pi^\xi = \sigma \varepsilon^{r,\max} + \frac{1}{2} \Delta S \sigma^2 + \mu_0 M^{\text{sat}} H - A^c [\pi - \cos^{-1}(2\xi - 1)] - B_1^c - B_2^c = Y^{\xi,c} \quad (16)$$

Reorientação 2 → 1:

$$\pi^\xi = \sigma \varepsilon^{r,\max} + \frac{1}{2} \Delta S \sigma^2 + \mu_0 M^{\text{sat}} H - C^c [\pi - \cos^{-1}(2\xi - 1)] - B_1^c - B_2^c = Y^{\xi,c} \quad (17)$$

Onde  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  e  $C$  são parâmetros ajustáveis e  $Y^\xi$  o valor crítico para a força orientadora. Esses parâmetros do modelo podem ser mais conveniente expressos em termos de valores do campo magnético  $H^{s(1,2)}(\sigma^*)$ ,  $H^{f(1,2)}(\sigma^*)$ ,  $H^{s(2,1)}(\sigma^*)$  e  $H^{f(2,1)}(\sigma^*)$ , que correspondem ao princípio e término do processo de reorientação à frente e inverso e são considerados constantes do material.

Tabela 2 – Relação entre constantes do material e parâmetros do modelo do cristal  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ , para os modelos polinomial e trigonométrico

Modelo Polinomial:

$$A^p = \mu_0 M^{\text{sat}} \left( H^{f(1,2)}(\sigma^*) - H^{s(1,2)}(\sigma^*) \right)$$

$$B_1^p = \frac{1}{2} \mu_0 M^{\text{sat}} \left( H^{s(1,2)}(\sigma^*) + H^{f(2,1)}(\sigma^*) \right) + \sigma^* \varepsilon^{r,\max}(\sigma^*)$$

$$B_2^p = \frac{1}{4} (C^p - A^p)$$

$$C^p = \mu_0 M^{\text{sat}} \left( H^{s(2,1)}(\sigma^*) - H^{f(2,1)}(\sigma^*) \right)$$

$$Y^{\xi,p} = \frac{1}{2} \mu_0 M^{\text{sat}} \left( H^{s(1,2)}(\sigma^*) - H^{f(2,1)}(\sigma^*) \right) - B_2^p$$

Modelo Trigonométrico:

$$A^c = \frac{\mu_0 M^{\text{sat}}}{\pi} \left( H^{s(1,2)}(\sigma^*) - H^{f(1,2)}(\sigma^*) \right)$$

$$B_1^c = \frac{1}{2} \mu_0 M^{\text{sat}} \left( H^{s(1,2)}(\sigma^*) + H^{f(2,1)}(\sigma^*) \right) + \sigma^* \varepsilon^{r,\max}(\sigma^*)$$

$$B_2^c = \frac{\pi}{4} (A^c - C^c)$$

$$C^c = \mu_0 M^{\text{sat}} \left( H^{s(2,1)}(\sigma^*) - H^{f(2,1)}(\sigma^*) \right)$$

$$Y^{\xi,c} = \frac{1}{2} \mu_0 M^{\text{sat}} \left( H^{s(1,2)}(\sigma^*) - H^{f(2,1)}(\sigma^*) \right) - B_2^c$$

### 3.3 Determinação Numérica dos Parâmetros do Modelo

Para o exemplo que está sendo utilizado, no qual o efeito de memória de forma magnética é introduzido em um monocristal NiMnGa sob tensão compressiva constante e a aplicação de um campo magnético externo, os valores para os parâmetros ajustáveis bem como para o valor crítico da força orientadora seguem na tabela abaixo. Vale ressaltar que os dados abaixo foram calculados considerando que o campo magnético está sob a tensão compressiva de -1,0 MPa.

Tabela 3 – Constantes do cristal Ni<sub>2</sub>MnGa por unidade

$\rho = 8300.0 \text{ kg m}^{-3}; \quad \alpha = 1.0/0.0; \quad \Delta S = 0.0 \text{ Pa}^{-1}; \quad \mu_0 = 1.256 \mu\text{NA}^{-2}; \quad M^{\text{sat}} = 622.0 \text{ kAm}^{-1};$ $\sigma^* = -1.0 \text{ MPa}; \quad H^{s(1,2)}(\sigma^*) = 238.8 \text{ kAm}^{-1}; \quad H^{f(1,2)}(\sigma^*) = 1250.0 \text{ kAm}^{-1};$ $H^{s(2,1)}(\sigma^*) = 398.0 \text{ kAm}^{-1}; \quad H^{f(2,1)}(\sigma^*) = 15.9 \text{ kAm}^{-1};$ $\varepsilon^{r,\text{max}}(-1 \text{ MPa}) = 0.02148; \quad \varepsilon^{r,\text{max}}(-3 \text{ MPa}) = 0.0133;$ $\varepsilon^{r,\text{max}}(-5 \text{ MPa}) = 0.0034; \quad \varepsilon^{r,\text{max}}(-7 \text{ MPa}) = 0.00035;$ $\sigma^b = -8 \text{ MPa}$
---

Observa-se que no artigo é utilizado um valor aproximado de  $H^{s(1,2)} = 3460 \text{ Oe}$ . Pelo CGS-units (Unidade Centímetro-Grama-Segundo)  $1 \text{ Oe} = 79,6 \text{ Am}^{-1}$ . Logo

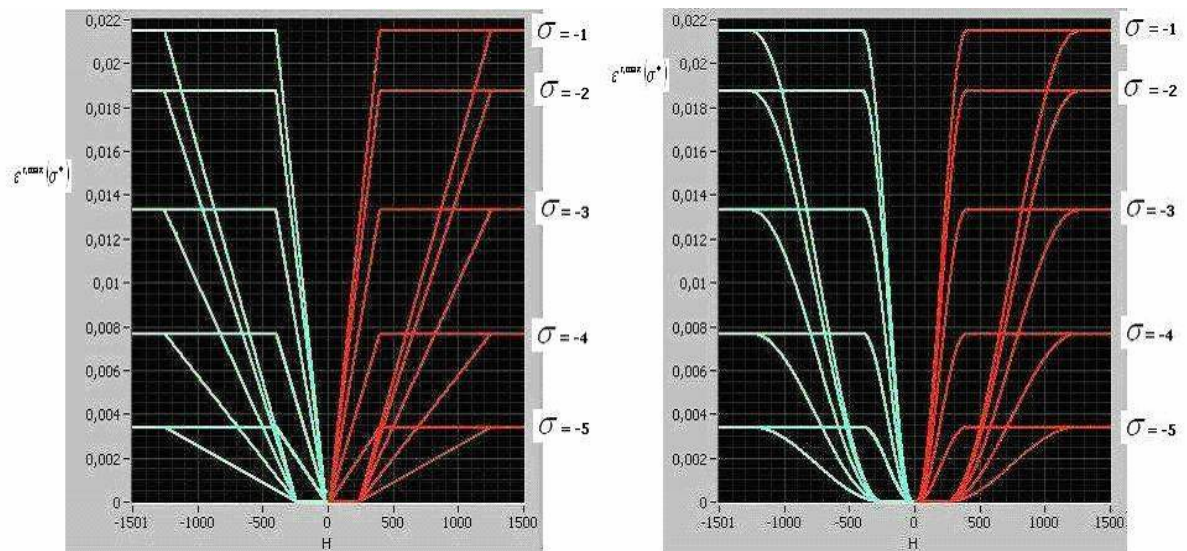
$$H^{s(1,2)} = 3460 \text{ Oe} * 79,6 \text{ Am}^{-1} \therefore H^{s(1,2)} = 275416 \text{ Am}^{-1} = 275,4 \text{ kAm}^{-1}. \quad (18)$$

Calculando os parâmetros ajustáveis e da força orientadora do cristal, têm-se:

Tabela 4 – Valores dos parâmetros ajustáveis e da força orientadora do cristal  $\text{Ni}_2\text{MnGa}$  por unidade para os modelos polinomial e trigonométrico

<u>Modelo Polinomial Kiefer e Lagoudas:</u>	<u>Modelo Trigonométrico Kiefer e Lagoudas:</u>
$A^p = 0.789982 \text{ MPa}$	$A^c = -0.251459 \text{ MPa}$
$B_1^p = 0.078018 \text{ MPa}$	$B_1^c = 0.078018 \text{ MPa}$
$B_2^p = -0.122872 \text{ MPa}$	$B_2^c = -0.122872 \text{ MPa}$
$C^p = 0.298493 \text{ MPa}$	$C^c = -0.095013 \text{ MPa}$
$Y^{\xi,p} = 0.209933 \text{ MPa}$	$Y^{\xi,c} = 0.209933 \text{ MPa}$

A figura 20 mostra uma representação gráfica das curvas típicas de deformação versus curvas de resposta do campo magnético para diferentes níveis de tensão compressiva, com base nos modelos constitutivos MSMA polinomial e trigonométrico. As curvas do gráfico da esquerda representam resultados numéricos do modelo polinomial, enquanto as curvas do gráfico da direita correspondem ao modelo trigonométrico. O eixo vertical exibe a deformação. As curvas foram calculadas para níveis variáveis de tensão constante com base nos valores dos parâmetros do modelo acima descritos.



Modelos Polinomial e Trigonométrico

Figura 20 – Esquema de reorientação axial versus campo magnético transversal para diferentes níveis de tensão

Na figura 20 é observado que quanto maior o campo magnético maior é a deformação e que quanto maior a tensão menor é a deformação. Pode-se afirmar que o modelo de Kiefer e Lagoudas obteve as curvas de resposta de deformação por campo magnético que estão de acordo com dados experimentais apresentados na literatura. Em particular, o modelo captura a natureza não linear e histerética da resposta de tensão de reorientação.

## *Capítulo 4*

### **4 Aplicação de um Modelo MSMA baseado no Modelo de Kiefer e Lagoudas**

#### **4.1 Modelo Desenvolvido de um Atuador MSMA**

O caso estudado é um atuador MSMA constituído do modelo constitutivo de Kiefer e Lagoudas (2005) e do modelo experimental de Tickle (2000). Nos artigos destes autores é informado que a tensão experimentalmente mensurada versus curvas de campo magnético aplicadas não podem ser interpretadas como resposta constitutiva de qualquer material MSMA, pois o campo magnético aplicado depende da geometria do material. Esta informação apenas limita a previsibilidade dos dados quantitativos para este modelo específico. O procedimento é, entretanto, suficiente para ilustrar a aplicabilidade e validade do modelo constitutivo proposto, bem como determinação dos parâmetros do modelo.

O caso estudado é de um atuador típico cuja atuação é feita de forma indireta por meio da deformação sofrida do seu elemento interno, material com memória de forma magnética, NiMnGa, numa barra. A superfície é lisa, sem ranhuras e força de atrito. Utilizou-se a linguagem gráfica LabView para o desenvolvimento do simulador MSMA. Dentre as funções que o programa é capaz de reproduzir, destacam-se: é possível utilizar o campo magnético constante ou variável, crescente ou decrescente mostrando o avanço e o retorno do MSMA, valores de tensões manuais ou automáticas, sistema sem mola utilizando uma roldana e um peso ou sistema com mola, ilustra três tipos de gráficos: campo magnético (kA/m) versus deformação, deslocamento (mm) versus força (Newton) e tensão (MPa) versus deformação e gera arquivos .txt com horário da gravação, valor da força em Newton, deslocamento da barra em mm, deformação, tensão em MPa e campo magnético em kA/m. Para análise de funcionalidade e aplicabilidade do modelo de Kiefer e Lagoudas para o sistema atuador MSMA foram criados dois sistemas: sistema sem mola, com  $k = 0$  ou com roldana e peso e sistema com mola. Dois tipos de modelos também foram utilizados: polinomial e



trigonométrico, este último com resultados mais concretos. O atuador tem o principal objetivo de empurrar a massa na direção horizontal. Quando o sistema é submetido a um campo magnético, a massa somente é deslocada para a direita. E quando o campo magnético é reduzido a massa se move para a esquerda até parar. Vale ressaltar que a relação de deformação é dada por  $\varepsilon = \Delta l / l$  que é adimensional e a tensão é dada por  $\sigma = F / A$  e sua unidade é MPa (Mega Pascal).

## 4.2 Modelagem do Modelo do Atuador MSMA

### 4.2.1 - 1º Caso: Sistema Sem Mola

Neste primeiro caso o sistema não contém mola. O modelo de um atuador com MSMA é composto por um peso e uma roldana. Submete-se o material MSMA a um valor de campo magnético de  $H = 0$  a  $1500 \text{ kA/m}$ . As tensões utilizadas são induzidas e fixas e seus valores são:  $\sigma = |1, 2, 3, 4, 5| \text{ MPa}$ . De acordo com o artigo de Kiefer e Lagoudas a tensão não deve ultrapassar o valor da tensão de bloqueio  $\sigma^b = -8 \text{ MPa}$ , haja visto que acima deste valor o efeito de memória de forma magnética causado pelo processo de reorientação martensítica é completamente suprimido. A força magnética é dada por  $F_{\text{MSMA}}$ .

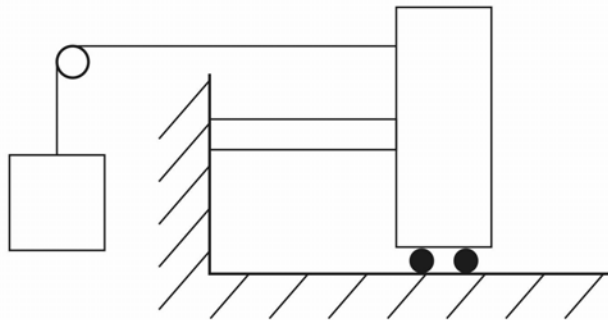


Figura 21 – Esquema do Sistema Sem Mola com  $k = 0$

No esquema da figura 21 são observadas a barra com material com memória de forma magnético e uma massa. O peso colocado estendido pela roldana representa a tensão constante neste caso.

Tem-se que o equilíbrio das resultantes é dado por:

$$F_{\text{MSMA}} = 0 \therefore \sigma = \frac{F_{\text{MSMA}}}{A} \therefore F_{\text{MSMA}} = \sigma \cdot A \quad (19)$$

Como a tensão na MSMA é compressiva, tem-se que:  $-\sigma \cdot A = 0$  (20)

Condição de contorno:  $u_{\text{MSMA}} = u_{\text{mola}}$  (21)

#### 4.2.2 - 2º Caso: Aplicando Campo Magnético Variável no Sistema com Mola

O desenho esquemático abaixo mostra o atuador MSMA. Considera-se a superfície lisa, sem atrito. A força de atrito é dada por  $\vec{F}_a$ . Como a força de atrito é zero,  $\vec{F}_a = 0$ .

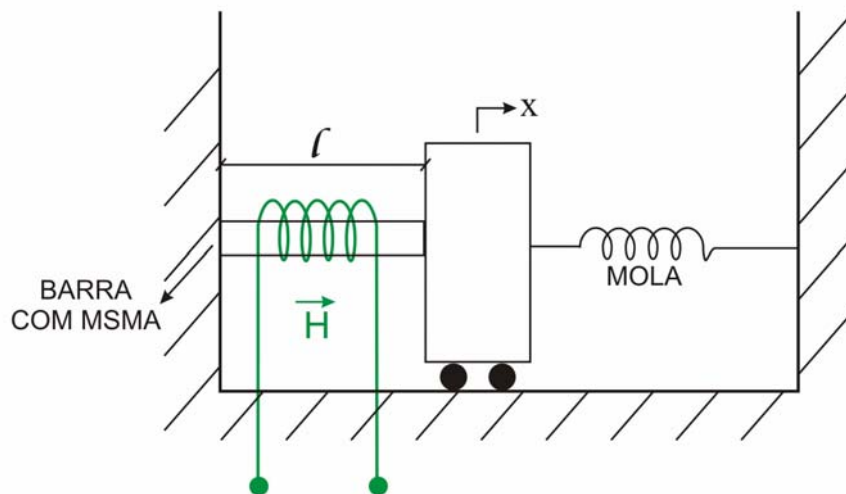


Figura 22 – Atuador MSMA

No segundo caso, o sistema é submetido a um campo magnético residual exercido por uma bobina e a massa é deslocada para a direita. O controle da variação do comprimento do material magnético NiMnGa é exercido pela alteração do campo magnético por meio da variação do campo magnético proveniente da bobina situada em volta do núcleo do material magnético. A barra composta de material com memória de forma magnético NiMnGa é fabricada de forma que os momentos magnéticos são primariamente orientados de forma distribuída. A aplicação do campo magnético obriga o momento de rotação a se alinhar com o campo magnético. O resultado deste efeito é a deformação do material que compõe a barra

ocasionando uma força na direção do avanço da massa. Comparando com o modelo de Kiefer e Lagoudas, nesta fase, a reorientação é dada de 1 para 2.

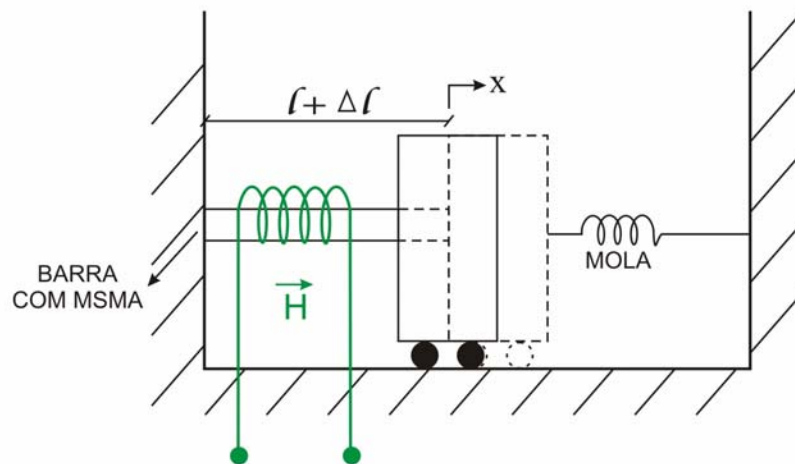


Figura 23 – Aplicando campo magnético no sistema

A mola está pré-comprimida e sua força é dada por  $F_m$ , tem-se:  $F_{MSMA} - F_m = 0$

Pela Lei de Hooke, a força mecânica da mola é dada por:  $F_m = Kx$  (22)

Logo,  $F_{MSMA} - Kx = 0$  onde  $x = \Delta l$  logo  $F_{MSMA} - K\Delta l = 0$  (23)

Sabe-se que a deformação  $\varepsilon$  é a relação entre a deformação do material magnético e o comprimento do material antes da deformação:  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \therefore \Delta l = \varepsilon l$  (24)

$F_{MSMA}^{(1,2)} - K\varepsilon l = 0$   
 $-\sigma \cdot A = K\varepsilon l$  (25)

Conclui-se que o deslocamento da mola deve ser igual ao deslocamento do material magnético, logo:  $u_{MSMA} = u_{mola}$

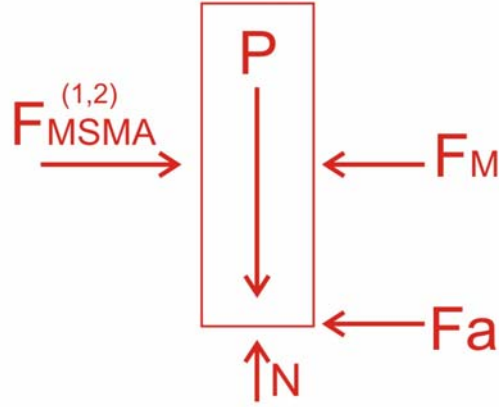


Figura 24 – Diagrama de forças para campo magnético aplicado

Baseando-se nas equações constitutivas do Modelo de Kiefer e Lagoudas para a reorientação  $1 \rightarrow 2$  e sabendo-se que  $\Delta S = 0$ , a tensão resultante do modelo polinomial é dada por:

$$\sigma = \frac{\pi^{\xi^{(1,2)}} - \mu_0 M^{\text{sat}} H + A^p \xi + B_1^p + B_2^p}{\varepsilon^{r,\text{max}}} \quad (26)$$

Dessa forma, durante a transformação de fase, a expressão do sistema quando submetido a um campo magnético no modelo polinomial é:

$$A \cdot \frac{\pi^{\xi^{(1,2)}} - \mu_0 M^{\text{sat}} H + A^p \xi + B_1^p + B_2^p}{\varepsilon^{r,\text{max}}} + K \varepsilon l = 0 \quad (27)$$

E para o modelo trigonométrico:

$$A \cdot \frac{\pi^{\xi^{(1,2)}} - \mu_0 M^{\text{sat}} H + A^c [\pi - \cos^{-1}(2\xi - 1)] + B_1^c + B_2^c}{\varepsilon^{r,\text{max}}} + K \varepsilon l = 0 \quad (28)$$

#### 4.2.3 - 3º Caso: Retorno do Sistema com Mola até Parar

No terceiro caso é mostrado o retorno do sistema reduzindo-se o campo magnético e a massa é deslocada para a esquerda até que fique parada. A deformação do material é bidirecional. Isto ocorre porque além do avanço da barra ser provocado pela corrente do campo magnético, o recuo é provocado pela redução dessa corrente de campo magnético. A força contrária da mola auxilia no retorno total da barra com MSMA de modo mais eficaz. Comparando com o modelo de Kiefer e Lagoudas, nesta fase, a reorientação é dada de 2 para 1.

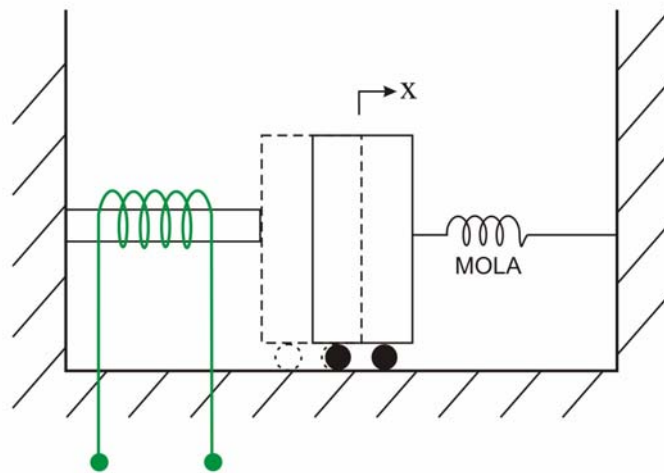


Figura 25 – Retorno do Sistema

Com a redução gradual do campo magnético, a força que atua no material com memória de forma magnética tende a zero:  $F_{MSMA}^{(2,1)} \approx 0$

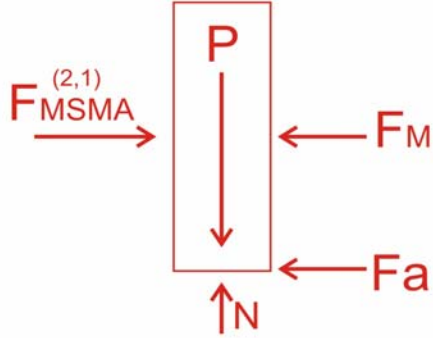


Figura 26 – Diagrama de forças para redução de campo magnético

Então, as equações abaixo são descritas:

$$F_{MSMA}^{(2,1)} - Kx = 0 \therefore F_{MSMA}^{(2,1)} - K\Delta l = 0 \therefore F_{MSMA}^{(2,1)} = K \cdot \varepsilon l \quad (29)$$

Baseando-se nas equações constitutivas do Modelo de Kiefer e Lagoudas para a reorientação  $2 \rightarrow 1$  e sabendo-se que  $\Delta S = 0$ , a tensão resultante do modelo polinomial é dada por:

$$\sigma = \frac{\pi^{\xi(2,1)} - \mu_0 M^{\text{sat}} H + C^p \xi + B_1^p + B_2^p}{\varepsilon^{r,\text{max}}} \quad (30)$$

Dessa forma, durante a transformação de fase, a expressão do recuo do sistema quando submetido a um campo magnético no modelo polinomial é:

$$A \cdot \frac{\pi^{\xi(2,1)} - \mu_0 M^{\text{sat}} H + C^p \xi + B_1^p + B_2^p}{\varepsilon^{r,\text{max}}} + K\varepsilon l = 0 \quad (31)$$

E para o modelo trigonométrico:

$$A \cdot \frac{\pi^{\xi(2,1)} - \mu_0 M^{\text{sat}} H + C^c \left[ \pi - \cos^{-1}(2\xi - 1) \right] + B_1^c + B_2^c}{\varepsilon^{r,\text{max}}} + K\varepsilon l = 0 \quad (32)$$

Onde os parâmetros A, B e C equivalem aos mesmos utilizados no modelo de Kiefer e Lagoudas.

### 4.3 Determinação dos Parâmetros do Modelo

Os parâmetros do modelo são obtidos pelo uso das relações específicas às quantidades mensuradas. As relações de Kiefer e Lagoudas foram derivadas pelo uso de expressões reduzidas para a força orientadora durante a reorientação para os modelos polinomial e trigonométrico. Analisando o modelo de Kiefer e Lagoudas, duas críticas importantes são observadas: a desmagnetização é desconsiderada e nem todos os parâmetros podem ser utilizados nos modelos de NiMnGa. Como no modelo de Kiefer e Lagoudas a calibração se baseia numa calibração experimental (curva  $H - \varepsilon$ ), para o modelo desenvolvido do atuador, embora também esteja sendo utilizada a liga NiMnGa, alguns parâmetros devem ser recalculados simulando o modelo no software LabView, por se tratar de outra calibração, diferente da utilizada. Portanto, no modelo desenvolvido somente as constantes do modelo de Kiefer e Lagoudas são usadas.

Seguem abaixo os parâmetros de entrada do modelo atuador típico desenvolvido com algumas constantes retiradas do modelo de Kiefer e Lagoudas:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 1,256 \mu\text{NA}^{-2}; \quad M^{\text{sat}} = 622 \text{ kAm}^{-1}; \quad \Delta S = 0 \text{ Pa}^{-1}; \quad K = \text{cte da mola}; \quad m = \text{massa do carrinho}; \\ l &= \text{comprim. da barra}; \quad A_t = \text{área transv. da barra}; \quad \pi = 3,14 \text{ rad} = 180^\circ; \quad H = \text{Campo Magnético} \\ \xi &= \text{fração volume}; \quad \sigma^* = -1, -2, -3, -4, -5 \text{ MPa}; \quad \sigma; \quad \varepsilon^{\text{r,max}}(\sigma^*); \\ H^{s(1,2)}(\sigma^*) &= 238,8 \text{ kA/m}; \quad H^{f(1,2)}(\sigma^*) = 1250,0 \text{ kA/m}; \quad H^{s(2,1)}(\sigma^*) = 398,0 \text{ kA/m} \\ H^{f(2,1)}(\sigma^*) &= 15,9 \text{ kA/m} \end{aligned}$$

Segue abaixo os parâmetros de saída para a simulação no software LabView:

$$A^p, B_1^p, B_2^p, C^p, Y^{\xi,p} \text{ Lagoudas}; \quad A^c, B_1^c, B_2^c, C^c, Y^{\xi,c} \text{ Lagoudas}; \quad \varepsilon^{\text{p fixo}}, \varepsilon^{\text{c fixo}}$$

Do modelo desenvolvido atuador típico com MSMA, seguem os parâmetros de saída variáveis:

$$Y^{\xi,p(1,2)}, Y^{\xi,p(2,1)}, Y^{\xi,c(1,2)}, Y^{\xi,c(2,1)}; \quad \varepsilon^{\text{p}(1,2)}, \varepsilon^{\text{p}(2,1)}, \varepsilon^{\text{c}(1,2)}, \varepsilon^{\text{c}(2,1)}$$



#### 4.4 Simulações no LabView do Modelo Constitutivo do atuador MSMA

Abaixo seguem as simulações realizadas e seus comentários:

##### 4.4.1 1ª Simulação: Cálculo da Corrente, Tensão, Potência e Energia dado um Valor para o Campo Magnético

Para simular o modelo do atuador de modo prático, utilizaremos um campo magnético de  $H=20\text{kA/m}$  a fim de obtermos uma corrente, tensão, potência e energia coerentes. Os valores utilizados neste exemplo são valores de referência retirados do artigo Suorsa J. Tellinen, et al (2004).

O comprimento da barra com material MSMA é  $l=200\text{mm}$ ,  
O comprimento da bobina é  $l_b=100\text{mm}=0,10\text{m}$ ,  
O número de espiras é  $N=5000$  espiras,  
A resistência utilizada é de  $R=159\Omega$ ,  
A indutância da bobina é  $L=6,98\text{H}$ .

Para calcular a corrente utiliza-se a fórmula:

$$H = \frac{Ni}{l_b} \therefore 20000 \text{ A/m} = \frac{5000 \text{ esp} \cdot i}{0,10\text{m}} \rightarrow i = \frac{20000 \cdot 0,10}{5000} \quad (33)$$

$$i = 0,4\text{A}$$

Para calcular a tensão utiliza-se a Lei de Ohm:

$$V = Ri \therefore V = 0,4\text{A} \cdot 159\Omega \quad (34)$$

$$V = 63,6\text{V}$$

Para calcular a potência perdida, dissipada utilizam-se as fórmulas:

$$\text{Pot}_{\text{fornecida}} = Vi \therefore P_{\text{forn}} = 63,6\text{V} \cdot 0,4\text{A} \quad (35)$$

$$P_{\text{forn}} = 25,44\text{W}$$

$$\text{Pot}_{\text{consumida}} = Ri^2 \therefore P_{\text{cons}} = 159\Omega \cdot 0,4^2 \text{ A} \quad (36)$$

$$P_{\text{cons}} = 25,44\text{W}$$

Para calcular a energia (trabalho) magnetomotriz que induz o movimento dos domínios:

$$E_{\text{mag}} = \frac{1}{2}Li^2 \therefore E_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \cdot 6,98\text{H} \cdot 0,4^2 \text{ A} \quad (37)$$

$$E_{\text{mag}} = 0,5584 \text{ J}$$

Em todas as simulações a seguir, o material MSMA foi submetido a um campo magnético crescente no valor de  $H = 0$  a  $1500 \text{ kA/m}$  e posteriormente, a amostra foi desmagnetizada aplicando o campo decrescente de  $H = 1500$  a  $0 \text{ kA/m}$ . Com a finalidade de simplificar a tabela dos arquivos gerados pelo simulador MSMA, foram retirados somente os valores de variação de campo magnético de 300 em  $300 \text{ kA/m}$ . Mesmo com esta simplificação, as tabelas geradas conseguem fornecer uma noção dos resultados obtidos. Para visualizar o campo negativo, é necessário aplicar uma corrente inversa na amostra NiMnGa. Esta simulação foi realizada e verificou-se que o comportamento do material é o mesmo, por isso em todos os gráficos gerados pelo programa desenvolvido, percebe-se uma simetria entre os lados positivo e negativo do eixo x.

No sistema com roldana e peso, ou seja, no sistema sem mola se convencionou o sentido das tensões envolvidas na direção do deslocamento, isto explica porque as tensões e forças mecânicas estão negativas no caso sem mola. Pela literatura, pode-se afirmar que a maioria dos atuadores MSMA é projetada para trabalhar sob efeito de compressão. No caso com mola, se convencionou que o sentido das forças está no sentido contrário ao deslocamento. Este fato ilustra porque as tensões e forças têm os valores positivos. Ambas referências estão corretas, entretanto para que não haja uma interpretação errônea dos resultados obtidos, as tensões e forças serão referenciadas em módulo.

A próxima simulação de número dois foi realizada para o modelo com peso e roldana, mais conhecido como modelo sem mola ou  $k = 0$ . Foram utilizados cinco pesos que geram cinco forças fixas com valores diferentes.

#### **4.4.2 2ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Sem Mola**

Aumenta-se o campo magnético para demonstrar o avanço da massa de  $H = 0$  a  $1500 \text{ kA/m}$  e, posteriormente, diminui-se o mesmo de  $H = 1500$  a  $0 \text{ kA/m}$  a fim de visualizar o retorno do material MSMA. Utilizam-se a área transversal  $A_t = 48 \text{ mm}^2$ , comprimento da barra  $l = 200 \text{ mm}$  e constante da mola nula porque o sistema é sem mola  $k = 0$ . São geradas as tensões constantes nos valores de  $\sigma = -1, -2, -3, -4, -5 \text{ MPa}$ . Percebe-se que quanto menor a tensão, maior é a deformação e conseqüentemente o deslocamento da massa. Vale ressaltar que pelo artigo de Kiefer e Lagoudas a máxima deformação que a massa pode chegar é da

ordem de  $\varepsilon = 2\%$ , ou seja, o deslocamento máximo é de aproximadamente  $l = 4\text{mm}$ . Para cada tensão compressiva, nota-se que a força é constante, isto ocorre em virtude da fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Seguem as tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 do material MSMA sem mola  $k = 0$  para os modelos polinomial e trigonométrico:

Tabela 5 – Sistema Sem Mola com  $k = 0$  para Tensão  $\sigma = -1\text{MPa}$

Força (N)	Deslocamento trig. u (mm)	Deformação trig. $\varepsilon$ (.)	Deslocamento polin. u (mm)	Deformação polin. $\varepsilon$ (.)	Tensão $\sigma$ (MPa)	Campo Magnético H (kA/m)
-48	0,255755	0,000187	0,037459	0,001279	-1	300
-48	1,530281	0,006052	1,210353	0,007651	-1	600
-48	2,804806	0,015702	3,140495	0,014024	-1	900
-48	4,079332	0,021345	4,269095	0,020397	-1	1200
-48	4,296002	0,02148	4,296002	0,02148	-1	1500
-48	4,296002	0,02148	4,296002	0,02148	-1	1200
-48	4,296002	0,02148	4,296002	0,02148	-1	900
-48	4,296002	0,02148	4,296002	0,02148	-1	600
-48	3,205418	0,018242	3,648336	0,016027	-1	300

Tabela 6 – Sistema com  $k = 0$  para  $\sigma = -2\text{MPa}$

Força (N)	Deslocamento trig. u (mm)	Deformação trig. $\varepsilon$ (.)	Deslocamento polin. u (mm)	Deformação polin. $\varepsilon$ (.)	Tensão $\sigma$ (MPa)	Campo Magnético H (kA/m)
-96	0,22292	0,000163	0,03265	0,001115	-2	300
-96	1,333819	0,005275	1,054965	0,006669	-2	600
-96	2,444718	0,013687	2,73731	0,012224	-2	900
-96	3,555617	0,018605	3,721017	0,017778	-2	1200
-96	3,744469	0,018722	3,744469	0,018722	-2	1500
-96	3,744469	0,018722	3,744469	0,018722	-2	1200
-96	3,744469	0,018722	3,744469	0,018722	-2	900
-96	3,744469	0,018722	3,744469	0,018722	-2	600
-96	2,793898	0,0159	3,179953	0,013969	-2	300

Tabela 7 – Sistema com  $k = 0$  para  $\sigma = -3\text{MPa}$ 

Força (N)	Deslocamento trig. u (mm)	Deformação trig. $\epsilon$ (.)	Deslocamento polin. u (mm)	Deformação polin. $\epsilon$ (.)	Tensão $\sigma$ (MPa)	Campo Magnético H (kA/m)
-144	0,158359	0,000116	0,023194	0,000792	-3	300
-144	0,947523	0,003747	0,74943	0,004738	-3	600
-144	1,736688	0,009723	1,94454	0,008683	-3	900
-144	2,525852	0,013217	2,64335	0,012629	-3	1200
-144	2,66001	0,0133	2,66001	0,0133	-3	1500
-144	2,66001	0,0133	2,66001	0,0133	-3	1200
-144	2,66001	0,0133	2,66001	0,0133	-3	900
-144	2,66001	0,0133	2,66001	0,0133	-3	600
-144	1,98474	0,011295	2,258987	0,009924	-3	300

Tabela 8 – Sistema com  $k = 0$  para  $\sigma = -4\text{MPa}$ 

Força (N)	Deslocamento trig. u (mm)	Deformação trig. $\epsilon$ (.)	Deslocamento polin. u (mm)	Deformação polin. $\epsilon$ (.)	Tensão $\sigma$ (MPa)	Campo Magnético H (kA/m)
-192	0,091448	0,000067	0,013394	0,000457	-4	300
-192	0,547171	0,002164	0,432777	0,002736	-4	600
-192	1,002893	0,005615	1,122923	0,005014	-4	900
-192	1,458616	0,007632	1,526468	0,007293	-4	1200
-192	1,536089	0,00768	1,536089	0,00768	-4	1500
-192	1,536089	0,00768	1,536089	0,00768	-4	1200
-192	1,536089	0,00768	1,536089	0,00768	-4	900
-192	1,536089	0,00768	1,536089	0,00768	-4	600
-192	1,146137	0,006523	1,304508	0,005731	-4	300

Tabela 9 – Sistema com  $k = 0$  para  $\sigma = -5\text{MPa}$ 

Força (N)	Deslocamento trig. u (mm)	Deformação trig. $\epsilon$ (.)	Deslocamento polin. u (mm)	Deformação polin. $\epsilon$ (.)	Tensão $\sigma$ (MPa)	Campo Magnético H (kA/m)
-240	0,040484	0,00003	0,005929	0,000202	-5	300
-240	0,242232	0,000958	0,19159	0,001211	-5	600
-240	0,44398	0,002486	0,497117	0,00222	-5	900
-240	0,645728	0,003379	0,675766	0,003229	-5	1200
-240	0,680025	0,0034	0,680025	0,0034	-5	1500
-240	0,680025	0,0034	0,680025	0,0034	-5	1200
-240	0,680025	0,0034	0,680025	0,0034	-5	900
-240	0,680025	0,0034	0,680025	0,0034	-5	600
-240	0,507394	0,002888	0,577504	0,002537	-5	300

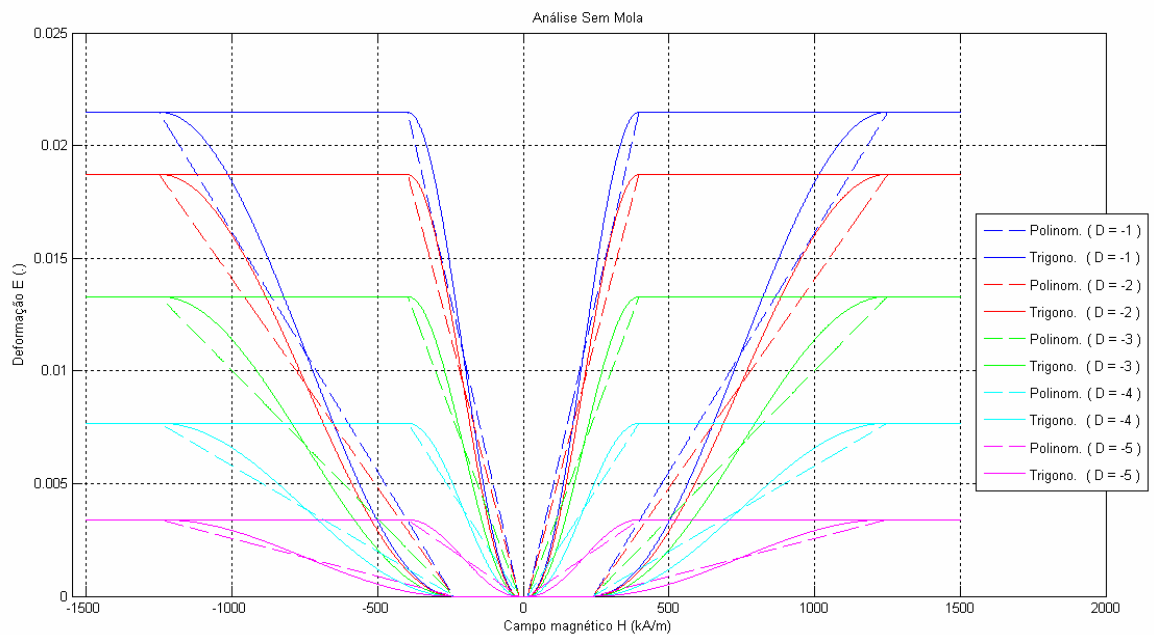


Figura 27 – Gráfico Campo Magnético H (kA/m) x Deformação  $\epsilon$ (.) do Sistema Sem Mola ( $k = 0$ ) para os Modelos Polinomial e Trigonométrico para as tensões  $\sigma = -5, -4, -3, -2, -1$ MPa

O gráfico da figura 27 demonstra a relação diretamente proporcional entre o campo magnético e a deformação da barra com MSMA. Desta forma, na medida em que se aumenta o campo magnético sobre o material MSMA aumentará sua deformação. No lado negativo do gráfico observa-se que ao diminuir o campo magnético aumenta-se a deformação. Analisando as várias tensões (D) empregadas no sistema, percebe-se que quanto maior a tensão em módulo, menor será a deformação. A leitura dessas tensões é feita em módulo, ou seja, sempre como valores positivos. Baseado na literatura dos materiais com memória de forma magnéticos de Kiefer e Lagoudas, o gráfico da figura 27 foi gerado a partir do programa desenvolvido no software Labview onde foi utilizada uma constante de mola com valor nulo, ou seja,  $k = 0$ . Constata-se que o gráfico obtido na figura 27 é idêntico ao desenvolvido no artigo de Kiefer e Lagoudas, comprovando a eficácia do programa desenvolvido.

Para melhor visualização a figura 28 mostra a análise em 3D do Sistema Sem Mola com  $k = 0$  nos modelos polinomial e trigonométrico.

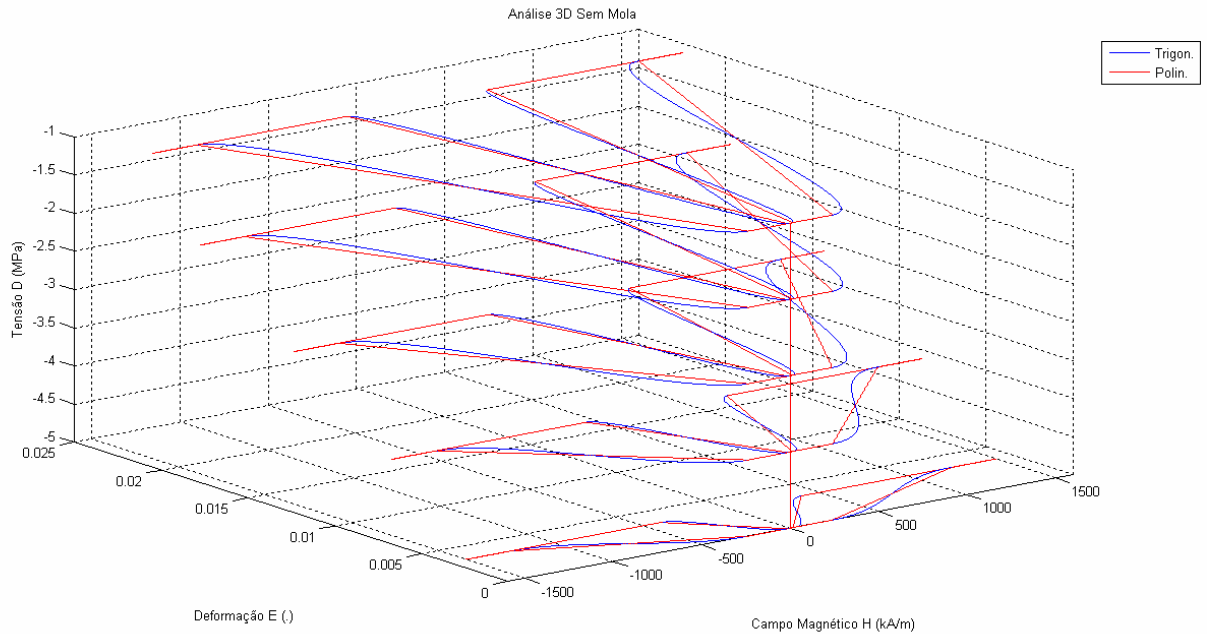


Figura 28 – Gráfico em 3D com eixos  $H$ (kA/m) x  $\epsilon$ (.) x  $\sigma$ (MPa) do Sistema Sem Mola ( $k = 0$ )

#### 4.4.3 3ª Simulação: Aumento do Campo Magnético sem Mola e com Mola até Alcançar a Saturação do Material MSMA

O valor do campo magnético necessário para que o material MSMA chegue ao seu limiar de saturação, ou seja, a partir deste momento não há mais deformação no material é de aproximadamente  $H = 1250$  kA/m.

A partir da quarta simulação em diante, há uma mudança do sistema mecânico com roldana e peso (sem mola) para o sistema que utiliza uma mola operando em compressão. Neste sistema com mola são variadas quatro constantes de mola nos valores de  $k = 10, 25, 50$  e  $100$ . Além disso, é verificado que a tensão não é constante, ou seja, a tensão varia de forma proporcional com o deslocamento da massa e a constante da mola.

#### **4.4.4 4ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Com Mola com $k = 10$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico**

Aumenta-se o campo magnético para demonstrar o avanço da massa de  $H = 0$  a  $1500\text{kA/m}$  e, posteriormente, diminui-se o mesmo de  $H = 1500$  a  $0\text{kA/m}$  a fim de visualizar o retorno do material MSMA. Utilizam-se a área transversal  $A_t = 48\text{mm}^2$ , comprimento da barra  $l = 200\text{mm}$  e constante da mola  $k = 10$ . Segue a tabela 10 do material MSMA com mola  $k = 10$  para os modelos polinomial e trigonométrico. Nesta tabela 10 estão representados os valores da força da mola, deslocamento, deformação, tensão compressiva, que está com seu valor em módulo e campo magnético. Foram realizadas cinco simulações seguidas.

Em todos os sistemas percebe-se que o deslocamento é proporcional a força mecânica da mola, este fenômeno se deve a fórmula  $F = Kx$ .

Tabela 10 – Sistema Com Mola k = 10

Força trig. (N)	u (mm) trig.	Deformação trig. $\epsilon$ (.)	$\sigma$ (MPa) trig.	Força polin. (N)	u (mm) polin.	Deformação polin. $\epsilon$ (.)	$\sigma$ (MPa) polin.	H (kA/m)
2,6802	0,26802	0,000206	0,055837	0,411262	0,041126	0,00134	0,008568	300
15,4255	1,542546	0,006139	0,321364	12,277242	1,227724	0,007713	0,255776	600
28,1707	2,817072	0,015788	0,58689	31,575407	3,157541	0,014085	0,657821	900
40,916	4,091597	0,02136	0,852416	42,720494	4,272049	0,020458	0,89001	1200
43,0827	4,308267	0,02148	0,897556	42,959152	4,295915	0,021541	0,894982	1500
43,0827	4,308267	0,02148	0,897556	42,959152	4,295915	0,021541	0,894982	1200
43,0827	4,308267	0,02148	0,897556	42,959152	4,295915	0,021541	0,894982	900
43,0827	4,308267	0,02148	0,897556	42,959152	4,295915	0,021541	0,894982	600
32,3788	3,237876	0,018422	0,674558	36,843967	3,684397	0,016189	0,767583	300
3,31178	0,331178	0,000359	0,068995	0,718086	0,071809	0,001656	0,01496	300
14,4208	1,442077	0,006056	0,300433	12,11117	1,211117	0,00721	0,252316	600
25,5298	2,552976	0,014422	0,53187	28,843463	2,884346	0,012765	0,600905	900
36,6387	3,663874	0,018701	0,763307	37,401908	3,740191	0,018319	0,779206	1200
38,5273	3,852727	0,018684	0,802651	37,367521	3,736752	0,019264	0,77849	1500
38,5273	3,852727	0,018684	0,802651	37,367521	3,736752	0,019264	0,77849	1200
38,5273	3,852727	0,018684	0,802651	37,367521	3,736752	0,019264	0,77849	900
38,5273	3,852727	0,018684	0,802651	37,367521	3,736752	0,019264	0,77849	600
30,8039	3,080393	0,017307	0,641749	34,613164	3,461316	0,015402	0,721108	300
2,67892	0,267892	0,00033	0,055811	0,660163	0,066016	0,001339	0,013753	300
10,5706	1,057057	0,004543	0,22022	9,086461	0,908646	0,005285	0,189301	600
18,4622	1,846221	0,010458	0,384629	20,91567	2,091567	0,009231	0,435743	900
26,3539	2,635386	0,013297	0,549039	26,59448	2,659448	0,013177	0,554052	1200
27,6954	2,769544	0,013244	0,576988	26,488971	2,648897	0,013848	0,551854	1500
27,6954	2,769544	0,013244	0,576988	26,488971	2,648897	0,013848	0,551854	1200
27,6954	2,769544	0,013244	0,576988	26,488971	2,648897	0,013848	0,551854	900
27,6954	2,769544	0,013244	0,576988	26,488971	2,648897	0,013848	0,551854	600
22,7461	2,274611	0,012623	0,473877	25,245955	2,524596	0,011373	0,525957	300
1,46406	0,146406	0,000171	0,030501	0,34174	0,034174	0,000732	0,00712	300
6,02129	0,602129	0,002562	0,125444	5,123976	0,512398	0,003011	0,10675	600
10,5785	1,057851	0,005985	0,220386	11,970824	1,197082	0,005289	0,249392	900
15,1357	1,513574	0,007676	0,315328	15,352745	1,535275	0,007568	0,319849	1200
15,9105	1,591047	0,007656	0,331468	15,312421	1,531242	0,007955	0,319009	1500
15,9105	1,591047	0,007656	0,331468	15,312421	1,531242	0,007955	0,319009	1200
15,9105	1,591047	0,007656	0,331468	15,312421	1,531242	0,007955	0,319009	900
15,9105	1,591047	0,007656	0,331468	15,312421	1,531242	0,007955	0,319009	600
12,9158	1,291579	0,00721	0,269079	14,420415	1,442042	0,006458	0,300425	300
0,54704	0,054704	0,000054	0,011397	0,108003	0,0108	0,000274	0,00225	300
2,56452	0,256452	0,00106	0,053427	2,119913	0,211991	0,001282	0,044165	600
4,582	0,4582	0,002583	0,095458	5,165727	0,516573	0,002291	0,107619	900
6,59948	0,659948	0,003393	0,137489	6,785634	0,678563	0,0033	0,141367	1200
6,94245	0,694245	0,003396	0,144634	6,792916	0,679292	0,003471	0,141519	1500
6,94245	0,694245	0,003396	0,144634	6,792916	0,679292	0,003471	0,141519	1200
6,94245	0,694245	0,003396	0,144634	6,792916	0,679292	0,003471	0,141519	900
6,94245	0,694245	0,003396	0,144634	6,792916	0,679292	0,003471	0,141519	600
5,45025	0,545025	0,00308	0,113547	6,160133	0,616013	0,002725	0,128336	300



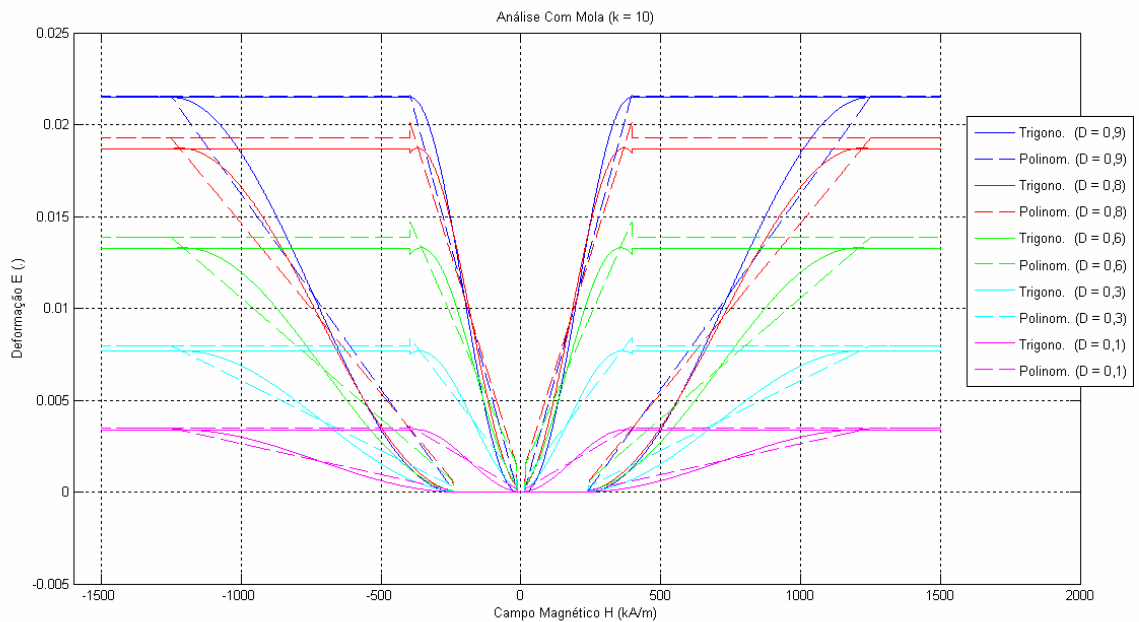


Figura 29 – Gráfico Campo Magnético H (kA/m) x Deformação  $\varepsilon(.)$  do Sistema Com Mola  $k = 10$  para os Modelos Polinomial e Trigonômétrico e tensões aproximadas  $\sigma = 0,9; 0,8; 0,6; 0,3$  e  $0,1$ MPa

No gráfico da figura 29 é utilizada uma mola cuja constante tem valor de  $k = 10$ . Comparando-se  $k = 0$  e  $k = 10$  as diferenças existentes são pequenas. Os gráficos são praticamente semelhantes com valores bem próximos. Retirando os valores das tabelas 5 e 10 para o modelo trigonométrico com campo magnético no valor de  $H = 1200$  kA/m, percebe-se a semelhança nos resultados:

$$k = 0, \sigma = 1 \text{MPa}, F = 48 \text{N}, u = 4,08 \text{mm}, \varepsilon = 0,02$$

$$k = 10, \sigma = 0,9 \text{MPa}, F = 41 \text{N}, u = 4,09 \text{mm}, \varepsilon = 0,02$$

Em  $k = 10$  nota-se que à medida em que as tensões aumentam, as forças também aumentam. As tensões geradas não são constantes, embora fiquem durante um período longo do valor de campo magnético estagnadas. Por isso, mesmo as tensões não sendo constantes, estas foram consideradas fixas num determinado momento de campo nos valores de  $\sigma = 0,1; 0,3; 0,6; 0,8$  e  $0,9$  MPa. Embora essas tensões não sejam equivalentes àquelas

empregadas com  $k = 0$ , nos valores de  $\sigma = 1, 2, 3, 4$  e  $5$  MPa, percebe-se que os resultados são próximos.

Para melhor visualização a figura 30 mostra a análise em 3D do Sistema Com Mola para  $k = 10$  nos modelos polinomial e trigonométrico.

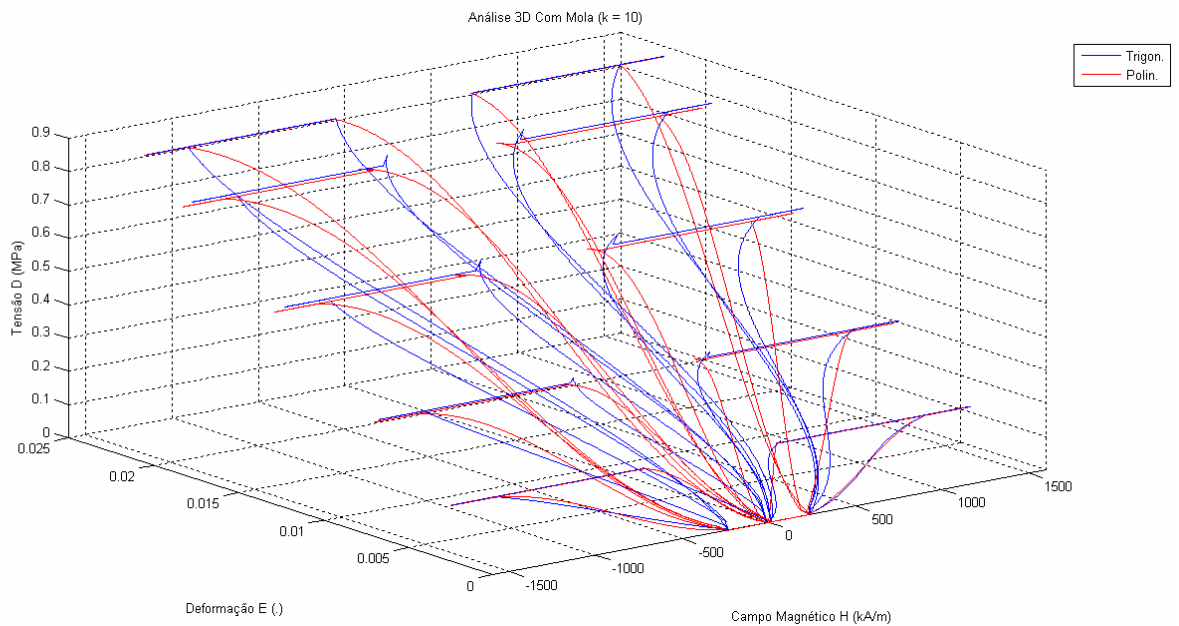


Figura 30 – Gráfico em 3D com eixos  $H(\text{kA/m}) \times \epsilon(.) \times \sigma(\text{MPa})$  do Sistema Com Mola  $k = 10$

#### 4.4.5 5ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Com Mola com $k = 25$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico

Aumenta-se o campo magnético para demonstrar o avanço da massa de  $H = 0$  a  $1500 \text{ kA/m}$  e, posteriormente, diminui-se o mesmo de  $H = 1500$  a  $0 \text{ kA/m}$  a fim de visualizar o retorno do material MSMA. Utilizam-se a área transversal  $A_t = 48 \text{ mm}^2$ , comprimento da barra  $l = 200 \text{ mm}$  e constante da mola  $k = 25$ . Segue a tabela 11 do material MSMA com mola  $k = 25$  para os modelos polinomial e trigonométrico. Nesta tabela 11 estão representados os valores da força da mola, deslocamento, deformação, tensão compressiva, que está com seu valor em módulo e campo magnético. Foram realizadas cinco simulações seguidas.

Observando a tabela 11 e comparando os resultados obtidos entre  $k = 10$  e  $k = 25$ , verifica-se um aumento substancial das tensões e das forças em  $k = 25$  para se obter o mesmo deslocamento de  $u = 4\text{mm}$ . Ou seja, com  $k = 25$  a energia produzida pelo fenômeno magnético é suficiente para causar a mesma deformação na barra MSMA e conseqüentemente para atingir o mesmo deslocamento, entretanto com tensões e forças de maiores intensidades. Como conclusão pode-se afirmar que o atuador MSMA tem energia suficiente para realizar o mesmo trabalho. Retirando os valores da tabelas 10 e 11 para o modelo trigonométrico e campo magnético máximo no valor de  $H = 1500\text{kA/m}$ , com relação ao deslocamento e deformação conferidos, têm se que para  $k = 10$ ,  $u = 4,3\text{mm}$  e  $\varepsilon = 0,02$  e para  $k = 25$ ,  $u = 4,2\text{mm}$  e  $\varepsilon = 0,02$ , existe uma pequena variação quase que desprezível. Considerando a tensão  $\sigma = -2\text{MPa}$  para o modelo trigonométrico e comparando as tabelas 6 e 11 com  $H = 1200\text{kA/m}$  para os experimentos sem e com mola,  $k = 0$  e  $k = 25$ , percebe-se que os valores de força, deslocamento e deformação são bem próximos, havendo pequenas diferenças quase que imperceptíveis, tornando os comportamentos semelhantes:

$$k = 0, \sigma = 2\text{MPa}, F = 96\text{N}, u = 3,56\text{mm}, \varepsilon = 0,02$$

$$k = 25, \sigma = 2,2\text{MPa}, F = 98\text{N}, u = 3,93\text{mm}, \varepsilon = 0,02$$

Tabela 11 – Sistema Com Mola para k = 25

Força trig. (N)	u (mm) trig.	Deformação trig. $\epsilon$ (.)	$\sigma$ (MPa) trig.	Força polin. (N)	u (mm) polin.	Deformação polin. $\epsilon$ (.)	$\sigma$ (MPa) polin.	H (kA/m)
2,780044	0,111202	0,000035	0,057918	0,17746	0,007098	0,000556	0,003697	300
34,64319	1,385728	0,005058	0,721733	25,292	1,01168	0,006929	0,526917	600
66,50634	2,660253	0,01467	1,385549	73,34895	2,933958	0,013301	1,528103	900
98,36948	3,934779	0,021107	2,049364	105,5374	4,221494	0,019674	2,198695	1200
103,7862	4,151449	0,02142	2,162213	107,1003	4,284011	0,020757	2,231256	1500
103,7862	4,151449	0,02142	2,162213	107,1003	4,284011	0,020757	2,231256	1200
103,7862	4,151449	0,02142	2,162213	107,1003	4,284011	0,020757	2,231256	900
103,7862	4,151449	0,02142	2,162213	107,1003	4,284011	0,020757	2,231256	600
70,57171	2,822868	0,015828	1,470244	79,13922	3,165569	0,014114	1,648734	300
5,683395	0,227336	0,00017	0,118404	0,848805	0,033952	0,001137	0,017683	300
33,45586	1,338235	0,005306	0,696997	26,53026	1,061211	0,006691	0,552714	600
61,22833	2,449133	0,013717	1,27559	68,58637	2,743455	0,012246	1,428883	900
89,0008	3,560032	0,01861	1,854183	93,05247	3,722099	0,0178	1,938593	1200
93,72212	3,748885	0,018722	1,952544	93,61142	3,744457	0,018744	1,950238	1500
93,72212	3,748885	0,018722	1,952544	93,61142	3,744457	0,018744	1,950238	1200
93,72212	3,748885	0,018722	1,952544	93,61142	3,744457	0,018744	1,950238	900
93,72212	3,748885	0,018722	1,952544	93,61142	3,744457	0,018744	1,950238	600
70,13957	2,805583	0,015965	1,461241	79,82562	3,193025	0,014028	1,663034	300
5,766643	0,230666	0,000245	0,120138	1,226238	0,04905	0,001153	0,025547	300
25,49576	1,01983	0,004268	0,531162	21,3402	0,853608	0,005099	0,444587	600
45,22487	1,808995	0,010215	0,942185	51,07266	2,042906	0,009045	1,064014	900
64,95398	2,598159	0,013282	1,353208	66,41159	2,656463	0,012991	1,383575	1200
68,30793	2,732317	0,013276	1,423082	66,37909	2,655164	0,013662	1,382898	1500
68,30793	2,732317	0,013276	1,423082	66,37909	2,655164	0,013662	1,382898	1200
68,30793	2,732317	0,013276	1,423082	66,37909	2,655164	0,013662	1,382898	900
68,30793	2,732317	0,013276	1,423082	66,37909	2,655164	0,013662	1,382898	600
54,40235	2,176094	0,012243	1,133382	61,21601	2,448641	0,01088	1,275334	300
3,480936	0,139237	0,000155	0,07252	0,773284	0,030931	0,000696	0,01611	300
14,874	0,59496	0,002509	0,309875	12,54517	0,501807	0,002975	0,261358	600
26,26706	1,050682	0,005938	0,54723	29,69241	1,187697	0,005253	0,618592	900
37,66012	1,506405	0,007673	0,784586	38,36684	1,534674	0,007532	0,799309	1200
39,59694	1,583878	0,007662	0,824936	38,31058	1,532423	0,007919	0,798137	1500
39,59694	1,583878	0,007662	0,824936	38,31058	1,532423	0,007919	0,798137	1200
39,59694	1,583878	0,007662	0,824936	38,31058	1,532423	0,007919	0,798137	900
39,59694	1,583878	0,007662	0,824936	38,31058	1,532423	0,007919	0,798137	600
31,81518	1,272607	0,007136	0,662816	35,68122	1,427249	0,006363	0,743359	300
1,352044	0,054082	0,000053	0,028168	0,263935	0,010557	0,00027	0,005499	300
6,395742	0,25583	0,001055	0,133245	5,277169	0,211087	0,001279	0,109941	600
11,43944	0,457578	0,002579	0,238322	12,89343	0,515737	0,002288	0,268613	900
16,48314	0,659326	0,003392	0,343399	16,96179	0,678472	0,003297	0,353371	1200
17,34057	0,693623	0,003397	0,361262	16,98386	0,679354	0,003468	0,35383	1500
17,34057	0,693623	0,003397	0,361262	16,98386	0,679354	0,003468	0,35383	1200
17,34057	0,693623	0,003397	0,361262	16,98386	0,679354	0,003468	0,35383	900
17,34057	0,693623	0,003397	0,361262	16,98386	0,679354	0,003468	0,35383	600
13,58448	0,543379	0,003072	0,28301	15,36238	0,614495	0,002717	0,32005	300

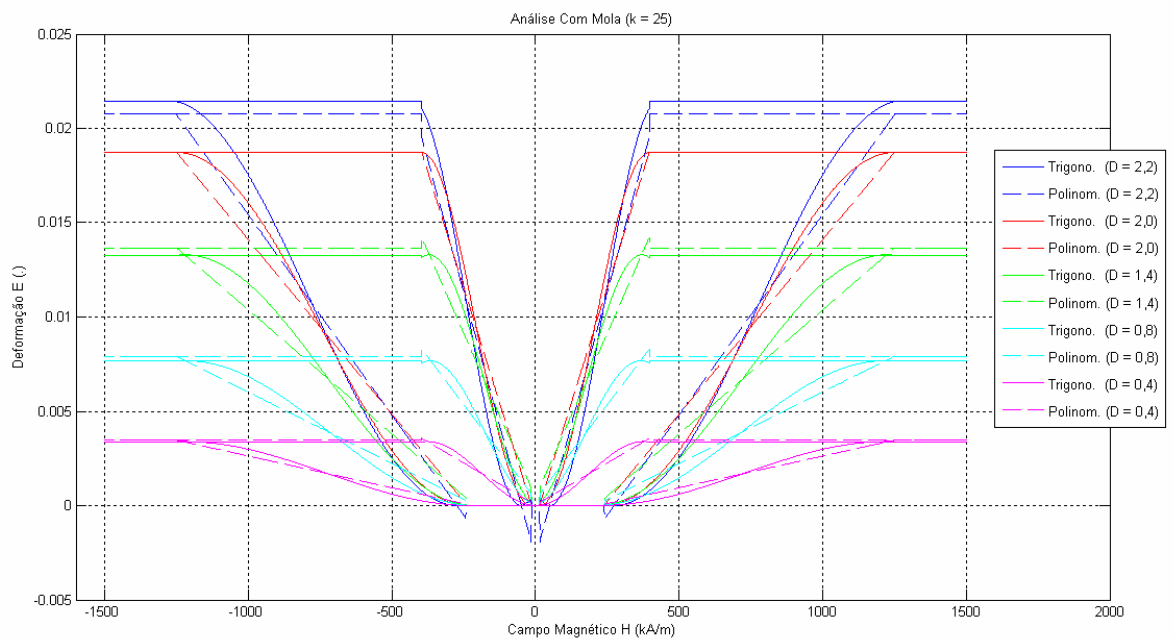


Figura 31 – Gráfico Campo Magnético H (kA/m) x Deformação  $\varepsilon(\cdot)$  do Sistema Com Mola  $k = 25$  para os Modelos Polinomial e Trigonométrico e tensões aproximadas  $\sigma = 2,2; 2,0; 1,4; 0,8$  e  $0,4$ MPa

Realizando simulações com constantes da mola  $k > 10$ , ocorrem deformações visíveis no gráfico da figura 31 que se distanciam do padrão obtido. Nota-se no gráfico da figura 31 um efeito que aparece no retorno do processo de desmagnetização da amostra. Com a constante da mola  $k = 25$ , este efeito é apresentado somente pelo modelo polinomial e consiste num pico negativo não muito significativo durante a volta do material MSMA. Com esta informação pode-se afirmar que o modelo trigonométrico trabalha melhor que o polinomial. Este efeito começa a aparecer com maior intensidade para constantes de mola maiores que 25 ( $k > 25$ ) em ambos os modelos polinomial e trigonométrico. Mas, no caso trigonométrico o pico é positivo e no polinomial é negativo de mesma intensidade. O aumento desse efeito ocasiona os seguintes comportamentos na resposta do sistema: conforme se aumentam a tensão e a força devido a uma constante de mola muito elevada se amplifica a geração desse pico e conseqüentemente a deformação máxima alcançada com um campo magnético máximo é menor quanto maior for esse efeito do pico. Isto é, conforme o

pico aumenta de amplitude, a deformação e o deslocamento máximos reduzem de intensidade. Verifica-se também que o aumento da constante de mola gera um aumento na tensão e na força mecânica de forma que se busque uma constante de mola efetiva que juntamente com o campo magnético máximo aplicado consiga-se alcançar o deslocamento máximo desejado, em torno de 4mm.

Analisando o experimento com as constantes de mola até então aplicadas para o modelo trigonométrico, nota-se que a constante efetiva é em torno de  $k_{\text{efetivo}} = 25$ , uma vez que neste modelo não há a presença do pico e que  $k = 10$  é a ideal.

Para melhor visualização a figura 32 mostra a análise em 3D do Sistema Com Mola para  $k = 25$  nos modelos polinomial e trigonométrico.

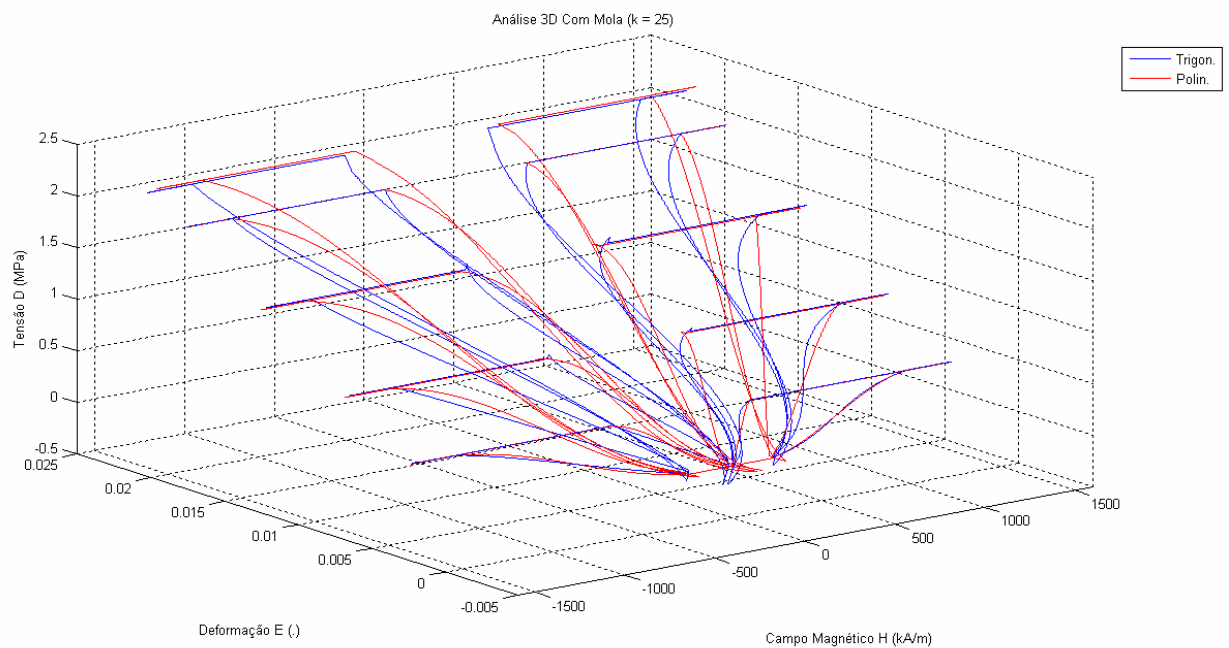


Figura 32 – Gráfico em 3D com eixos  $H(\text{kA/m}) \times \epsilon(\cdot) \times \sigma(\text{MPa})$  do Sistema Com Mola  $k = 25$

#### **4.4.6 6ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Com Mola com $k = 50$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico**

Aumenta-se o campo magnético para demonstrar o avanço da massa de  $H = 0$  a  $1500\text{kA/m}$  e, posteriormente, diminui-se o mesmo de  $H = 1500$  a  $0\text{kA/m}$  a fim de visualizar o retorno do material MSMA. Utilizam-se a área transversal  $A_t = 48\text{mm}^2$ , comprimento da barra  $l = 200\text{mm}$  e constante da mola  $k = 50$ . Segue a tabela 12 do material MSMA com mola  $k = 50$  para os modelos polinomial e trigonométrico. Nesta tabela 12 estão representados os valores da força da mola, deslocamento, deformação, tensão compressiva, que está com seu valor em módulo e campo magnético. Foram realizadas cinco simulações seguidas. Vale ressaltar que as tensões não são constantes, entretanto ao submeter a barra MSMA num determinado período de valores de campo magnético entre  $H = 1250$  a  $400\text{kA/m}$  as tensões estão fixas.

Tabela 12 – Sistema Com Mola para k = 50

Força trig. (N)	u (mm) trig.	Deformação trig. $\epsilon$ (.)	$\sigma$ (MPa) trig.	Força polin. (N)	u (mm) polin.	Deformação polin. $\epsilon$ (.)	$\sigma$ (MPa) polin.	H (kA/m)
-7,508088	-0,150162	0,000065	-0,156419	0,646886	0,012938	-0,000751	0,013477	300
56,2182	1,124364	0,00343	1,171213	34,304609	0,686092	0,005622	0,714679	600
119,9445	2,39889	0,012699	2,498844	126,994456	2,539889	0,011994	2,645718	900
183,6708	3,673416	0,020386	3,826475	203,859786	4,077196	0,018367	4,247079	1200
194,5043	3,890085	0,02101	4,052172	210,103005	4,20206	0,01945	4,377146	1500
194,5043	3,890085	0,02101	4,052172	210,103005	4,20206	0,01945	4,377146	1200
194,5043	3,890085	0,02101	4,052172	210,103005	4,20206	0,01945	4,377146	900
194,5043	3,890085	0,02101	4,052172	210,103005	4,20206	0,01945	4,377146	600
106,5594	2,131189	0,010608	2,219988	106,079652	2,121593	0,010656	2,209993	300
2,713275	0,054265	0,00001	0,056527	0,097005	0,00194	0,000271	0,002021	300
58,25821	1,165164	0,004128	1,213713	41,278927	0,825579	0,005826	0,859978	600
113,8032	2,276063	0,012473	2,370899	124,725007	2,4945	0,01138	2,598438	900
169,3481	3,386962	0,018304	3,528085	183,043902	3,660878	0,016935	3,813415	1200
178,7907	3,575815	0,018629	3,724807	186,287867	3,725757	0,017879	3,880997	1500
178,7907	3,575815	0,018629	3,724807	186,287867	3,725757	0,017879	3,880997	1200
178,7907	3,575815	0,018629	3,724807	186,287867	3,725757	0,017879	3,880997	900
178,7907	3,575815	0,018629	3,724807	186,287867	3,725757	0,017879	3,880997	600
117,3782	2,347565	0,012996	2,44538	129,962336	2,599247	0,011738	2,707549	300
8,431072	0,168621	0,000131	0,175647	1,314366	0,026287	0,000843	0,027383	300
47,8893	0,957786	0,00382	0,997694	38,198774	0,763975	0,004789	0,795808	600
87,34752	1,74695	0,009794	1,81974	97,939561	1,958791	0,008735	2,040408	900
126,8057	2,536115	0,013229	2,641786	132,289861	2,645797	0,012681	2,756039	1200
133,5136	2,670273	0,0133	2,781534	132,995637	2,659913	0,013351	2,770742	1500
133,5136	2,670273	0,0133	2,781534	132,995637	2,659913	0,013351	2,770742	1200
133,5136	2,670273	0,0133	2,781534	132,995637	2,659913	0,013351	2,770742	900
133,5136	2,670273	0,0133	2,781534	132,995637	2,659913	0,013351	2,770742	600
100,5949	2,011898	0,011445	2,095727	114,45166	2,289033	0,010059	2,38441	300
6,364465	0,127289	0,000129	0,132593	1,293967	0,025879	0,000636	0,026958	300
29,15059	0,583012	0,002421	0,607304	24,214178	0,484284	0,002915	0,504462	600
51,93672	1,038734	0,005859	1,082015	58,592697	1,171854	0,005194	1,220681	900
74,72284	1,494457	0,007667	1,556726	76,665314	1,533306	0,007472	1,597194	1200
78,59648	1,57193	0,00767	1,637427	76,701308	1,534026	0,00786	1,597944	1500
78,59648	1,57193	0,00767	1,637427	76,701308	1,534026	0,00786	1,597944	1200
78,59648	1,57193	0,00767	1,637427	76,701308	1,534026	0,00786	1,597944	900
78,59648	1,57193	0,00767	1,637427	76,701308	1,534026	0,00786	1,597944	600
62,04937	1,240987	0,007002	1,292695	70,020017	1,4004	0,006205	1,45875	300
2,652257	0,053045	0,000051	0,055255	0,507927	0,010159	0,000265	0,010582	300
12,73965	0,254793	0,001048	0,265409	10,479075	0,209581	0,001274	0,218314	600
22,82705	0,456541	0,002572	0,475564	25,717049	0,514341	0,002283	0,535772	900
32,91445	0,658289	0,003392	0,685718	33,915609	0,678312	0,003291	0,706575	1200
34,6293	0,692586	0,003397	0,721444	33,972634	0,679453	0,003463	0,707763	1500
34,6293	0,692586	0,003397	0,721444	33,972634	0,679453	0,003463	0,707763	1200
34,6293	0,692586	0,003397	0,721444	33,972634	0,679453	0,003463	0,707763	900
34,6293	0,692586	0,003397	0,721444	33,972634	0,679453	0,003463	0,707763	600
27,03178	0,540636	0,00306	0,563162	30,596506	0,611193	0,002703	0,637427	300



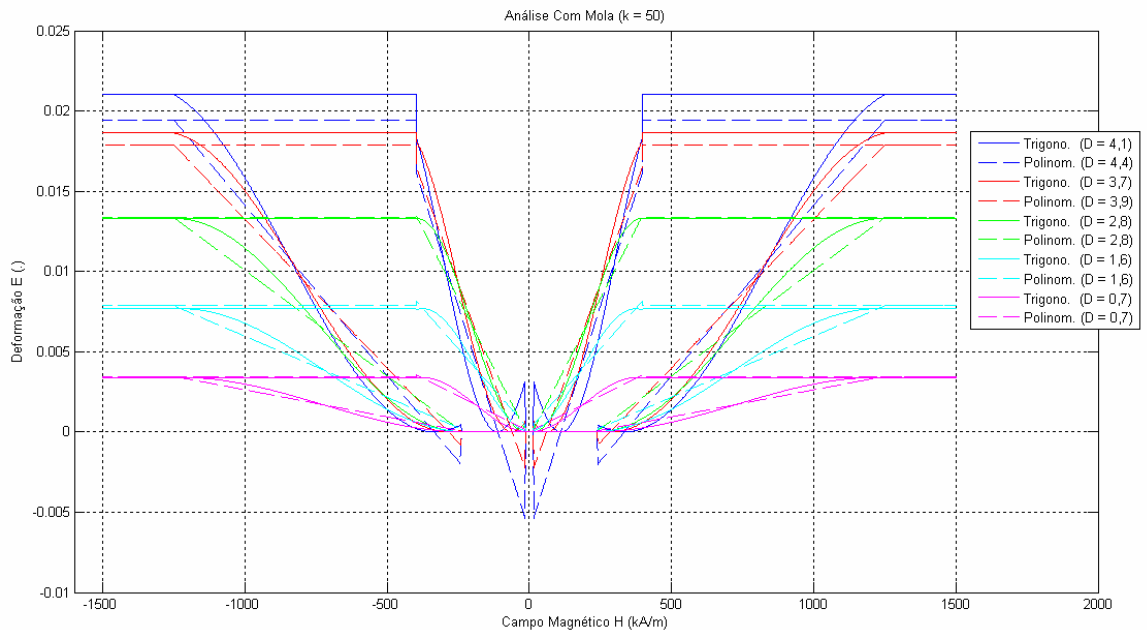


Figura 33 – Gráfico Campo Magnético H (kA/m) x Deformação  $\varepsilon(.)$  do Sistema Com Mola  $k = 50$  para os Modelos Polinomial e Trigonométrico e tensões aproximadas  $\sigma = 4,1; 3,7; 2,8; 1,6$  e  $0,7$ MPa

No caso em que a constante da mola é igual a  $k = 50$  nota-se no gráfico da figura 33 que há um aumento expressivo nos valores das tensões e das forças e conseqüentemente verifica-se um aumento do efeito mencionado no experimento anterior (picos negativo e positivo). Mas, mesmo assim o sistema alcança aos níveis de energia desejados em forças mais altas, ou seja, o sistema ainda consegue manter a energia para alcançar o curso total do atuador. Para comprovar esta informação observa-se a tabela 12 no modelo trigonométrico e percebe-se que com o campo magnético de  $H = 1500$  kA/m a força mecânica gerada é de aproximadamente  $F = 195$ N e o deslocamento tem o valor de  $u = 3,9$ mm. Os picos representam uma pequena oscilação amortecida devido à energia conferida pela mola à barra no momento em que a barra atinge a sua condição inicial onde a deformação é igual a zero. Ou seja, esse fenômeno dos picos ocorre no retorno do material à sua forma original que é provocado pela transferência da energia armazenada na mola durante o processo de desmagnetização da barra MSMA (efeito elástico). Comparando-se o modelo polinomial com

o trigonométrico é verificado que no modelo polinomial o pico é negativo e no trigonométrico o pico torna-se positivo. Esta diferença se deve a concepção do próprio modelo empregado por Kiefer e Lagoudas. Entretanto, ambos os picos representam a mesma energia, ou seja, as áreas dos dois picos são bem próximas e os valores da energia em módulo são equivalentes.

Para melhor visualização a figura 34 mostra a análise em 3D do Sistema Com Mola para  $k = 50$  nos modelos polinomial e trigonométrico.

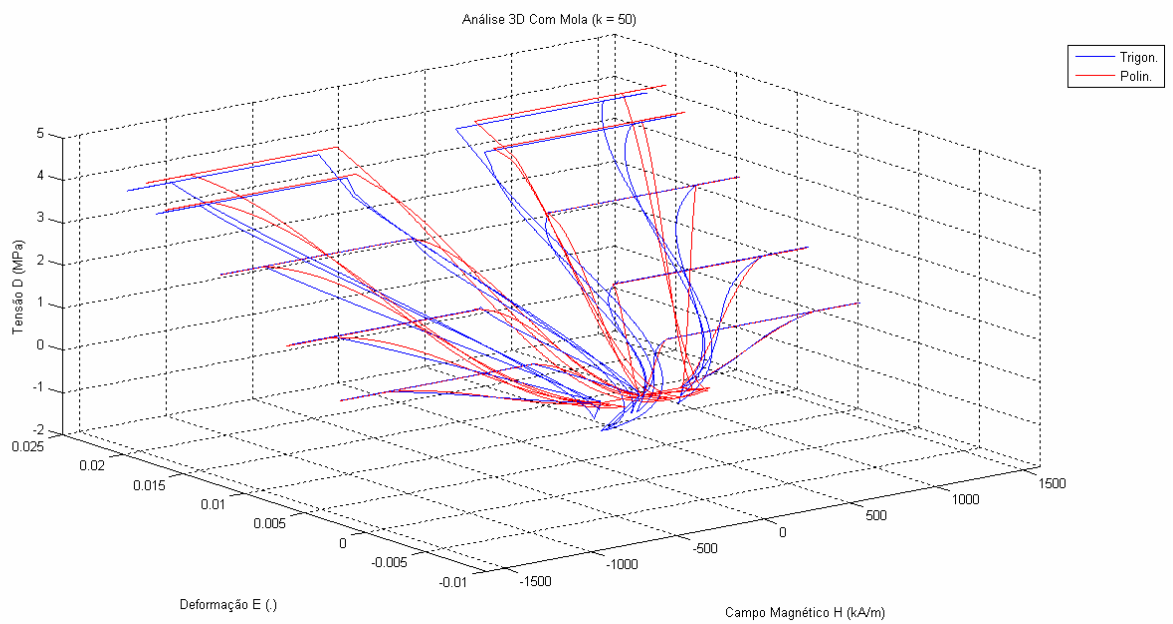


Figura 34 – Gráfico em 3D com eixos  $H(\text{kA/m}) \times \epsilon(\cdot) \times \sigma(\text{MPa})$  do Sistema Com Mola  $k = 50$

#### **4.4.7 7ª Simulação: Aumento e Redução do Campo Magnético no Sistema Com Mola com $k = 100$ para os Modelos Polinomial e Trigonométrico**

Aumenta-se o campo magnético para demonstrar o avanço da massa de  $H = 0$  a  $1500\text{kA/m}$  e, posteriormente, diminui-se o mesmo de  $H = 1500$  a  $0\text{kA/m}$  a fim de visualizar o retorno do material MSMA. Utilizam-se a área transversal  $A_t = 48\text{mm}^2$ , comprimento da barra  $l = 200\text{mm}$  e constante da mola  $k = 100$ . Segue a tabela 13 do material MSMA com mola  $k = 100$  para os modelos polinomial e trigonométrico e com os valores obtidos pelo software LabView.

Tabela 13 – Sistema Com Mola para k = 100

Força trig. (N)	u (mm) trig.	Deformação trig. $\epsilon$ (.)	$\sigma$ (MPa) trig.	Força polin. (N)	u (mm) polin.	Deformação polin. $\epsilon$ (.)	$\sigma$ (MPa) polin.	H (kA/m)
-67,2889	-0,672889	0,001274	-1,401852	25,48479	0,254848	-0,003364	0,530933	300
60,1637	0,601637	0,001023	1,25341	20,45632	0,204563	0,003008	0,426173	600
187,6163	1,876163	0,008619	3,908672	172,3805	1,723805	0,009381	3,591261	900
315,0689	3,150689	0,017928	6,563935	358,5629	3,585629	0,015753	7,470061	1200
336,7358	3,367358	0,019097	7,015329	381,9441	3,819441	0,016837	7,957168	1500
336,7358	3,367358	0,019097	7,015329	381,9441	3,819441	0,016837	7,957168	1200
336,7358	3,367358	0,019097	7,015329	381,9441	3,819441	0,016837	7,957168	900
336,7358	3,367358	0,019097	7,015329	381,9441	3,819441	0,016837	7,957168	600
74,78293	0,747829	0,001566	1,557978	31,32776	0,313278	0,003739	0,652662	300
-29,1875	-0,291875	0,000279	-0,608073	5,585631	0,055856	-0,001459	0,116367	300
81,90237	0,819024	0,002124	1,706299	42,4899	0,424899	0,004095	0,885206	600
192,9922	1,929922	0,009814	4,020672	196,2815	1,962815	0,00965	4,089198	900
304,0821	3,040821	0,017138	6,335044	342,7578	3,427578	0,015204	7,140788	1200
322,9674	3,229674	0,017863	6,728487	357,2537	3,572537	0,016148	7,442786	1500
322,9674	3,229674	0,017863	6,728487	357,2537	3,572537	0,016148	7,442786	1200
322,9674	3,229674	0,017863	6,728487	357,2537	3,572537	0,016148	7,442786	900
322,9674	3,229674	0,017863	6,728487	357,2537	3,572537	0,016148	7,442786	600
143,1529	1,431529	0,005978	2,982351	119,5641	1,195641	0,007158	2,490919	300
4,453289	0,044533	0,000009	0,092777	0,183915	0,001839	0,000223	0,003832	300
83,36974	0,833697	0,002971	1,73687	59,42892	0,594289	0,004168	1,238102	600
162,2862	1,622862	0,008905	3,380962	178,0906	1,780906	0,008114	3,710221	900
241,2026	2,412026	0,013017	5,025055	260,3374	2,603374	0,01206	5,423695	1200
254,6184	2,546184	0,01324	5,304551	264,801	2,64801	0,012731	5,516688	1500
254,6184	2,546184	0,01324	5,304551	264,801	2,64801	0,012731	5,516688	1200
254,6184	2,546184	0,01324	5,304551	264,801	2,64801	0,012731	5,516688	900
254,6184	2,546184	0,01324	5,304551	264,801	2,64801	0,012731	5,516688	600
168,3507	1,683507	0,009346	3,507306	186,9293	1,869293	0,008418	3,89436	300
10,3393	0,103393	0,000086	0,215402	1,710752	0,017108	0,000517	0,035641	300
55,91155	0,559116	0,002249	1,164824	44,97558	0,449756	0,002796	0,936991	600
101,4838	1,014838	0,005697	2,114246	113,9455	1,139455	0,005074	2,373865	900
147,0561	1,470561	0,007646	3,063668	152,9202	1,529202	0,007353	3,185837	1200
154,8033	1,548033	0,007679	3,225069	153,5859	1,535859	0,00774	3,199707	1500
154,8033	1,548033	0,007679	3,225069	153,5859	1,535859	0,00774	3,199707	1200
154,8033	1,548033	0,007679	3,225069	153,5859	1,535859	0,00774	3,199707	900
154,8033	1,548033	0,007679	3,225069	153,5859	1,535859	0,00774	3,199707	600
117,7748	1,177748	0,006694	2,453641	133,8896	1,338896	0,005889	2,789367	300
5,097186	0,050972	0,000047	0,106191	0,938357	0,009384	0,000255	0,019549	300
25,27198	0,25272	0,001033	0,5265	20,658	0,20658	0,001264	0,430375	600
45,44677	0,454468	0,002558	0,946808	51,1537	0,511537	0,002272	1,065702	900
65,62156	0,656216	0,00339	1,367116	67,79702	0,67797	0,003281	1,412438	1200
69,05128	0,690513	0,003398	1,438568	67,9626	0,679626	0,003453	1,415887	1500
69,05128	0,690513	0,003398	1,438568	67,9626	0,679626	0,003453	1,415887	1200
69,05128	0,690513	0,003398	1,438568	67,9626	0,679626	0,003453	1,415887	900
69,05128	0,690513	0,003398	1,438568	67,9626	0,679626	0,003453	1,415887	600
53,51488	0,535149	0,003033	1,114893	60,6669	0,606669	0,002676	1,263894	300

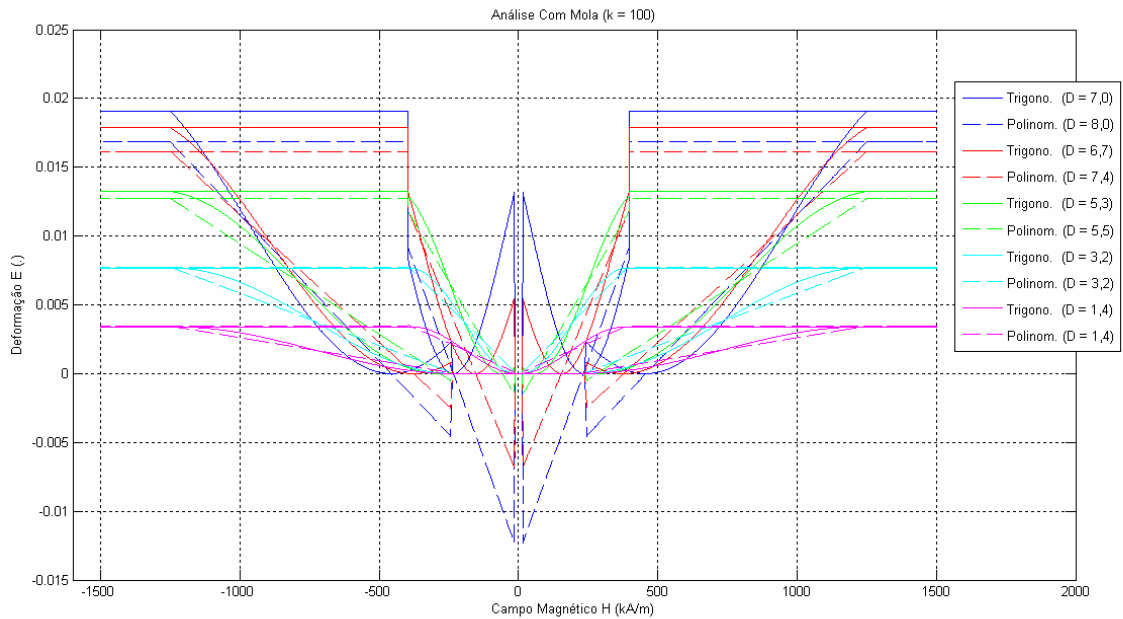


Figura 35 – Gráfico Campo Magnético H (kA/m) x Deformação  $\varepsilon(\cdot)$  do Sistema Com Mola  $k = 100$  para os Modelos Polinomial e Trigonométrico e tensões aproximadas  $\sigma = 7,0; 6,7; 5,3; 3,2$  e  $1,4$ MPa

Verifica-se pelo gráfico da figura 35 que quando  $k = 100$  o modelo apresenta os efeitos anteriores já mencionados com grande intensidade. Existem altas tensões e altas forças aplicadas. Já se opera fora da validade do Modelo de Kiefer e Lagoudas que tem como condições de contorno operar com tensões menores que a tensão de bloqueio no valor de  $\sigma = -8$ MPa . Desta forma, pode-se verificar que o modelo não atende a constante de mola  $k = 100$  , ou seja, para o Modelo trigonométrico os valores de deslocamentos máximos decaem de  $u = 4$ mm para  $u_{\text{máx}} = 3,15$ mm com um campo magnético no valor de  $H = 1200$ kA/m , o que prova que a energia produzida não é suficiente para alcançar o deslocamento previsto com esse nível de força  $F = 315$ N . Considerando a tensão de bloqueio máxima no valor de  $\sigma_{\text{máx}} = -8$ MPa para uma barra com área transversal de  $A_t = 48$ mm<sup>2</sup> tem-se pela equação  $F_{\text{máx}} = \sigma_{\text{máx}} \cdot A_t$  , a força máxima do material com memória de forma magnético igual a  $F_{\text{MSMA}} = 384$ N , isto é, esta força é o limite exigido do sistema. Já que a força da mola é dada pela fórmula  $F_{\text{mec}} = k \cdot x$  , onde a constante da mola utilizada é  $k = 100$  e o deslocamento é  $x = u = 4$ mm, a força da mola tem o valor de

$F_{mec} = 100 \cdot 4 \therefore F_{mec} = 400N$ . Conclui-se que não poderia utilizar uma mola com este valor de constante, pois  $F_{mec} = k \cdot x > F_{MSMA} = \sigma \cdot A_t$ .

Para melhor visualização a figura 36 mostra a análise em 3D do Sistema Com Mola para  $k = 100$  nos modelos polinomial e trigonométrico.

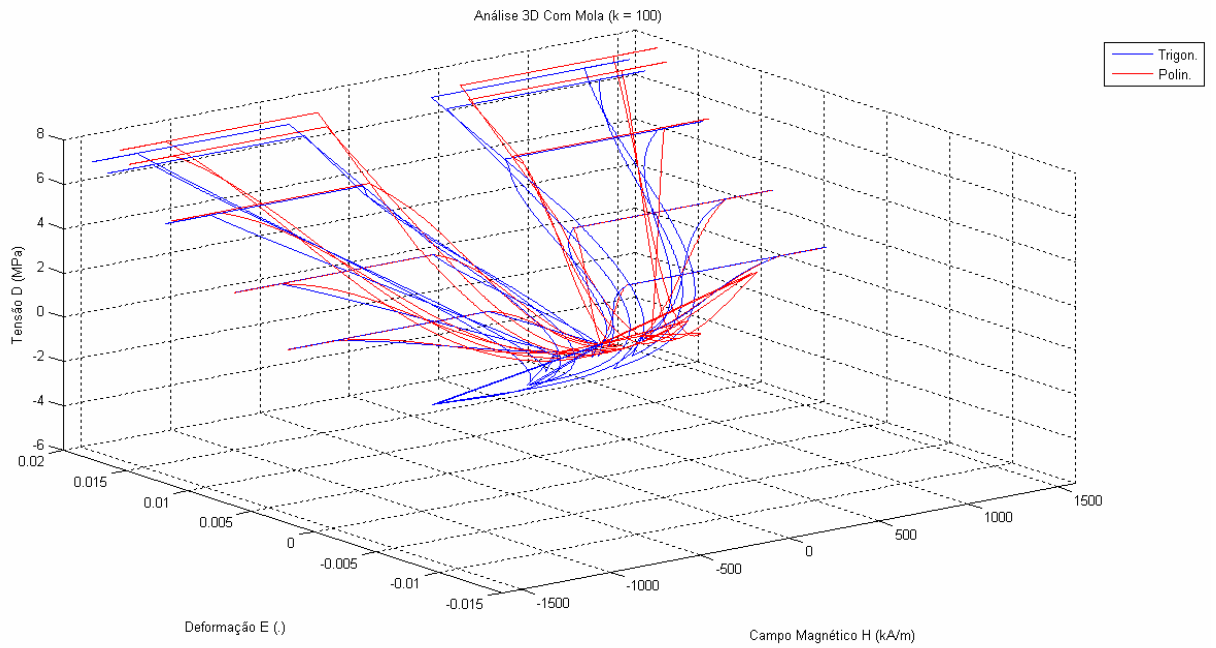


Figura 36 – Gráfico em 3D com eixos  $H(kA/m)$  x  $\epsilon(.)$  x  $\sigma(MPa)$  do Sistema Com Mola  $k = 100$

## **5 Discussão Geral do Trabalho**

Neste trabalho foram apresentadas as principais características das MSMAs e suas aplicações na engenharia. Foi investigado o efeito de memória de forma magnético, causado pela reorientação da variante martensítica sob campos magnéticos externamente aplicados. Foi feito um resumo do modelo de Kiefer e Lagoudas (2005) da estrutura termodinâmica e de sua modelagem constitutiva fenomenológica, onde a partir da expressão de energia livre foram deduzidas as equações constitutivas com uso das relações termodinâmicas apropriadas. Neste modelo as equações que governam a evolução da fração de volume da variante martensítica foram derivadas com base em uma função de reorientação e condições de reorientação associadas, que determinam a ativação do processo de reorientação. Kiefer e Lagoudas ainda utilizaram dois tipos de modelos: polinomial e trigonométrico. Os modelos estabelecidos foram bem sucedidamente aplicados à previsão do efeito de memória de forma magnético. Em um exemplo numérico, com base nos dados obtidos da literatura, as curvas de deformação versus resposta do campo magnético foram previstas e exibem todos os recursos importantes do comportamento constitutivo do MSMA conectados ao processo de reorientação da variante sob a carga magnética e mecânica aplicada constante. Os modelos capturaram a natureza não linear e histerética da resposta de tensão de reorientação. Baseado em todas as conclusões citadas e utilizando as fórmulas da função de reorientação de Kiefer e Lagoudas para os modelos polinomial e trigonométrico, foi desenvolvido um atuador típico onde pode-se mensurar a deformação sofrida no material com memória de forma magnética NiMnGa aplicando-se um campo magnético externo e utilizando uma mola como força de pré-carga (twinning force).

## 5.1 Conclusão

O modelo desenvolvido foi de um atuador linear com material com memória de forma magnético que teve por objetivo demonstrar a transformação de fase (deformação do material), o que representa o avanço da massa e o efeito de memória de forma o que condiz com o recuo da massa. Utilizou-se o modelo constitutivo de Kiefer e Lagoudas (2005) para simular o comportamento do material com memória de forma, que nesse caso foi a liga NiMnGa. Foi feito um programa no software LabView onde foram realizadas simulações de casos. Neste programa é possível estudar os casos nos modelos polinomial e trigonométrico com e sem mola. Conclui-se que na medida em que aumentamos o campo magnético ocorre o fenômeno de transformação de fase, visto que ocorre a deformação do material e conseqüentemente o deslocamento da massa. Para demonstrar o fenômeno de memória de forma o campo magnético foi reduzido e o deslocamento da massa retornou a posição inicial apresentando pequena histerese. A histerese do sistema faz com que os valores de ida não sejam iguais aos de volta. Realizando simulações no programa desenvolvido no software LabView constatou-se que o atuador desenvolvido é bem representativo para as condições de modelagem de um atuador que empregue o mesmo tipo de memória de forma magnética. Entretanto, deve se convir que para esse algoritmo ser expressivo é necessário a realização de testes experimentais para a calibração deste modelo, já que a desmagnetização do material e a geometria da barra com relação ao campo magnético que foram desconsideradas afetam de maneira expressiva o comportamento do modelo. Devido a esta impossibilidade de reproduzir um experimento com este atuador em escala experimental de forma a calibrar o modelo de Kiefer e Lagoudas (2005), nesta dissertação utilizou-se um modelo hipotético de uma barra com dimensões, valores de campos magnéticos e condições de contorno bem próximas ao modelo experimental utilizado por Tickle (2000). De acordo com o modelo de Kiefer e Lagoudas, vale ressaltar que os valores das tensões compressivas para este modelo não devem alcançar o valor de  $\sigma = -8\text{MPa}$ , também conhecido como tensão de bloqueio, onde o efeito de memória de forma é eliminado.

Com as simulações numéricas foi possível mostrar que o modelo é capaz de capturar os principais efeitos das MSMA's mostrando a variação da deformação através da aplicação de campo magnético na presença de tensão compressiva.



## 5.2 Trabalhos Futuros

Uma discussão para trabalhos futuros é o fato de não estar claro em que extensão a reorganização da microestrutura magnética realmente gera impacto no processo de reorientação da variante. Este problema ainda é assunto de discussão na comunidade de pesquisa. Alguns pesquisadores indicaram que os domínios magnéticos desfavoráveis são essencialmente eliminados em campos magnéticos relativamente baixos, se comparados ao intervalo do campo relevante do experimento, (Tickle, 2000; O'Handley et al., 2003; O'Handley, 2004), enquanto outros atribuem importância essencial à influência da evolução da estrutura do domínio magnético no processo de reorientação da variante (Likhachev e Ullakko, 2000a; Hirsinger e LExcellent, 2003b).

As ligas MSMA são muito promissoras quanto a viabilidade de utilização em diversos setores, principalmente petróleo e gás. Com a realização do experimento desta dissertação verificou-se o grande potencial da aplicação desta tecnologia em atuadores para indústrias *offshore*, já que cumprem os requisitos exigidos para atuadores em condições críticas, como por exemplo, válvulas de fundo de poço onde se exige um controle wireless, atuação de grandes forças em ambientes explosivos e não havendo necessidade de emprego de atuadores hidráulicos que precisam de umbilicais e linhas hidráulicas para atuação em poços de petróleo. Por ser um material novo no mercado, até o presente momento, não há registro da utilização dessas ligas em qualquer dispositivo na área de petróleo e gás. Contudo a PETROBRAS/CENPES em parceria com a COPPE/UFRJ estão empenhadas em produzir uma válvula para controle de fluxo de petróleo na Área de Automação de Poços focando as questões técnica, econômica e comercial, em virtude dessas grandes vantagens. No estudo inicial deste Projeto foram analisadas essas vantagens destes materiais e observou-se além dos benefícios citados, estes ainda dependem de pouca energia para atuar ocorrendo a fadiga após um longo período de uso.

Outro ponto fundamental é a simplificação para a construção dos sistemas de controle para atuadores de fundo de poço sem a necessidade de eletrônica embarcada ou sistemas de controle hidráulicos complexos.

Um ponto crítico que se verificou ao se aprofundar no estudo dos MSMA é que para aplicações em ambientes onde há presença de temperaturas elevadas, em torno de 90 a 120°C,

o comportamento da liga se torna inadequado. Atualmente, a MSMA só alcança a temperaturas até 70°C. Segundo artigos encontrados na literatura, a modelagem do comportamento em estruturas MSMA é afetada com variações térmicas, gerando uma mudança de fase provocada quando se atinge ao ponto de Curie, que não é um fato desejado para o comportamento de um atuador.

Outro ponto avaliado é a construção de bobinas com ligas especiais para aplicar campo magnético em atuadores submetidos a altas temperaturas. Essa tecnologia conhecida como bobina planares hoje é disponível. Recentemente é visto nos artigos a busca da pesquisa de novas composições de ligas MSMA que possam operar em temperaturas elevadas de até 150°C.

Outro importante aspecto da pesquisa experimental contínua é estar interessada na descoberta de ligas que mostrem níveis mais altos de tensão. Atualmente essas tensões são menores que 10MPa, para a maioria dos materiais comuns como o NiMnGa (Tickle e James, 1999). É um nível insatisfatório para o projeto de atuadores de alta força. Sistemas de materiais surgidos mais recentemente, por exemplo o CoNiAl (Karaca et al., 2003), foram investigados quanto à possibilidade de tensões aumentadas.

## Apêndice A

Abaixo segue o programa desenvolvido no LabView e seus diagramas de blocos:

$$Z = ((-0.387798 * 10^{**} 28 * (SXF^{**} 4)) - (0.799018 * 10^{**} 21 * (SXF^{**} 3)) - (0.515693 * 10^{**} 14 * (SXF^{**} 2)) - (0.770170 * 10^{**} 8 * (SXF))) + (0.018175);$$

$$u = E * L;$$

$$X = u;$$

$$AP = M0 * MS * (HFA - HSA);$$

$$STF = (Z);$$

$$E = Z;$$

$$B1P = ((1/2) * M0 * MS * (HSA + HFR)) + (SSF * STF);$$

$$CP = M0 * MS * (HSR - HFR);$$

$$B2P = (1/4) * (CP - AP);$$

$$YPF = ((1/2) * M0 * MS * (HSA - HFR)) - B2P;$$

$$AT = ((M0 * MS) / \pi) * (HSA - HFA);$$

$$B1T = ((1/2) * M0 * MS * (HSA + HFR)) + (SSF * STF);$$

$$CT = ((M0 * MS) / \pi) * (HFR - HSR);$$

$$B2T = (\pi / 4) * (AT - CT);$$

$$YTF = ((1/2) * M0 * MS * (HSA - HFR)) - B2T;$$

$$FVPA = ( (SSF * (STF)) + ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) + (M0 * MS * H) - B1P - B2P - YPF) / AP;$$

$$FVPR = ((SSF * (STF)) + ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) + (M0 * MS * H) - B1P + B2P + YPF) / CP;$$

$$FVTA = 1/2 * \cos( -1/AT * ((-SSF * STF) - ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) - (M0 * MS * H) + B1T + B2T + YTF) + \pi) + 1/2;$$

$$FVTR = 1/2 * \cos( -1/CT * ((-SSF * STF) - ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) - (M0 * MS * H) + B1T - B2T - YTF) + \pi) + 1/2;$$

$$STPA = STF * FPA;$$

$$STPR = STF * FPR;$$

$$STTA = STF * FTA;$$

$$STTR = STF * FTR;$$

$$upa = STPA * L;$$

$$upr = STPR * L;$$

$$upta = STTA * L;$$

$$uptr = STTR * L;$$

$$SSPA = -(YPF - ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) + (M0 * MS * H) - (AP * FPA) - B1P - B2P) / STPA;$$

$$SSPR = -(YPF - ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) + (M0 * MS * H) - (CP * FPR) - B1P + B2P) / STPR;$$

$$SSTA = -(YTF - ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) + (M0 * MS * H) + (AT * (\pi - \arccos((2 * FTA) - 1)))) - B1T - B2T) / STTA;$$

$$SSTR = -(YTF - ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) + (M0 * MS * H) + (CT * (\pi - \arccos((2 * FTR) - 1)))) - B1T + B2T) / STTR;$$

$$FYPA = SSF * A;$$

$$FYPR = SSF * A;$$

$$FYTA = SSF * A;$$

$$FYTR = SSF * A;$$

$$SSPAM = SSF + ((-STF * K * L) / A);$$

$$SSPRM = SSF + ((-STF * K * L) / A);$$

$$SSTAM = SSF + ((-STF * K * L) / A);$$

$$SSTRM = SSF + ((-STF * K * L) / A);$$

$$FVPAM = ( (SSPAM * (STF)) + ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) + (M0 * MS * H) - B1P - B2P - YPF) / AP;$$

$$FVPRM = ((SSPRM * (STF)) + ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) + (M0 * MS * H) - B1P + B2P + YPF) / CP;$$

$$FVTAM = 1/2 * \cos( -1/AT * ((-SSTAM * STF) - ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) - (M0 * MS * H) + B1T + B2T + YTF) + \pi) + 1/2;$$

$$FVTRM = 1/2 * \cos( -1/CT * ((-SSTRM * STF) - ((1/2) * DS * SSF^{**} 2) - (M0 * MS * H) + B1T - B2T - YTF) + \pi) + 1/2;$$

$STPAM = STF * FPAM;$   
 $STPRM = STF * FPRM;$   
 $STTAM = STF * FTAM;$   
 $STTRM = STF * FTRM;$

$upam = STPAM * L;$   
 $uprm = STPRM * L;$   
 $uptam = STTAM * L;$   
 $uptm = STTRM * L;$

$FYPAM = SSPAM * A;$   
 $FYPRM = SSPRM * A;$   
 $FYTAM = SSTAM * A;$   
 $FYTRM = SSTRM * A;$

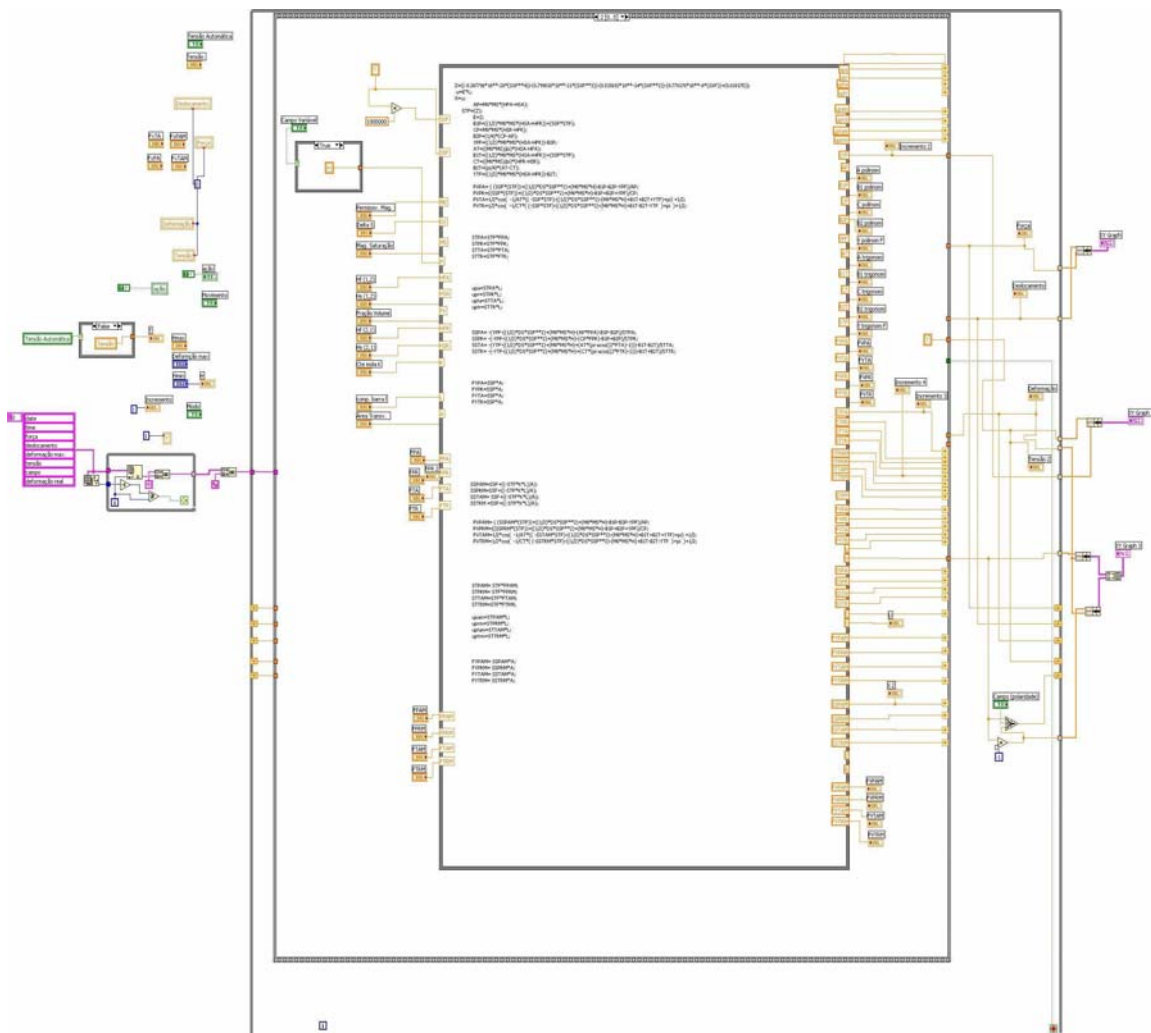


Figura 37 – Programa Desenvolvido no Software LabView para Simulação do Atuador MSMA

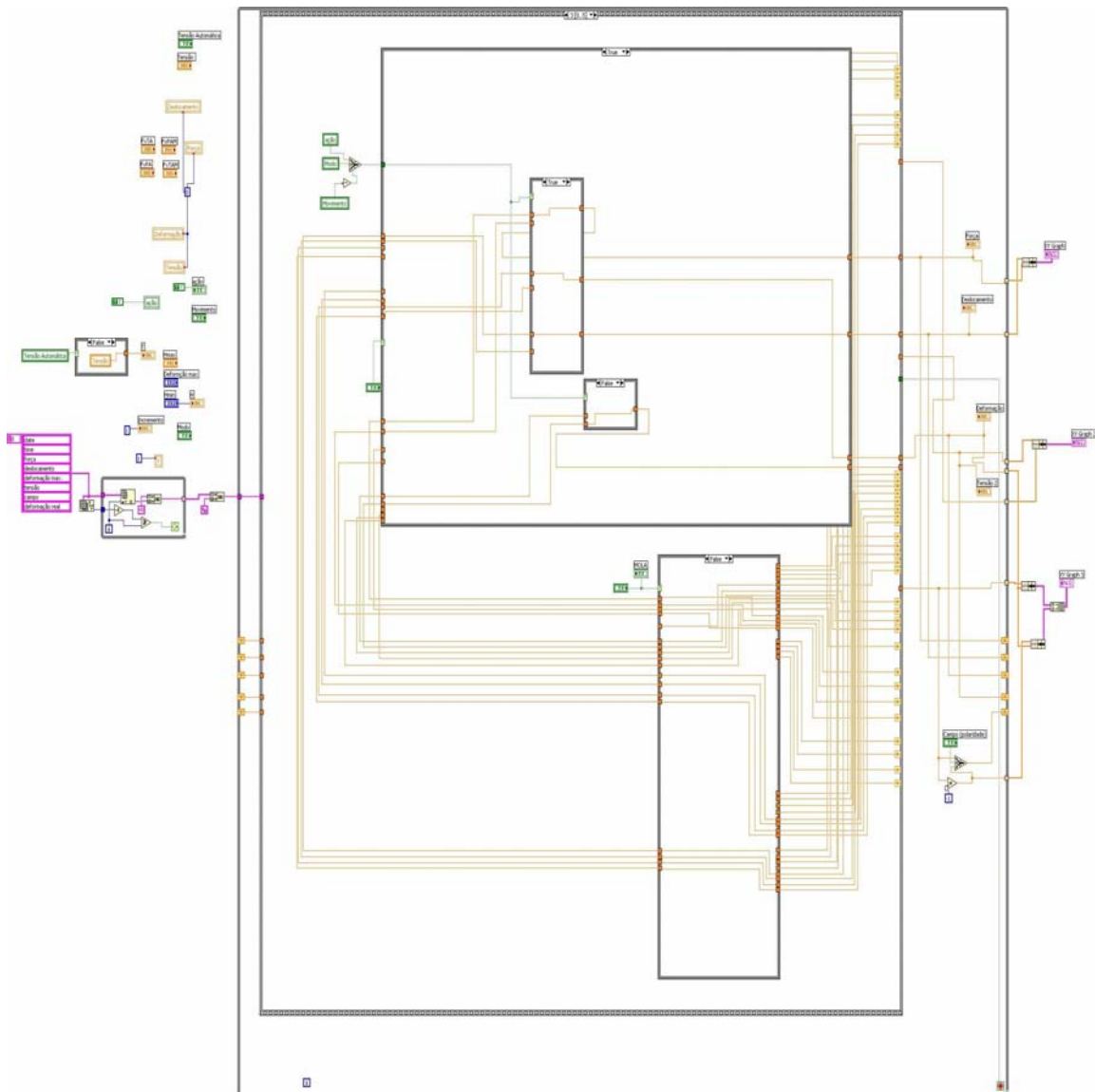


Figura 38 – Diagrama de Blocos do Atuador MSMA Desenvolvido no Software Labview

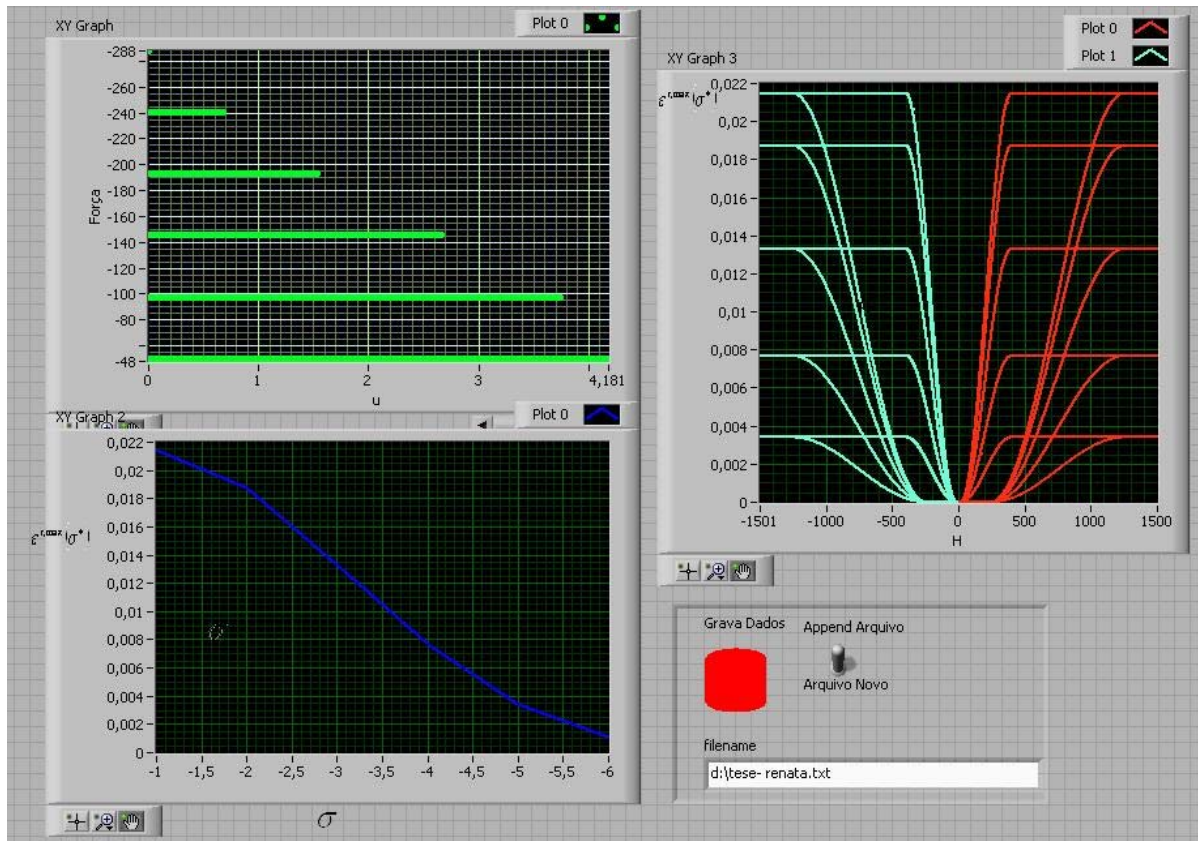


Figura 39 – Simulação no LabView Utilizando Parâmetros Ajustáveis

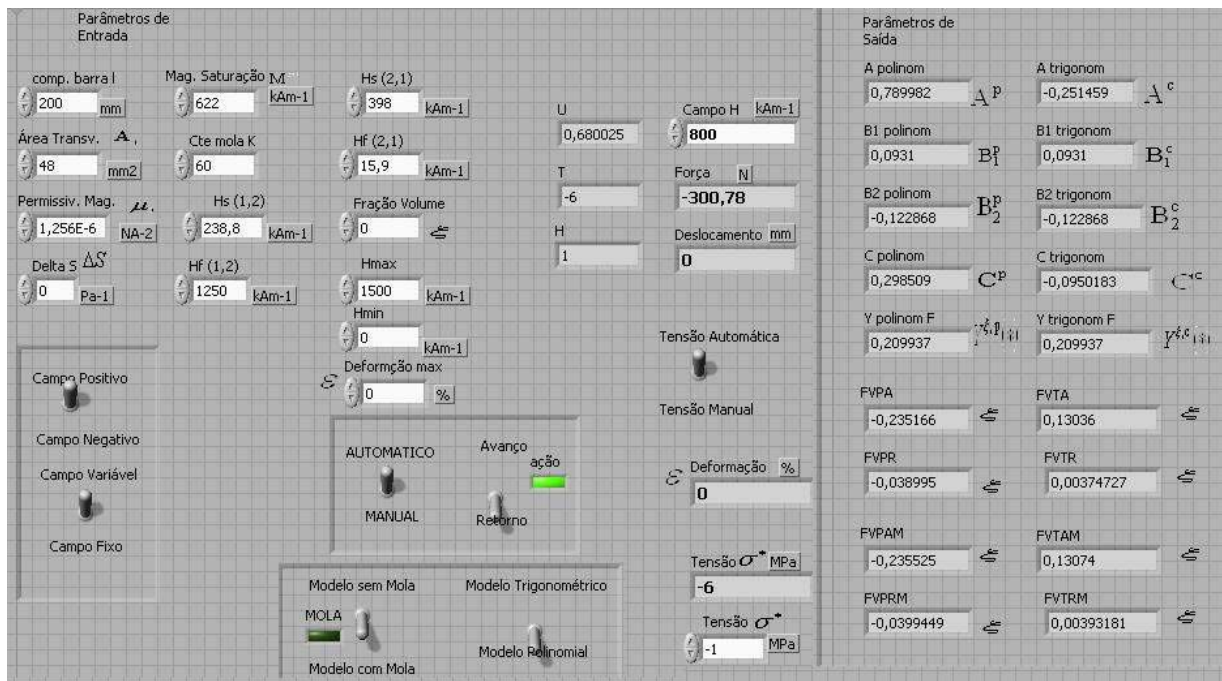


Figura 40 – Parâmetros de Entrada e Saída do Atuador MSMA Simulado no Software LabView

## Apêndice B

Temperatura de Curie dos compósitos:

Tabela 14 – Temperatura de Curie dos Compósitos

<b>Material</b>	<b>Temp. Curie (K)</b>
Fe	1043
Co	1388
Ni	627
Gd	292
Dy	88
MnAs	318
MnBi	630
MnSb	587
CrO <sub>2</sub>	386
MnOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	573
FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	858
NiOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	858
CuOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	728
MgOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	713
EuO	69
Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	560



## **Apêndice C**

### **Produção dos Elementos MSM**

A produção da liga MSM tem muitos estágios. No primeiro estágio os materiais Ni, Mn e Ga são limpos e derretidos para produzir a liga policristalina da alta qualidade com a composição requerida. No segundo estágio a liga policristalina cresce em uma fornalha especial se tornando uma barra redonda do monocrystal. No estágio seguinte a barra redonda é sujeita ao tratamento térmico para melhorar resultados do crescimento. Isto é feito em uma fornalha adicional ao tratamento térmico. Depois do tratamento térmico a barra redonda é cortada em elementos retangulares MSM e a superfície dos elementos MSM é polida. No último estágio os elementos MSM são sujeitados ao tratamento magneto-mecânico e as propriedades magnéticas e mecânicas são medidas para satisfazer às especificações.

## Referências

- Antoun, N. T., Savi, A. M., Monteiro, C.C.P., et al., 2006, “Finite Element Analysis of Shape Memory Alloy Adaptive Trusses with Geometrical Nonlinearities”, *Journal Article*.
- Banks, H. T., Smith, C., Wang, Y., 1996, “Smart Material Structures Modeling Estimation and Control”, *Wiley-Masson*.
- Bo, Z., Lagoudas, D. C., 1999, “Thermomechanical modeling of polycrystalline SMAs under cyclic loading, Part I: Theoretical derivations”, *International Journal of Engineering Science* 37, 1089–1140.
- Boyd, J. G., Lagoudas, D. C., 1996, “A thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part I. The monolithic shape memory alloy”, *International Journal of Plasticity* 12 (6), 805–842.
- Coleman, B. D., Gurtin, M. E., July 1967, “Thermodynamics with internal state variables”, *The Journal of Chemical Physics* 47 (2), 597–613.
- Cui, J., Shield, T. W., James, R. D., 2004, “Phase transformation and magnetic anisotropy of an ironpalladium ferromagnetic shape-memory alloy”, *Acta Materialia* 52, 35–47.
- Cullity, B. D., 1972, “Introduction to Magnetic Materials”, *Addison-Wesley*.
- DeSimone, A., 1993, “Energy minimizers for large ferromagnetic bodies”, *Archive for Rational Mechanics and Analysis* 125, 99–143.
- Entchev, P. B., Lagoudas, D. C., 2001, “Modeling porous shape memory alloys using micromechanical averaging techniques”, *Mechanics of Materials* 34 (1), 1–24.
- Fujita, A., Fukamichi, K., Gejima, F., et al, 2000, “Magnetic properties and large magnetic-field-induced strains in off-stoichiometric Ni-Mn-Al heusler alloys”, *Applied Physics Letters* 77 (19), 3054–3056.
- Funakubo, H., 1987, “Shape Memory Alloys”, *Gordon & Bleach*, New York.
- Heczko O., Straka L., 2003, “Temperature dependence and temperature limits of magnetic shape memory effect”, *Journal Applied Physics Letters* 94, 7139-7143.
- Hirsinger, L., Lexcellent, C., 2003a, “Internal variable model for magneto-mechanical behaviour of ferromagnetic shape memory alloys Ni-Mn-Ga”, *Journal de Physique IV* 112, 977–980.
- Hodgson, D. E., Wu, M. H., et al, 1992, “Shape Memory Alloy”, *ASM Handbook*, v.2, pp. 887-902.

James R., Kinderlehrer D., 1990, “Microstructure has Macro Impact”, *Institute for Mathematics and its Applications*.

Jules, D. C., 2003, “Recent Advances and Future Directions in Magnetic Materials”, *ACTA Materialia*, v. 51, pp. 5907-5939.

Kakeshita, T., Takeuchi, T., Fukuda, T., et al, 2000, “Giant magnetostriction in an ordered Fe<sub>3</sub>Pt single crystal exhibiting a martensitic transformation”, *Applied Physics Letters* 77 (10), 1502–1504.

Karaca, H. E., Karaman, I., Lagoudas, D. C., et al, 2003, “Recoverable stress-induced martensitic transformation in a ferromagnetic CoNiAl alloy”, *Scripta Materialia* 49, 831–836.

Kiefer, B., Lagoudas, D. C., 2003, “Magnetic field-induced Martensitic Variant Reorientation in Magnetic Shape Memory Alloys”, *Department of Aerospace Engineering, Texas A & M University*, H. R. Bright Building 3141 TAMU, College Station, TX 77843-3141, USA.

Kiefer, B., Lagoudas, D. C., March 2004, “Phenomenological modeling of ferromagnetic shape memory alloys”, *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Active Materials: Behavior and Mechanics*, San Diego, CA, 14–18, v. 5387, 164–176.

Kiefer, B., Lagoudas, D. C., March 2005, “Modeling of the magnetic field-induced martensitic variant reorientation and the associated magnetic shape memory effect in MSMAs”, *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Active Materials: Behavior and Mechanics*, San Diego, CA, 6–10, v. 5761.

Kittel, C., 1949, “Physical theory of ferromagnetic domains”, *Reviews of Modern Physics* 21 (4), 541–583.

Lagoudas, D. C., Bo, Z., Qidwai, M. A., 1996, “A unified thermodynamic constitutive model for SMA and finite element analysis of active metal matrix composites”, *Mechanics of Composite Materials and Structures* 3, 153–179.

Liang, Y., Sutou, Y., Wada, T., et al, 2003, “Magnetic Field-Induced Reversible Actuation Using Ferromagnetic Shape Memory Alloys”, *Scripta Materialia*, v. 48, pp. 1415-1419.

Machado, G. L., Savi, A. M., 2002, “Free Vibration of a Couple Shape Memory Oscillator: Influence of Temperature Variations”.

Malinen, P. A., Sadovskii, V. D., Smirnov, L. V., et al, 1967, “Reasons for the Influence of a Pulsating Magnetic Field on Martensitic Transformation in Steels and Alloys”, *Fizik Metal Metalloved*, v. 23, n. 3, pp. 535.

Mantovani, D., 2000, “Shape Memory Alloys: Properties and Biomedical Applications”, *Journal of the Minerals Metals & Materials Society* 52 (10), pp.36-44.

Morito, H., Fujita, A., Kainuma, R., et al, 2002, “Magnetocrystalline anisotropy in singlecrystal Co-Ni-Al ferromagnetic shape-memory alloy”, *Applied Physics Letters* 81 (9), 1657–1659.

Murray, S. J., Hayashi, R., Marioni, M., et al, 1999, “Magnetic and mechanical properties of FeNiCoTi and NiMnGa magnetic shape memory alloys”, *Proceedings of SPIE* 3675, 204–211.

Murray, S. J., Marioni, M., Allen, S. M., et al, 2000a, “6% magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni-Mn-Ga”, *Applied Physics Letters* 77 (6), 886–888.

O’Handley, R. C., Allen, S. M., Paul, D. I., Henry, et al., 2003, “Keynote address: Magnetic field-induced strain in single crystal Ni-Mn-Ga”, *Proceedings of SPIE, Symposium on Smart Structures and Materials* 5053, 200–206.

O’Handley, R.C., 14-18 March 2004, “Privat technical discussion”, *SPIE, 11<sup>th</sup> Annual International Symposium: Smart Structures and Materials*, San Diego, CA.

Otsuka, K.; Ren, X., 1999, “Recent Developments in the Research of Shape Memory Alloys”, *Intermetallics* 7, pp. 511-528.

Pacheco, M. C. L. P., Savi, A. M., 2000, “Modeling and Simulation of a Shape Memory Release Device for Aerospace Applications”, *Revista de Engenharia e Ciências Aplicadas*.

Sato, Y., Tanaka, K., 1988, “Estimation of energy dissipation in alloys due to stress-induced martensitic transformation”, *Res Mechanica* 23, 381–392.

Savi, A. M. et al, 2001, “Building System Using Shape Memory Alloys Members”, *U.S. Patent Issued*.

Shield, T. W., 2003, “Magnetomechanical testing machine for ferromagnetic shape-memory alloys”, *Review of Scientific Instruments* 74 (9), 4077–4088.

Shimizu, K., Kakashita, T., 1989, “Effect of Magnetic Fields on Martensitic Transformations in Ferrous Alloys and Steels”, *ISIJ Int*, v. 29, pp. 97.

Smith, R. C., Dapino M. J., Seelecke S., 2003, “Free Energy Model for Hysteresis in Magnetostrictive Transducers”, *Journal of Applied Physics*, v. 93, n.1.

Sozinov, A., Likhachev, A. A., Ullakko, K., 2002, “Crystal Structures and Magnetic Anisotropy Properties of NiMnGa Martensitic Phases with Giant Magnetic Field-Induced Strain”, *IEEE Trans. Magn.*, v. 38, n.5, pp. 2814.

Sozinov, A., Likhachev, A. A., Lanska, N., et al, 2003, "Effect of crystal structure on magnetic-field-induced strain in Ni-Mn-Ga", *Proceedings of SPIE, Symposium on Smart Structures and Materials* 5053, 586–594.

Spaldin, N. A., 2003, "Magnetic Materials: Fundamentals and Device Applications", *Cambridge University Press*.

Suorsa, J. Tellinen, K. Ullakko, E. Pagounis, March 2004, "Voltage Generation Induced by Mechanical Straining in Magnetic Shape Memory Materials", *American Institute of Physics*.

Tellinen J., Suorsa I., Jaaskelainen A., et al, 2002, "Basic properties of magnetic shape memory actuators", *Published in 8<sup>th</sup> international conference actuator*, 10-12 June 2002, Bremen, Germany.

Tickle, R., "Ferromagnetic shape memory materials", Ph.D. thesis, *University of Minnesota*, May 2000.

Tickle, R., James, R. D., 1999, "Magnetic and magnetomechanical properties of Ni<sub>2</sub>MnGa", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 195 (3), 627–638.

Tickle, R., James, R. D., Shield, T., et al, 1999, "Ferromagnetic shape memory in the NiMnGa system", *IEEE Transactions on Magnetics* 35 (5), 4301–4310.

Ullakko, K., Huang, J. K., Kantner, C., et al, 1996, "Large magnetic-field-induced strains in Ni<sub>2</sub>MnGa single crystals", *Applied Physics Letters* 69 (13), 1966–1968.

Vassiliev, A., 2002, "Magnetically Driven Shape Memory Alloys", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 242-245, pp. 66-67.

Wasilevski, R. J., 1975, "On the Nature of the Martensitic Transformation", *Mettallurgical Transactions* 6A, pp. 1405-1418.

Wu, S. K., Lin, H. C., 2000, "Recent Development of Ni-Ti Based Shape Memory Alloys in Twain", *Materials Chemistry and Physics* 64, pp. 81-92.

Wuttig, M., Li, J., Craciunescu, C., 2001, "A new ferromagnetic shape memory alloys system", *Scripta Materialia* 44, 2393–2397.

Wuttig, M., Liu, L., Tsuchiya, K., et al, 2000, "Occurrence of ferromagnetic shape memory alloys (invited)", *Journal of Applied Physics* 87 (9), 4707–4711.

Yamamoto, T., Taya, M., Sutou, Y., et al, 2004, "Magnetic field-induced reversible variant rearrangement in Fe-Pd single crystals", *Acta Materialia* 52 (17), 5083–5091.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)