

Plataforma para Análise Comportamental de Atuadores de Ligas com Memória de Forma e para o Controle de Deformação de uma Barra Flexível

Walber Medeiros Lima

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Instrumentação e Controle

José Sérgio da Rocha Neto, D.Sc.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Walber Medeiros Lima, Agosto de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S000u

2008 Lima, Walber Medeiros.

Plataforma para Análise Comportamental de Atuadores de Ligas com Memória de Forma e para o Controle de Deformação de uma Barra Flexível / Walber Medeiros Lima. — Campina Grande, 2008. 61 f.: il..

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientador: José Sérgio da Rocha Neto, D.Sc.

1. Ligas com Memória de Forma. 2. Controle. 3. Extensômetro de Resistência Elétrica. I. Título.

CDU-000:000.00

Plataforma para Análise Comportamental de
Atuadores de Ligas com Memória de Forma e para o
Controle de Deformação de uma Barra Flexível

Walber Medeiros Lima

Dissertação de Mestrado apresentada em Agosto de 2008

José Sérgio da Rocha Neto, D.Sc.
Orientador

Antônio Marcus Nogueira Lima, D.Sc.
Componente da Banca
Péricles Rezende Barros, P.D.Sc.
Componente da Banca
Carlos José de Araújo, D.Sc.
Componente da Banca

Campina Grande, Paraíba, Brasil, Agosto de 2008

Dedicatória

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Edmilson e Laodicéa Maria, as minhas avós Maria José e Maria Laodicéa (falecida), as minhas irmãs, Waléria e Wanessa, a meu cunhado, Helder, e a minha noiva, Liliane, que sempre me apoiaram, me incentivaram e que foram viabilizadoras de todos meus bens intelectuais, morais, espirituais e materiais, e principalmente da minha inserção no mundo acadêmico.

Sempre agradeço a Deus de ter estas pessoas em minha vida, pois é por meio e dedicação destas que sou um privilegiado. Por isso, deixo aqui registrado toda a minha estimação e apreciação por estas pessoas.

Agradecimentos

Primeiramente, a Deus por guiar a minha vida.

Aos meus pais, Edmilson e Laodicéa Maria, a quem devo a vida e por sempre insistirem na minha educação e por me apoiar e incentivar nos momentos difíceis.

As minhas irmãs, Waléria e Wanessa, a meu cunhado, Helder, e a minha noiva Liliane pelo apoio incondicional

Aos meus grandes amigos conquistados durante o mestrado no LEMCAD (Laboratório de Ensaio, Manutenção, Calibração, Aferição e Desenvolvimento) do DEE (Departamento de Engenharia Elétrica), no LIEC (Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle) do DEE e no LaMMEA (Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas) do DEM (Departamento de Engenharia Mecânica) pelo o apoio, incentivo e sobretudo, por estarem sempre presentes diante da menor solicitação de suas presenças, em especial aos alunos de doutorado Walter Andrés Vermehren Valenzuela e de mestrado Rômulo Pierre Batista dos Reis;

Ao meu orientador José Sérgio da Rocha Neto pela orientação, sem a qual este trabalho não seria realizado;

Ao Professor Carlos José de Araújo do DEM por sua contribuição na elaboração da plataforma experimental, sem o qual este trabalho não seria possível, e pelas inúmeras dúvidas esclarecidas.

Ao Professor Antônio Marcus Nogueira Lima do DEE por sua contribuição na elaboração da plataforma experimental, sem o qual este trabalho não seria possível, e pelas inúmeras dúvidas esclarecidas.

Ao técnico Simões Toledo, que confeccionou e montou as placas desenvolvidas durante este trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por financiar este trabalho.

A vocês, agradeço.

Resumo

Nesta dissertação, descreve-se o desenvolvimento de uma plataforma experimental, contendo uma barra flexível de alumínio simplesmente engastada, extensômetros de resistência elétrica (ERE's) e fios de LMF como atuadores de força, para analisar o comportamento dos fios de LMF de NiTi (Níquel-Titânio) e NiTiCu (Níquel-Titânio-Cobre) e, além disso, para realizar o controle de deformação na barra.

Na plataforma para análise do comportamento dos fios de LMF são utilizados ERE's, um LVDT (Linear Variable Differential Transducer) e um microtermopar para medir respectivamente a deformação e a deflexão na barra, assim como a temperatura no fios de LMF. Para a aquisição de dados, desenvolveu-se um código em Visual Basic numa planilha eletrônica para realizar a comunicação com os instrumentos de medição com interface GPIB (General Purpose Interface Bus).

Na plataforma para controle de deformação na barra, a aquisição e controle de dados são implementados numa unidade microprocessada baseada no microcontrolador ADuC. A resposta do sistema em malha aberta foi utilizada para identificar o modelo matemático do sistema, utilizando a técnica de sintonia direta para encontrar o controlador adequado. O controlador PI foi usado para controlar a deformação na barra para diferentes tipos de sinais de referência, variando as frequências para poder observar a largura de banda que o sistema responde. A unidade microprocessada é conectada ao PC executando o programa LabVIEW para visualizar as medições numa interface gráfica.

A plataforma de análise permitiu determinar uma relação não-linear e linear, assim como o aparecimento de uma histerese no comportamento dos fios de LMF. Com a plataforma de controle, constatou-se que a deformação na barra pode ser controlada por um controlador PI, obtendo um valor de deformação desejada por meio de uma fonte de tensão elétrica que faz passar uma corrente elétrica nos fios de LMF, realizando seu aquecimento por efeito Joule.

Abstract

In this dissertation, the development of an experimental platform, containing a simply supported flexible aluminum beam, strain-gauges and SMA wires as force actuators, to analyze the behavior of the SMA wires of NiTi (Nickel-Titanium) and of NiTiCu (Nickel-Titanium-Copper) and, in addition, to accomplish the deformation control in the beam.

In the platform for analysis of the behavior of wires are used strain-gauges, a LVDT (Lineal Variable Differential Transducer) and a micro-thermocouple to measure respectively the deformation and the deflexion in the beam, as well as the temperature in the SMA wires. For the data acquisition, it developed a code in Visual Basic a spreadsheet to accomplish the communication with the measurement instruments with interface GPIB (General Purpose Interface Bus).

In the control platform the deformation control in the beam, the data acquisition and control are implemented with an ADuC microcontroller based card. The system answer in open-loop was used to identify the mathematical model of the system, using the technique of direct tuning to find the appropriate controller. The PI controller have been used to control the deformation in the beam for different types of reference signals, varying the frequencies to be able to observe the bandwidth that the system answers. The microcontroller card is connected to the PC running LabVIEW software to visualize the measurements in a graphic user interface.

The analysis platform allowed to determine a no-lineal and lineal relationship, as well as the appearance of a hysteresis in the behavior of the SMA wires. With the control platform, it observed that the deformation in the beam can be controlled by a PI controller, obtaining a deformation value through an electric voltage source that it makes to pass an electric current in the SMA thread, accomplishing its heating for effect Joule.

Sumário

1	Introdução	1
2	Ligas de Memória de Forma	7
2.1	Breve Histórico	7
2.2	Ligas de Memória de Forma	8
2.3	Fenômenos Macromecânicos das LMF	11
2.3.1	Pseudoelasticidade	11
2.3.2	Memória de Forma	12
2.4	Aplicações das Ligas com Memória de Forma	14
2.5	Conclusão	21
3	Plataforma Experimental	22
3.1	Descrições	22
3.1.1	Implementação Elétrica	24
3.2	Conclusão	34
4	Descrição dos Experimentos e Resultados Obtidos	35
4.1	Preparação dos Fios de LMF	35
4.1.1	Tratamento Térmico	35
4.1.2	Treinamento Termomecânico	36
4.2	Medição de Deformação Utilizando o Método dos 4 Fios na Ausência dos Atuadores de Força	38
4.3	Medição de Deformação Utilizando o Método da Ponte de Wheatstone na Ausência dos Atuadores de Força	41
4.4	Medição de Deformação Utilizando o Método dos 4 Fios na Presença dos Atuadores de Força	42
4.5	Medição de Deformação Utilizando o Método da Ponte de Wheatstone na Presença dos Atuadores de Força	45

4.6	Plataforma Experimental Utilizada para Análise	47
4.7	Plataforma Experimental Utilizada para Controle	55
4.8	Conclusão	65
5	Conclusão	67
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	68
A	Extensômetro de Resistência Elétrica	69
A.1	Extensômetro de resistência elétrica	69
A.2	Princípio de funcionamento	70
A.3	Classificação	72
A.3.1	Material utilizado como elemento resistivo	73
A.3.2	Material utilizado como base	74
A.3.3	Configuração da grade	74
A.4	Sistema de codificação	77
A.5	A escolha correta	77
A.5.1	Dimensão do extensômetro	77
A.5.2	Geometria da grade	78
A.5.3	Tipo do extensômetro	78
A.6	Técnica de aplicação do ERE	79
A.6.1	Preparo do local da aplicação	80
A.6.2	Colagem do extensômetro	81
A.6.3	Verificação e fiação	83
A.6.4	Proteção	85
A.7	Circuitos	85
A.7.1	A Ponte de Wheatstone	86
A.7.2	Ponte de Wheatstone com um ERE	87
A.7.3	Ponte de Wheatstone com dois extensômetros	89
A.7.4	Ponte de Wheatstone com quatro extensômetros	91
B	Código do Treinamento Termomecânico	93
C	Código para a Comunicação GPIB	99
D	Código do Controle de Deformação	102
	Referências Bibliográficas	110

Lista de Símbolos e Abreviaturas

α	Coefficiente de dilatação térmica do material do ERE	$[\mu m/m/^{\circ}C]$
β	Coefficiente de dilatação térmica do material da estrutura	$[\mu m/m/^{\circ}C]$
γ	Coefficiente térmico de resistividade elétrica do ERE	$[\mu\Omega m/\Omega m/^{\circ}C]$
ν	Coefficiente de Poisson	[]
ρ	Resistividade do condutor	$[\Omega m]$
ε	Deformação na barra flexível	$[\mu\varepsilon]$
ε^*	Deformação de referência	$[\mu\varepsilon]$
A	Área da seção transversal do condutor	$[m^2]$
c	Constante do material do condutor	[]
D	Diâmetro do condutor	$[m]$
ERE	Extensômetro de Resistência Elétrica	
K	Fator sensibilidade do extensômetro	[]
L	Comprimento do condutor	$[m]$
LMF	Liga com Memória de Forma	
R	Resistência elétrica do condutor	$[\Omega]$
R_G	Resistência do extensômetro	$[\Omega]$
R_L	Resistência do fio conectado ao extensômetro	$[\Omega]$
SMA	Shape Memory Alloy	
T	Temperatura	$[^{\circ}C]$
V_0	Tensão de saída da ponte de Wheatstone	$[mV]$
V_{EX}	Tensão de excitação da ponte de Wheatstone	$[V]$

Lista de Tabelas

4.1	Medição de deformação utilizando o extensômetro 1.	40
4.2	Medição de deformação utilizando o extensômetro 2.	40
4.3	Deformação média na ausência dos fios de LMF.	40
4.4	Medição de deformação na ausência dos fios de LMF.	42
4.5	Medição de deformação utilizando o extensômetro 1.	43
4.6	Medição de deformação utilizando o extensômetro 2.	44
4.7	Deformação média na presença dos fios de LMF.	44
4.8	Medição de deformação na presença dos fios de LMF.	45
4.9	Comportamento do fio de NiTi	50
4.10	Comportamento do fio de NiTiCu	53
A.1	Valores de K de algumas ligas utilizadas na confecção dos extensômetros (MAGALHãES, 2003; JÚNIOR, 2003).	72

Lista de Figuras

1.1	Diagrama da plataforma experimental.	3
1.2	Diagrama de blocos do sistema de controle PI.	5
2.1	Curva típica de transformação em função da temperatura associada a LMF.	9
2.2	Estrutura cristalina.	9
2.3	Fio de SMA sendo usado como atuador.	10
2.4	Comportamento tensão-deformação da pseudoelasticidade.	12
2.5	Comportamento tensão-deformação-temperatura do EMF simples.	13
2.6	Esquema ilustrativo do efeito de memória de forma <i>one-way</i>	13
2.7	Esquema ilustrativo do efeito de memória de forma <i>two-way</i>	14
2.8	Acoplador hidráulico do tipo <i>Cryofit</i>	15
2.9	Válvula Térmica (FERNANDES; ARIEIRA, 2005).	15
2.10	Filtro de Simon (PAIVA, 2004).	16
2.11	Dispositivos auto-expansivos.	17
2.12	Luva para fisioterapia contendo elementos em LMF (PAIVA, 2004).	17
2.13	Placas NiTi para recuperação de fraturas ósseas (ALBERTA, 2005).	18
2.14	Aparelho ortodôntico com resultados de 3 semanas.	18
2.15	A escultura “ <i>Espoir-Desespoir</i> ” (FERNANDES; ARIEIRA, 2005).	19
2.16	O modelo de uma asa com <i>flap</i> sendo atuado por fios de LMF.	19
2.17	Plataforma para prover um deslocamento linear.	20
2.18	Barra flexível atuada por 2 fios de LMF para o controle de posição.	20
2.19	Barra flexível atuada por 2 fios de LMF para o controle de vibração.	20
2.20	Junta rotativa atuada por 2 fios de LMF para o controle de posição.	21
3.1	Diagrama da plataforma experimental.	23
3.2	Diagrama de blocos da <i>interface</i> elétrica da plataforma para análise dos fios de LMF.	24
3.3	Diagrama elétrico do circuito de medição de deformação.	25

3.4	Diagrama elétrico do circuito de medição de temperatura.	26
3.5	Janela desenvolvida na planilha eletrônica.	27
3.6	Diagrama de blocos do código desenvolvido em Visual Basic.	28
3.7	Diagrama de blocos da <i>Interface</i> elétrica da plataforma para o controle de deformação na barra flexível.	29
3.8	Diagrama elétrico do circuito de acionamento.	30
3.9	Foto da placa microprocessada da Analog Devices.	30
3.10	Diagrama de blocos do código desenvolvido em linguagem C.	31
3.11	Diagrama elétrico da 1/2 ponte de Wheatstone.	33
3.12	Janela desenvolvida no programa LabVIEW.	33
4.1	Foto da plataforma utilizada para treinamento termomecânico dos fios de LMF.	36
4.2	Diagrama de blocos da plataforma utilizada para treinamento.	37
4.3	Diagrama de blocos do código desenvolvido em linguagem C para o treinamento.	38
4.4	Diagrama da plataforma utilizado na medição de deformação sem as LMF.	39
4.5	Diagrama elétrico do método dos 4 fios.	39
4.6	Diagrama elétrico da montagem experimental.	41
4.7	Diagrama da plataforma utilizado na medição de deformação com as LMF.	43
4.8	Gráfico da deformação versus a força na barra flexível.	46
4.9	Barra flexível.	47
4.10	Gráficos do comportamento do fio de NiTi para uma força de 5 N.	48
4.11	Gráficos do comportamento do fio de NiTi para uma força de 9 N.	49
4.12	Gráficos do comportamento do fio de NiTiCu para uma força de 5 N.	51
4.13	Gráficos do comportamento do fio de NiTiCu para uma força de 9 N.	52
4.14	Gráficos do comportamento dos fios de NiTi (A e B) e NiTiCu (C e D) para uma força de 5, 7 e 9 N.	54
4.15	Diagrama de blocos do sistema de controle em malha aberta.	55
4.16	Gráfico da resposta do sistema de controle em malha aberta.	56
4.17	Diagrama de blocos do sistema de controle PI em malha fechada.	57
4.18	Gráficos de uma referência quadrada de 70 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra.	59
4.19	Gráficos de uma referência senoidal de 40 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra.	60
4.20	Gráficos de uma referência triangular de 10 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra.	61

4.21	Gráficos de uma referência quadrada de 20 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra e uma perturbação externa de 3,5 Hz na barra.	62
4.22	Gráficos de uma referência senoidal de 20 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra e uma perturbação externa de 3,5 Hz na barra.	63
4.23	Gráficos de uma referência triangular de 20 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra e uma perturbação externa de 3,5 Hz na barra.	64
A.1	Extensômetro de resistência elétrica.	69
A.2	ERE do tipo fio (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).	73
A.3	ERE do tipo lâmina (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).	73
A.4	Extensômetro uniaxial simples - forma tradicional (ECXELSENSOR, 2007).	74
A.5	Extensômetros uniaxiais simples - forma especial (ECXELSENSOR, 2007).	75
A.6	Extensômetros uniaxiais a 45° (ECXELSENSOR, 2007).	75
A.7	Extensômetro uniaxial duplo (ECXELSENSOR, 2007).	75
A.8	Extensômetros biaxial a 90° (ECXELSENSOR, 2007).	76
A.9	Extensômetro triaxial a 90° (ECXELSENSOR, 2007).	76
A.10	Extensômetro triaxial a 120° (ECXELSENSOR, 2007).	76
A.11	Sistema de codificação (ECXELSENSOR, 2007).	77
A.12	Limpeza inicial do extensômetro.	80
A.13	Lixando a superfície de fixação do extensômetro.	80
A.14	Marcações do posicionamento do extensômetro.	81
A.15	O transporte e posicionamento do extensômetro.	82
A.16	Posicionamento do extensômetro sobre a peça.	82
A.17	Colagem do extensômetro sobre a peça.	82
A.18	Extensômetro sobre a peça.	83
A.19	Preparação dos fios.	83
A.20	Preparação para a soldagem dos fios nos terminais do extensômetro.	84
A.21	Soldagem dos fios nos terminais do extensômetro.	84
A.22	Preparação para a fixação do fio na peça.	84
A.23	Fixando o fio na peça.	85
A.24	Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone.	86
A.25	Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com um ERE.	87
A.26	Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com 1 ERE conectado a 2 fios.	88

A.27 Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com 1 ERE conectado a 3 fios. . .	88
A.28 Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com dois extensômetros.	89
A.29 Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com 2 ERE's conectado a 5 fios. .	90
A.30 Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com quatro extensômetros. . . .	91

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas mecânicos estão frequentemente sujeitos a perturbações internas e externas, provocando deformações e/ou vibrações indesejadas que, em alguns casos, colocam em risco a própria integridade estrutural do sistema (TEIXEIRA, 2001).

O processo de análise de deformações sofridas por um elemento que está sujeito a tensões mecânicas é de grande importância em diversas aplicações industriais, espaciais, assim como para a pesquisa. Por meio desta análise, pode-se determinar quais os esforços envolvidos em uma peça e/ou estrutura, obtendo informações que servem de base para o projeto e o desenvolvimento de componentes e máquinas (LEUCKERT, 2000).

Por mais de 10 anos, os problemas mecânicos de deformação e/ou vibração em sistemas estruturais têm sido tratados por técnicas convencionais de controle, por meio da adição de atuadores de força conhecidos como ligas de memória de forma (MOREIRA, 1998).

As ligas com memória de forma (LMF), também conhecidas como *shape memory alloy* (SMA), são ligas metálicas especiais capazes de sofrer deformações aparentemente plásticas e, em seguida, retornarem à sua forma geométrica original quando submetidas a uma variação de temperatura apropriada e/ou tensão mecânica (NASCIMENTO, 2002; VALENZUELA, 2005; ROMANO; TANNURI, 2008). Esta característica deve-se à capacidade que estes materiais possuem em assumirem diferentes estruturas cristalinas a distintas temperaturas, por meio de suas transformações de fases.

Essas ligas apresentam deformações reversíveis que podem alcançar em torno de 10% sem apresentar deformações plásticas verdadeiras (VALENZUELA, 2005). Estes materiais são fabricados nas formas de fios, de tubos, de chapas e de barras. A forma mais amplamente usada é a forma de fio (SONG; MA, 2003; VALENZUELA, 2005).

O fenômeno é exibido nas ligas de níquel-titânio (NiTi), nas de base de cobre (CuZn, CuZnAl, CuZnGa, CuZnSn, CuZnSi, CuAlNi, CuAuZn, CuSn), nas de ouro-cádmio (AuCd), nas de níquel-alumínio (NiAl), dentre outras (NASCIMENTO, 2002).

Devido a esse fenômeno, as LMF podem ser utilizadas como sensores e/ou atuadores na indústria aeroespacial, petrolífera, automobilística, aplicações ortodônticas, ortopédicas, robóticas, controle da vibração e forma (AURICCHIO, 1995; KELLY, 1998; NASCIMENTO, 2002). Quando utilizadas como atuadores termomecânicos, no qual o aquecimento é realizado por efeito joule, aplicando-se certa intensidade de corrente, as ligas tem se revelado como uma alternativa atrativa, devido à sua grande deformação e boa recuperação, em sistemas onde grandes forças, grandes deformações e baixas frequências são requeridas (NASCIMENTO, 2002; SONG; MA, 2003; KELLY, 1998).

Motivação

Naves, lasers e radares espaciais são projetados com exigências de precisão na estrutura, assim, a necessidade de controle da forma torna-se bastante importante (KELLY, 1998). Devido ao fenômeno da LMF, capaz de gerar grandes deformações e recuperar a sua forma inicial com pequeno peso e volume, provê a motivação inicial para avaliar a viabilidade do uso destes materiais em aplicações de controle de forma e vibração nas estruturas.

Um exemplo seria utilizar as LMF's como atuadores mecânicos para o cancelamento aero-elástico e efeitos vibratórios nas lâminas do helicóptero (GIURGIUTIU, 2000). Nesta aplicação, a preocupação principal é controlar a posição da lâmina do helicóptero, estrutura flexível, até que anulem as vibrações estruturais.

Algumas das aplicações fazem uso de um controle *on-off* quando utilizam as ligas com memória de forma como atuadores (KHIDIR et al., 2007). Em aplicações mais complexas, deve-se elaborar técnicas de controle capazes de controlar a temperatura e a força como garantia de desempenho e estabilidade (NASCIMENTO, 2002).

Identificação de sistemas é uma área do conhecimento que estuda técnicas alternativas de modelagem matemática. Uma das características dessas técnicas é que pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário e, conseqüentemente, tais técnicas são também referidas como modelagem (ou identificação) caixa preta ou modelagem empírica (AGUIRRE, 2004). Em muitos casos será preferível usar técnicas de identificação de sistemas.

A falta de uma técnica de controle precisa, não trivial, é um dos fatores que impedem um maior número de aplicações dessas ligas, no qual o modelo matemático do sistema é necessário para a implementação de um controlador eficiente.

Devido as incertezas do atuador de LMF, causadas por impossibilidades de ter todos seus parâmetros precisamente especificados e as dificuldades associadas em obter um modelo analítico preciso, provê a motivação de utilizar as técnicas de identificação de sistemas no intuito de obter um modelo matemático que explique, pelo menos, em parte e de forma aproximada, a relação de causa e efeito presente nos dados de entrada e de saída do sistema. Isto, com o intuito de implementar de um controlador eficiente.

Objetivos e contribuições

Neste trabalho, objetiva-se o desenvolvimento de uma plataforma experimental, ilustrada na Figura 1.1, contendo uma barra flexível de alumínio simplesmente engastada, ERE's e fios de LMF como atuadores de força, para analisar o comportamento dos fios de LMF de NiTi e NiTiCu e, além disso, para realizar o controle de deformação na barra para diferentes tipos de sinais de referência, na qual as frequências foram variadas para observar a largura de banda que o sistema responde.

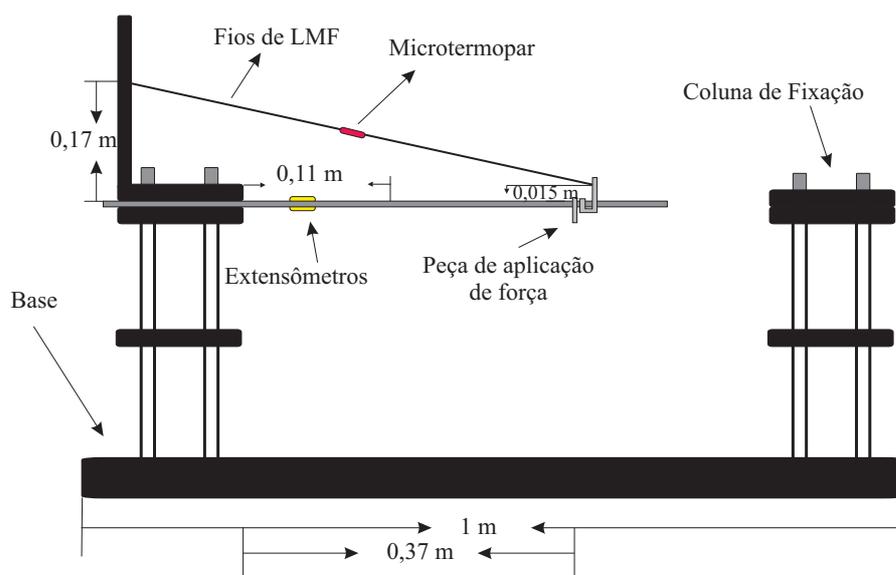


Figura 1.1: Diagrama da plataforma experimental.

Na barra flexível de alumínio foi colado, com uma fina camada de adesivo, dois ERE's da Excel Sensores com auto-compensação de temperatura nas faces da viga, os quais sofrem deformações opostas, de maneira que, enquanto um se contrai, o outro se estende na mesma proporção. O adesivo permite transmitir as deformações da barra ao ERE, além de servir de isolante entre ambos.

Na plataforma para análise do comportamento dos fios de LMF foi utilizado ERE's, um LVDT (Linear Variable Differential Transducer) e um microtermopar para medir respectivamente a deformação e a deflexão na barra submetida a diferentes forças em sua extremidade livre, assim como a temperatura no fios de LMF, observando os gráficos da deflexão e deformação da barra e da resistência elétrica do fio em função a temperatura, da deflexão e da deformação em função da resistência elétrica e da deformação em função da potência elétrica fornecida ao fio. Para esta análise, utilizou-se uma instrumentação baseada na interface de comunicação GPIB que interligava três multímetros e uma fonte de corrente para realizar o aquecimento do fio por efeito Joule. Esses instrumentos foram conectados ao PC executando uma planilha eletrônica com um código desenvolvido em Visual Basic para visualizar as medições em tempo real.

Na plataforma para controle de deformação na barra foi realizada a medição e o controle de deformação na barra flexível submetida a uma força em sua extremidade livre, observando os gráficos da deformação na barra, da corrente elétrica e da temperatura no fio de LMF em função do tempo.

Para este sistema de medição e controle, inicialmente encontrou-se um modelo contínuo de primeira ordem para a plataforma desenvolvida, aplicando a técnica de identificação de sistemas que utiliza um conjunto de dados (entrada e saída), objetivando implementar um controlador eficiente. Os dados de entrada foram os valores de *duty cycle* de uma fonte de tensão elétrica fornecida ao fio de LMF e os dados de saída foram os valores da deformação na barra flexível. Para isto, utilizou-se uma placa microprocessada da *Analog Devices*, contendo o microcontrolador ADuC842, conectada ao PC executando o programa LabVIEW para visualizar as medições numa interface gráfica em tempo real.

O sistema de controle que foi implementado consiste de um controle PI de deformação na barra como ilustrado na Figura 1.2. Esse sistema foi utilizado para obter um valor de deformação desejada na barra por meio de uma fonte de tensão, no qual faz passar no fio de LMF um determinado valor de corrente elétrica. Esta corrente elétrica aquece o fio por efeito Joule, provocando uma maior ou menor contração no fio devido a variação de temperatura, alcançando a deformação desejada.

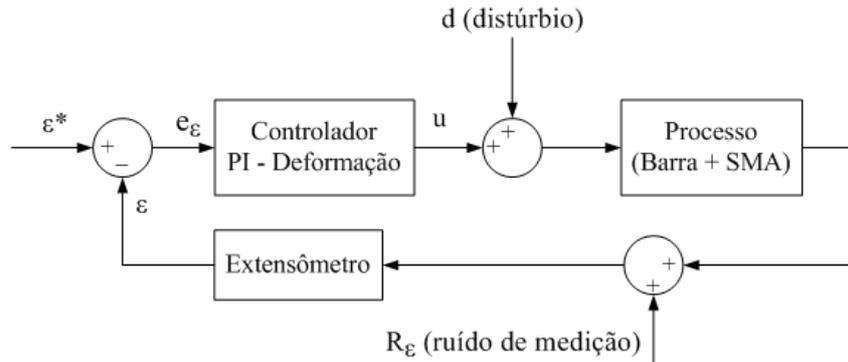


Figura 1.2: Diagrama de blocos do sistema de controle PI.

Onde:

- ε^* é a deformação de referência desejada;
- ε é a deformação medida na barra flexível;
- Extensômetro é o sensor utilizado para medir a deformação na barra.

Sinopse dos capítulos

No capítulo 2, apresenta-se uma explanação da origem, da definição, dos fenômenos e das aplicações das ligas com memória de forma. Assim, proporcionando uma melhor compreensão dos atuadores.

No capítulo 3, apresenta-se a plataforma experimental desenvolvida para analisar o comportamento dos fios de ligas metálicas com memória de forma de NiTi e NiTiCu e, também, para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada. Além disso, as implementações elétricas utilizadas nestas plataformas.

No Capítulo 4, apresenta-se a preparação dos fios de LMF de NiTi e NiTiCu e os resultados obtidos da plataforma experimental apresentada no Capítulo 3.

No capítulo 5, apresenta-se as discussões finais e resume-se as principais conclusões e contribuições obtidas. Neste capítulo, são sugeridas algumas futuras investigações que dariam prosseguimento aos estudos de controle de deformação na barra flexível.

No apêndice A, apresenta-se uma explanação do extensômetro de resistência elétrica juntamente com o seu princípio de funcionamento, sua classificação e a sua técnica de aplicação. Além disso, os circuitos elétricos envolvidos, proporcionando uma melhor compreensão sobre a técnica utilizada para a medição de deformação.

No apêndice B, apresenta-se o código desenvolvido em linguagem C para a implementação do treinamento termomecânico dos fios de LMF.

No apêndice C, apresenta-se o código desenvolvido em Visual Basic para realizar a comunicação GPIB dos instrumentos utilizados na determinação do comportamento dos fios de LMF.

No apêndice D, apresenta-se o código desenvolvido em linguagem C para a implementação da medição e controle de deformação na barra flexível.

Capítulo 2

Ligas de Memória de Forma

Neste capítulo, descreve-se a origem, a definição e os fenômenos associados as ligas com memória de forma. Além disso, o tratamento térmico juntamente com o treinamento termomecânico e as suas aplicações.

2.1 Breve Histórico

Em 1932, o pesquisador sueco Arne Ölander descobriu, um surpreendente fenômeno quando trabalhava, que a liga metálica ouro-cádmio podia ser plasticamente deformada em baixa temperatura e quando aquecida, retornava à configuração original. Já os pesquisadores Chang e Read, em 1958, descobriram o mesmo fenômeno na liga metálica de índio-titânio e mostraram a possibilidade de utilizar esse fenômeno para realizar trabalhos mecânicos. No entanto, ambas as ligas mostraram-se problemáticas devido ao alto preço do ouro e do índio e a natureza tóxica do cádmio (NASCIMENTO, 2002).

Em 1960, um grupo de pesquisadores do *Naval Ordnance Laboratory* (NOL), nos Estados Unidos, liderados por Beuhler e Wiley, fizeram a grande descoberta da liga com memória de forma de níquel-titânio (NiTi), razão pela qual recebeu o nome de NiTiNOL, que era resistente ao calor e a corrosão, mais barata e apresentava uma taxa de deformação em relação a recuperação superiores às ligas anteriores (JONNALAGADDA, 1997; NASCIMENTO, 2002; VALENZUELA, 2005).

2.2 Ligas de Memória de Forma

As ligas metálicas com memória de forma são materiais capazes de sofrer deformações aparentemente plásticas e, em seguida, retornarem à sua configuração original quando submetidas a uma variação de temperatura apropriada e/ou tensão mecânica (LIMA et al., 2007; ROMANO; TANNURI, 2008). Este fenômeno é conhecido como efeito de memória da forma (EMF) e as ligas que exibem esse comportamento são chamadas de ligas com memória de forma (LMF).

O fenômeno é exibido nas ligas de níquel-titânio (NiTi), nas de base cobre (CuZn, CuZnAl, CuZnGa, CuZnSn, CuZnSi, CuAlNi, CuAuZn), nas de ouro-cádmio (AuCd), nas de níquel-alumínio (NiAl), nas de ferro-platina (FePt), dentre outras (NASCIMENTO, 2002). Na liga de ferro-manganês-silício-crômio-níquel (FeMnSiCrNi), recentemente desenvolvida, tem atraído interesse significativo por apresentar um bom efeito de memória de forma, uma boa resistência a corrosão, além de suas propriedades mecânicas.

As LMF apresentam deformações reversíveis que podem alcançar em torno de 10% sem apresentar deformações plásticas verdadeiras. E são fabricadas nas formas de fios, de tubos, de chapas e de barras, porém a forma mais amplamente usada é a forma de fio (LIMA et al., 2007).

Devido a esse fenômeno, as LMF podem ser utilizadas como sensores e/ou atuadores na indústria aeroespacial, petrolífera, automobilística, aplicações ortodônticas, ortopédicas, robóticas, controle da vibração e forma.

Este fenômeno ocorre devido à capacidade que estes materiais possuem em assumirem diferentes estruturas cristalinas a distintas temperaturas, por meio de suas duas fase martensita e austenita. A martensita é uma fase de temperatura mais baixa, relativamente dúctil, flexível e facilmente deformável, a qual pode apresentar diferentes estruturas cristalinas (hexagonal, romboédrica, dentre outras). A austenita é uma fase de alta temperatura, relativamente forte, a qual apresenta uma única estrutura cristalina cúbica (LIMA et al., 2007; ROMANO; TANNURI, 2008).

A relação entre as fases austenita e martensita é caracterizada por um laço de histerese e pelas temperaturas críticas de transformação, como ilustra a Figura 2.1. Nessa figura, A_s é a temperatura inicial da austenita, M_s é a temperatura inicial da martensita, A_f é a temperatura final da austenita e M_f é a temperatura final da martensita. Estas temperaturas são determinadas principalmente pela composição da LMF, podendo ser afetada por outros fatores.

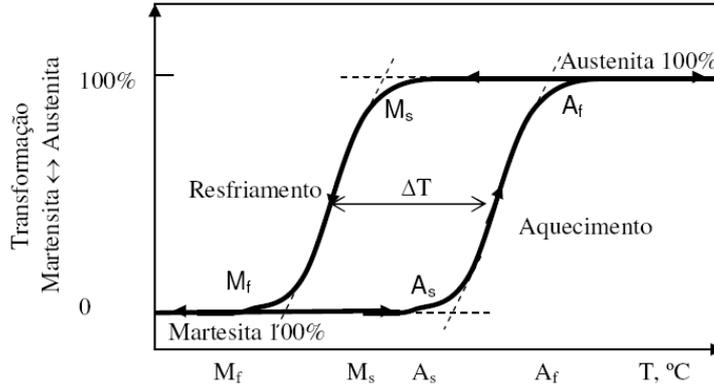


Figura 2.1: Curva típica de transformação em função da temperatura associada a LMF.

Quando induzida somente por variação de temperatura, a martensita é denominada de fase martensita maclada (desorientada), também chamada de martensita *twinned*, na qual ocorre uma auto-acomodação da estrutura cristalina como ilustrada na Figura 2.2 (a). Esta martensita, ao se formar, pode escolher algumas orientações (variantes) cristalográficas diferentes em relação a um sistema de referência posicionado na fase original. Quando a martensita é induzida por um tensão mecânica, ou tensão e temperatura, a martensita é denominada de fase martensita de-maclada (orientada), também chamada de martensita *detwinned*, na qual ocorre a formação de apenas uma variante cristalográfica, dentre as variantes da martensita maclada, alinhada com a orientação do carregamento, como ilustrado na Figura 2.2 (b).

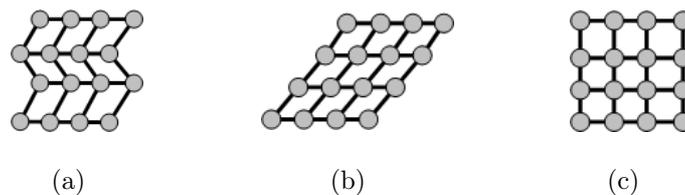


Figura 2.2: Estrutura cristalina.

Na Figura 2.1, ilustra-se o fenômeno da transformação de fase devido à variação de temperatura de uma amostra LMF. Este processo inicia-se numa fase 100% austenita com uma temperatura A_f e livre de tensões. A partir de A_f , diminuindo a temperatura até alcançar M_s , observa-se o início de uma transformação de fase martensita que persiste até M_f , no qual ocorre uma auto-acomodação da estrutura cristalina, induzindo a formação de variantes martensíticas e de uma fase 100% martensita. E a partir de M_f , aumentando a temperatura até alcançar A_s , observa-se uma transformação de fase inversa que persiste

até uma temperatura A_f seja alcançada, no qual a amostra retornará a uma fase 100% austenita.

A mudança que ocorre dentro da estrutura cristalina de uma LMF durante o EMF não é um processo termodinamicamente reversível. Em outras palavras, existe uma dissipação da energia devido ao atrito interno entre as fases e a criação interna de defeitos estruturais. Em consequência, ocorre a formação de uma histerese em temperatura, como ilustrada na Figura 2.1, durante a transformação de fase reversível (LAURENTS; MAVROIDIS, 2002; ROMANO; TANNURI, 2008).

A LMF pode ser considerada intrinsecamente como um atuador termomecânico que converte energia térmica em deslocamento acompanhado ou não da produção de um trabalho mecânico como ilustrado na Figura 2.3. Em geral, o deslocamento desejado é obtido por meio da aplicação de pulsos de corrente elétrica (efeito Joule) e neste caso a LMF é considerada um “atuador elétrico”. Porém, se o acionamento (aquecimento e resfriamento) é realizado por intermédio da variação controlada da temperatura ambiente (convecção forçada, por exemplo), a LMF é considerada um “atuador térmico” (ARAÚJO et al., 2003).

Esses materiais, atuadores por natureza, tem se revelado como uma alternativa bastante atrativa, devido à sua grande deformação e boa recuperação, em sistemas onde grandes forças, grandes deformações e baixas frequências são requeridas quando utilizado como atuador elétrico (Nascimento, 2002).

Algumas das aplicações fazem uso de um controle *on-off* quando utilizam as ligas com memória de forma como atuadores (KHIDIR et al., 2007). Em aplicações mais complexas, deve-se elaborar técnicas de controle capazes de controlar a temperatura e a força como garantia de desempenho e estabilidade. A falta de uma técnica de controle precisa, não trivial, é um dos fatores que impedem um maior número de aplicações dessas ligas (NASCIMENTO, 2002).

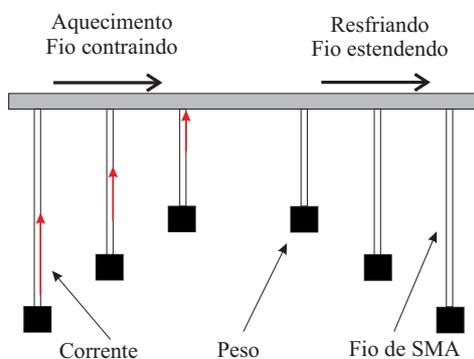


Figura 2.3: Fio de SMA sendo usado como atuador.

Uma análise mais precisa do comportamento termomecânico, nas ligas de memória de forma, tem tornado cada vez maior o interesse no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descrevê-los de forma adequada, permitindo explorar todo seu potencial. Assim, podem ser modeladas microscopicamente, onde vem sendo abordada, por diversos autores, os aspectos metalúrgicos das ligas e macroscopicamente os aspectos fenomenológicos (PAIVA; SAVI; PACHECO, 2003).

2.3 Fenômenos Macromecânicos das LMF

As LMF apresentam dois fenômenos fundamentais: os efeitos de memória de forma (EMF) e o efeito pseudo-elástico. No caso dos EMF existem duas formas: de uma via (*one-way*) ou reversível (*two-way*). O efeito de memória de forma reversível tem sido largamente estudado nos últimos anos (PAIVA; SAVI; PACHECO, 2003).

Todos estes fenômenos são obtidos após submeter a liga metálica com memória de forma a um processo de tratamento térmico e/ou treinamento termomecânico. O tratamento térmico permite liberar a transformação de fase que origina os fenômenos e o treinamento permite associar uma forma a cada fase, por meio de ciclos termomecânicos (NASCIMENTO, 2002; PAIVA; SAVI; PACHECO, 2003).

2.3.1 Pseudoelasticidade

Na Figura 2.4, ilustra-se o efeito pseudo-elástico, também conhecido como o fenômeno da pseudoelasticidade ou superelasticidade, por meio do gráfico da tensão mecânica (σ) versus a deformação (ε) de uma amostra LMF com uma temperatura constante e superior a A_f .

Este processo inicia-se com o material numa fase 100% austenita, no ponto D, no qual essa fase é estável. Aplica-se então uma tensão suficientemente alta na amostra que se comporta elasticamente até que uma tensão crítica (σ_{crit}) seja alcançada no ponto A. Neste ponto, observa-se o início de uma transformação de fase num nível de tensão praticamente constante (fase martensita induzida por tensão - martensita *detwinned*), que persiste até o ponto B, característico do material, na qual ocorre uma auto-acomodação da estrutura cristalina devido à tensão aplicada. Durante este processo de auto-acomodação, a tensão não se desenvolve muito em comparação com a deformação alcançada. Retirando a tensão

aplicada no material, inicia-se uma transformação reversível, no ponto C, que persiste até o ponto D, onde o material retornará a sua configuração original numa fase 100% austenítica.

Em outras palavras, o fenômeno do efeito pseudo-elástico é caracterizado pelo fato do material por sofrer grandes deformações, porém a amostra não permanecerá deformada, voltando a sua configuração original tão logo seja removida a tensão.

O fenômeno do efeito pseudo-elástico apresenta um laço de histerese, que compreende a região entre os pontos A, B, C e D, e uma recuperação da deformação dado pelo limite elástico do material, caso contrário, a deformação não poderá ser recuperada, pois o material passa a se comportar plasticamente (PAIVA; SAVI; PACHECO, 2003).

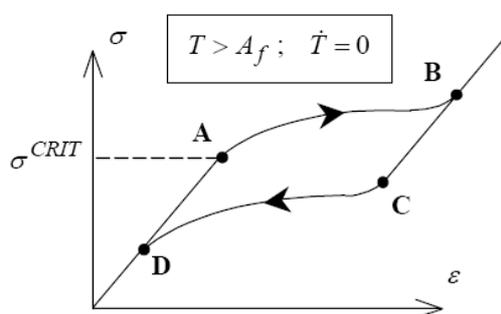


Figura 2.4: Comportamento tensão-deformação da pseudoelasticidade.

2.3.2 Memória de Forma

Na Figura 2.5, ilustra-se o efeito de memória de forma, por meio do gráfico da tensão mecânica (σ) versus a deformação (ε) de uma amostra LMF com uma temperatura constante e inferior a M_f .

Este processo inicia-se com o material numa fase 100% martensita *twinned*, na origem dos eixos, no qual a fase martensita é estável. Aplica-se uma tensão suficientemente alta no material que se comporta elasticamente até que σ_{crit} seja alcançada no ponto A. Neste ponto, observa-se o início de uma transformação de fase (martensita *detwinned*) num nível de tensão praticamente constante, que persiste até o ponto B, característico do material, na qual ocorre um processo de re-orientação da estrutura cristalina devido à tensão aplicada. Durante este processo de re-orientação, a tensão não se desenvolve muito em comparação com a deformação alcançada. Retirando a tensão aplicada no material, uma deformação residual aparentemente plástica poderá ser recuperada, por meio do aquecimento da amostra para uma temperatura acima de A_f . Assim, o material retornará para uma fase 100% austenita e assumirá a configuração geométrica original.

Em outras palavras, o fenômeno do efeito de memória de forma é caracterizado por originar grandes deformações, porém permanecerá deformado mesmo que seja removida a tensão aplicada, voltando a sua configuração original tão logo seja aquecida.

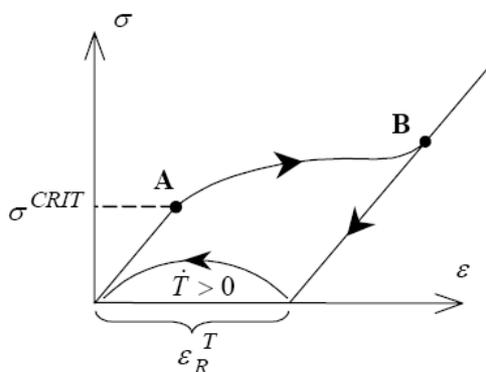


Figura 2.5: Comportamento tensão-deformação-temperatura do EMF simples.

Memória de Forma *One-Way*

Na Figura 2.6, ilustra-se o fenômeno do efeito de memória de forma *one-way* numa barra a qual pode ser deformada quando submetida a uma tensão mecânica e retornar à sua forma original, por meio de uma transformação para a fase austenita. Porém, se a barra for novamente submetida a um resfriamento, esta não mais retornará a forma deformada. Para isto, necessitará de uma força para deformá-la novamente.

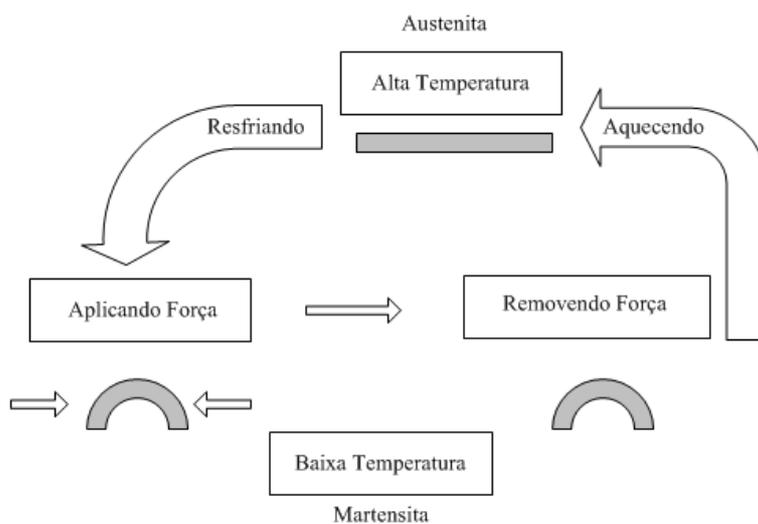


Figura 2.6: Esquema ilustrativo do efeito de memória de forma *one-way*.

Memória de Forma *Two-Way*

Na Figura 2.7, ilustra-se o fenômeno do efeito de memória de forma *two-way* numa barra a qual pode ser deformada quando submetida a uma tensão mecânica e retornar à sua forma original, por meio de um aquecimento para a fase austenita. Porém, se a barra for novamente submetida a um resfriamento, esta retornará a forma deformada.

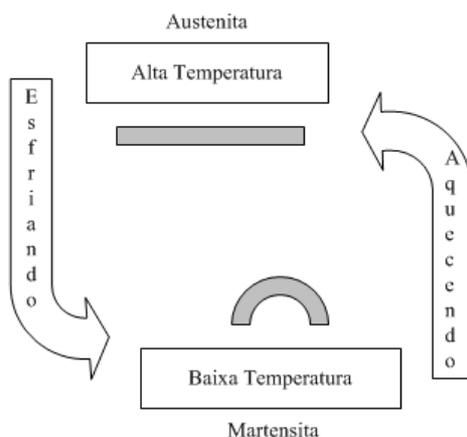


Figura 2.7: Esquema ilustrativo do efeito de memória de forma *two-way*.

2.4 Aplicações das Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma, exibindo funções de sensores e atuadores simultaneamente, apresentam uma propriedade única que não está presente em alguns materiais tradicionalmente usados em aplicações de engenharia. Assim, motiva a sua aplicação em diversas situações.

Em 1970, uma das primeiras aplicações de LMF, desenvolvida pela empresa americana *Raychem*, foi um acoplamento hidráulico do tipo *Cryofit*, ilustrado na Figura 2.8, utilizado pela indústria militar da aeronáutica americana num caça Grumman F-14. Neste caça, utilizou-se uma espécie de luva feita de material com memória de forma como um acoplamento hidráulico para promover a união de dois tubos diferentes numa conexão hidráulica (NASCIMENTO, 2002; PAIVA; SAVI; PACHECO, 2003).

Inicialmente, o acoplamento é imerso em nitrogênio líquido entorno de 196°C e o seu diâmetro é alargado mecanicamente, permanecendo no nitrogênio líquido até a sua montagem no sistema hidráulico. Ele é rapidamente montado nas extremidades das tubulações metálicas que serão unidas. Voltando a temperatura ambiente, ele tende a recuperar o seu menor diâmetro apertando os tubos com uma grande força. Isto cria uma junta que na maioria dos casos é equivalente ou superior as juntas soldadas (PAIVA, 2004).

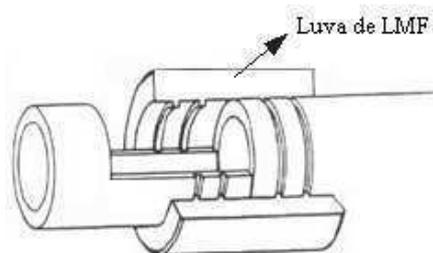


Figura 2.8: Acoplador hidráulico do tipo *Cryofit*.

Na Figura 2.9, ilustra-se um atuador térmico com memória de forma utilizando um arranjo de molas, no qual consiste em utilizar uma mola de LMF contra uma mola de material convencional. Quando o arranjo é aquecido, a mola de LMF é mais resistente do que a mola convencional, empurrando o pistão em uma direção. Caso contrário, quando o arranjo é resfriado, a mola convencional é mais resistente do que a mola de LMF, empurrando o pistão na direção oposta para a passagem do fluxo de óleo.

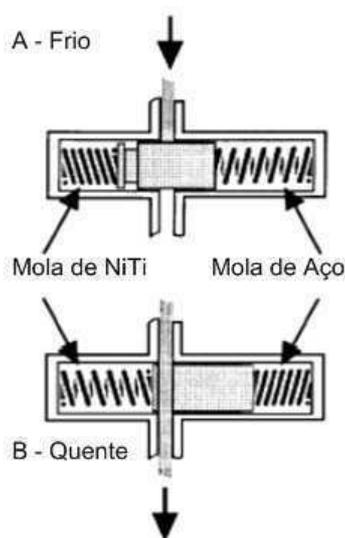


Figura 2.9: Válvula Térmica (FERNANDES; ARIEIRA, 2005).

No campo da medicina os implantes metálicos foram populares por um período muito longo por causa da sua durabilidade. Entretanto, as LMF de NiTi passaram a ser utilizadas somente em aplicações clínicas a aproximadamente duas décadas devido sua elevada resistência à corrosão e biocompatibilidade. Recentemente, as LMF foram empregadas extensamente em cirurgias ósseas, como fio guia em instrumentos endoscópicos, filtros de sangue coagulado e dispositivos auto-expansivos em tratamentos cardiovasculares.

Na Figura 2.10, ilustra-se o filtro de Simon que tem como função filtrar os coágulos que percorrem a corrente sanguínea. Os coágulos são aprisionados no filtro, sendo dissolvidos com o passar do tempo. Para inserção na corrente sanguínea, o filtro é colocado na ponta do cateter na sua forma deformada juntamente com uma solução salina responsável por seu resfriamento. Quando inserido interior do corpo humano pelo cateter, o filtro é aquecido pela corrente sanguínea, a qual promove a recuperação de sua forma original como ilustrado na Figura 2.10.

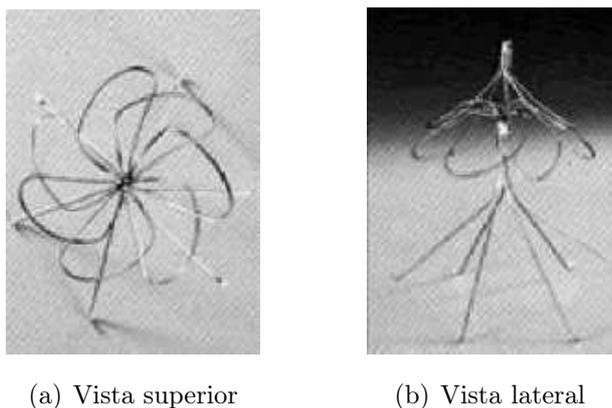


Figura 2.10: Filtro de Simon (PAIVA, 2004).

Na Figura 2.11, ilustra-se alguns dispositivos auto-expansivos (*stents*) que são utilizados para sustentar o diâmetro interno de vasos sanguíneos, esôfago e duto biliar. Para a inserção no vaso sanguíneo, o dispositivo auto-expansivo é colocado pré-comprimido na ponta de um cateter. Quando inserido no interior do corpo humano pelo cateter, o dispositivo auto-expansivo é aquecido pela corrente sanguínea, a qual promove a recuperação de sua forma original, expandindo-se. Além de procedimentos como o de angioplastia para evitar o re-entupimento de um vaso, estes dispositivos também podem ser utilizados no tratamento de aneurismas cerebrais para sustentar as paredes de um vaso enfraquecido.



Figura 2.11: Dispositivos auto-expansivos.

A ortopedia tem explorado as propriedades das LMF como por exemplo em cirurgias ósseas e em luvas destinadas à fisioterapia. A luva, ilustrada na Figura 2.12, é constituída de fios com memória de forma na região dos dedos, reproduzindo muito bem os movimentos dos músculos da mão que permite o seu abrir e fechar. Nessa situação, o efeito de memória de forma reversível é explorado, de tal forma que, quando a luva é aquecida, os fios se contraem fechando a mão, como ilustrado na Figura 2.12 (a). E quando a luva é resfriada, os fios retornam à posição inicial, abrindo a mão, como ilustrado na Figura 2.12 (b). A alternância destas condições, é responsável pelo exercício da musculatura.



(a)



(b)

Figura 2.12: Luva para fisioterapia contendo elementos em LMF (PAIVA, 2004).

Algumas LMF tem sido utilizadas em cirurgias ósseas devido a propriedades de elevada resistência à corrosão e biocompatibilidade. Na Figura 2.13, ilustra-se a aplicação de placas de NiTi nos ossos que vem sendo substituídas pelas placas de Ti e as de aço inoxidável. As placas são resfriadas abaixo de uma temperatura de transformação e fixadas nos ossos, aplicando uma maior pressão, além disso, diminuindo o tempo de recuperação.



Figura 2.13: Placas NiTi para recuperação de fraturas ósseas (ALBERTA, 2005).

A odontologia tem explorado as propriedades das LMF como por exemplo nos aparelhos ortodônticos, limas endodônticas, grampos para consolidação de fissuras na arcada, dentre outras aplicações.

Na Figura 2.14, ilustra-se a utilização de aparelhos ortodônticos com memória de forma para a correção do mal posicionamento dos dentes. Esses exploram o efeito pseudo-elástico, fornecendo uma força de restituição uniforme e praticamente constante, no qual elimina a necessidade de repetidos apertos, além disso, acelera o processo corretivo.

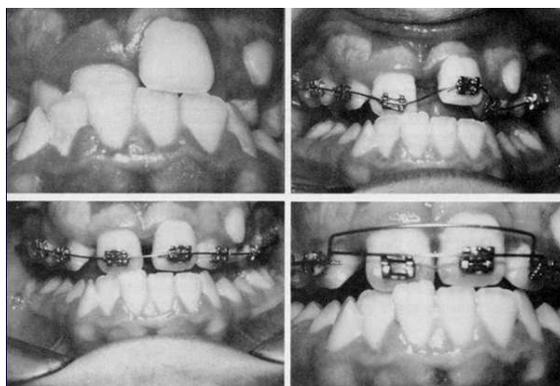


Figura 2.14: Aparelho ortodôntico com resultados de 3 semanas.

Também nas artes plásticas, existe o devido espaço para as LMF, na qual vem sendo usado para criar esculturas móveis. Na Figura 2.15, mostra-se a aplicação de LMF numa escultura de Olivier Deschamps. A escultura mostra uma mulher com uma criança no chão. As esculturas são usadas numa fase martensítica. Quando aquecidas, ocorre uma transformação de fase, no qual faz levantar a criança para o céu.

As LMF são utilizadas em diversas aplicações, sendo o efeito da superelasticidade na maioria das aplicações comerciais.



Figura 2.15: A escultura “*Espoir-Desespoir*” (FERNANDES; ARIEIRA, 2005).

No trabalho de (SONG; MA, 2007), ilustrado na Figura 2.16, mostra-se a viabilidade de usar 2 (dois) fios de LMF para o controle do *flap* de uma aeronave (um fio para mover o *flap* para cima e o outro para mover o *flap* para baixo) por meio de controlador robusto não-linear, substituindo os atuadores convencionais que é acionado por motores elétricos ou atuadores hidráulicos.

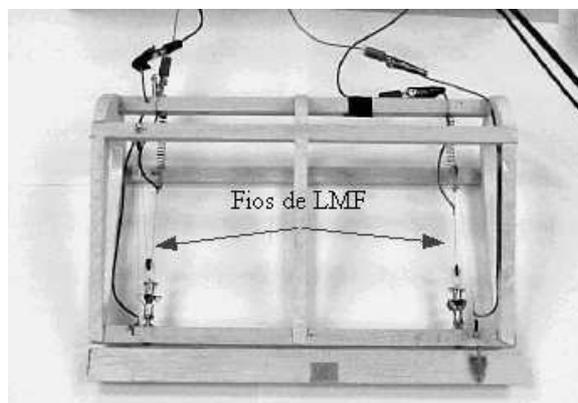


Figura 2.16: O modelo de uma asa com *flap* sendo atuado por fios de LMF.

No trabalho de (KHIDIR et al., 2007), ilustrado na Figura 2.17, mostra-se a viabilidade de utilizar atuadores de LMF ao longo de uma barra flexível, dividindo-a em segmentos igualmente espaçados, para prover um deslocamento linear por meio de um controle ON/OFF.

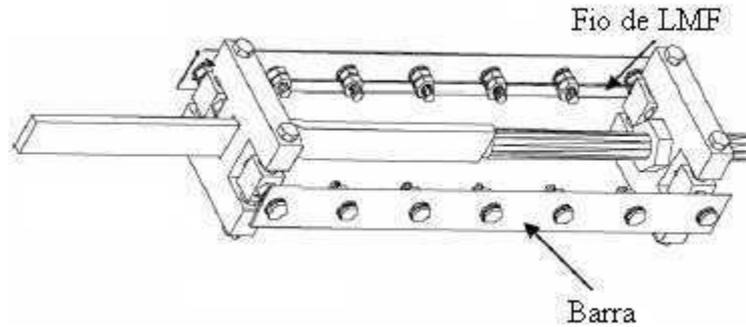


Figura 2.17: Plataforma para prover um deslocamento linear.

No trabalho de (MOALLEM; LU, 2005), ilustrado na Figura 2.18, mostra-se a viabilidade de utilizar fios de LMF no controle não-linear da força para poder controlar a posição da barra flexível, utilizando uma realimentação linearizada por meio da teoria de sistema não-lineares.

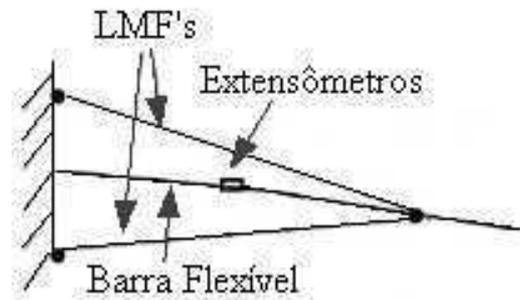


Figura 2.18: Barra flexível atuada por 2 fios de LMF para o controle de posição.

No trabalho de (SILVA; MESQUITA, 2005), ilustrado na Figura 2.19, mostra-se a viabilidade de utilizar fios de LMF para o controle ativo, utilizando o efeito de memória de forma, e passivo, utilizando o efeito pseudoelástico, de vibração de uma viga flexível.

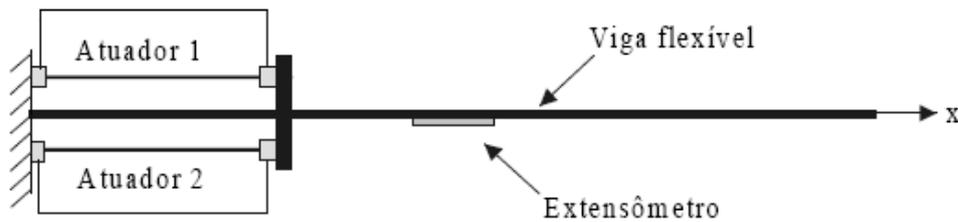


Figura 2.19: Barra flexível atuada por 2 fios de LMF para o controle de vibração.

No trabalho de (GORBET, 1995), ilustrado na Figura 2.20, mostra-se a viabilidade de utilizar fios de LMF numa rotatória diferencial para o controle de posição, utilizando um controlador PI.

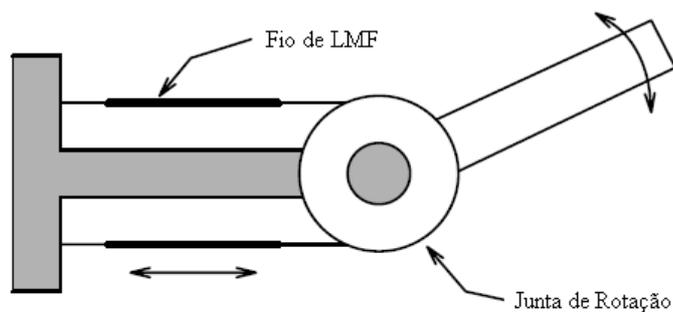


Figura 2.20: Junta rotativa atuada por 2 fios de LMF para o controle de posição.

2.5 Conclusão

Ao expor a definição, os fenômenos e as aplicações das ligas com memória de forma, proporcionou-se uma melhor compreensão dos atuadores termomecânicos. Por meio desta compreensão, pode-se então utilizar as LMF para atuar no controle de deformação de uma barra simplesmente engastada numa plataforma experimental que será tratada nos próximos capítulos.

Capítulo 3

Plataforma Experimental

Neste capítulo, apresenta-se uma plataforma experimental desenvolvida para analisar o comportamento dos fios de ligas metálicas com memória de forma de NiTi e NiTiCu e, também, para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada. Além disso, as implementações elétricas utilizadas nesta plataforma.

3.1 Descrições

A Figura 3.1 ilustra o diagrama da plataforma experimental desenvolvida no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFCG para analisar o comportamento dos fios de LMF de NiTi e NiTiCu e, também, para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada.

A plataforma experimental contém 10 (dez) itens: uma base de sustentação; duas colunas de fixação; uma barra flexível; dois extensômetros de resistência elétrica; uma peça de aplicação de força; dois fios de liga de memória de forma; um LVDT; um shaker; um microtermopar e um escalímetro.

A base de sustentação da plataforma experimental é formada por uma chapa dobrada de aço em forma de “U” com uma espessura de $\# 3/16$ in, uma largura de 25,5 cm, uma altura de 3,5 cm e um comprimento de 100 cm.

A coluna de fixação, com uma altura de 33 cm, é formada por 4 parafusos de rosca M10 fixados na base de sustentação. Nesta coluna são inseridas chapas retangulares de aço com uma espessura de $\# 3/16$ in, uma largura 12 cm e uma altura de 9,4 cm que são fixadas por porcas. Essas chapas são utilizadas para a fixação da barra flexível.

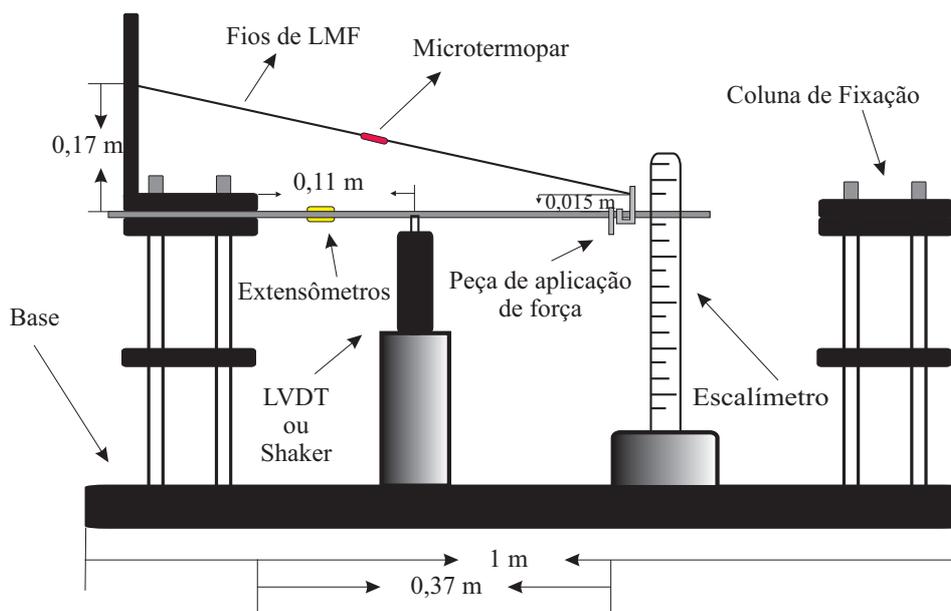


Figura 3.1: Diagrama da plataforma experimental.

A barra flexível de alumínio, com uma espessura de $\# 1/8$ in, uma largura 25 mm e um comprimento de 1 m, foi simplesmente engastada em uma das colunas fixação, mas podendo ser também engastada nas duas colunas. Nesta barra foram colados dois extensômetros da Excel Sensores com auto-compensação de temperatura, apresentando uma resistência elétrica de 350Ω e um fator de sensibilidade de 2,1. Estes extensômetros são usados para medir o valor de deformação na barra quando aplicado uma força em sua extremidade livre. Esta força é aplicada numa peça formada por uma chapa usinada de alumínio com uma espessura de 2 mm, por meio de pesos calibrados da OHAUS.

Os fios de ligas de memória de forma de NiTi ou NiTiCu, com 0,515 m de comprimento e 0,29 mm de diâmetro, são utilizadas para provocar uma deformação da barra flexível. Estes fios são fixados na coluna de fixação, por meio de uma chapa dobrada de aço em forma de “L” com uma espessura de $\# 3/16$ in, uma largura de 12 cm, uma altura de 22,5 cm e um comprimento de 9,4 cm, e na barra, por meio de uma chapa dobrada e usinada de alumínio com uma espessura de 2 mm.

Um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) de ± 5 mm da Solartron é utilizado para medir a deflexão na barra. Este LVDT é fixado numa chapa dobrada de alumínio em forma de “L” com uma espessura de 1 mm, uma largura de 2,3 cm, uma altura de 3,5 cm e um comprimento de 19 cm, contendo uma base de sustentação de madeira de forma circular com uma espessura de 20 mm e um diâmetro de 29 cm.

O vibrador eletrodinâmico ET-132 (*shaker*), da *Labworks Inc.*, é utilizado na plataforma para provocar uma perturbação externa na barra. Para isto, fixou-se um bastão de silicone na ponta do “*shaker*” devido as suas pequenas dimensões.

Um microtermopar do tipo K, com $100\ \mu\text{m}$ de diâmetro, é utilizado para medir a temperatura nos fios de LMF. Por último, um escalímetro de alumínio, fixado num torno de bancada na base da plataforma, é utilizado para visualizar a deflexão máxima provocada pelos atuadores de força na barra.

3.1.1 Implementação Elétrica

A Figura 3.2 ilustra o diagrama de blocos da *interface* elétrica da plataforma para analisar o comportamento dos fios de ligas metálicas com memória de forma, apresentando a estrutura da plataforma experimental, um PC, uma fonte de alimentação da Agilent E3632A, três multímetros digitais da HP 34401A, um circuito de medição de deformação e um circuito de medição de temperatura.

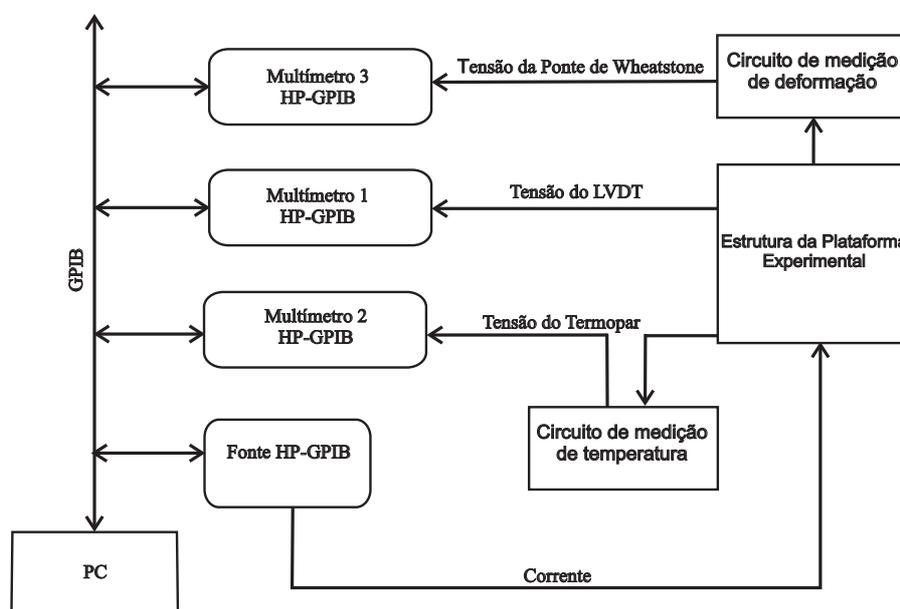


Figura 3.2: Diagrama de blocos da *interface* elétrica da plataforma para análise dos fios de LMF.

O circuito de medição de deformação, ilustrado na Figura 3.3, foi projetado para obter o valor da deformação na barra flexível quando aplicado uma força em sua extremidade livre.

Este circuito é alimentado com uma tensão elétrica de +12 e -12 V, no conector J2, de modo que os diodos D1 e D2 (1N4007) fiquem polarizados diretamente respectivamente, evitando queimar algum componente eletrônico. Se estes diodos são polarizados diretamente, os diodos D3 e D4 (LED) também ficam polarizados diretamente, emitindo luz que indica uma alimentação correta do circuito. O regulado de tensão (LM317) é utilizado para que a 1/2 ponte de Wheatstone, com dois extensômetros de resistência elétrica de 350 Ω (“ERE 1”, extensômetro superior, e “ERE 2”, extensômetro inferior), inseridos no conector J1, e duas resistências elétricas de 315 Ω sejam alimentados por uma tensão elétrica ajustável de 1,2 até 3,5 V por meio de um potenciômetro 500 Ω (R5). O circuito apresenta linearidade e uma sensibilidade duas vezes maior do que uma ponte usando apenas um extensômetro. O sinal de saída da ponte passa por um circuito de condicionamento composto de um amplificador de instrumentação de alta precisão (INA101), projetado para amplificar o sinal de nível baixo em 201 vezes, ajustável por meio de um potenciômetro de 500 Ω (R8), e de um filtro passa-baixa com uma frequência de 159 Hz para eliminar componentes indesejadas do sinal medido. Em seguida, este sinal é somado a um sinal DC de 1,16 V, por meio de dois circuitos somadores inversores que utiliza dois amplificadores operacionais (TL081) para obter apenas tensões positivas no sinal de saída no conector J3.

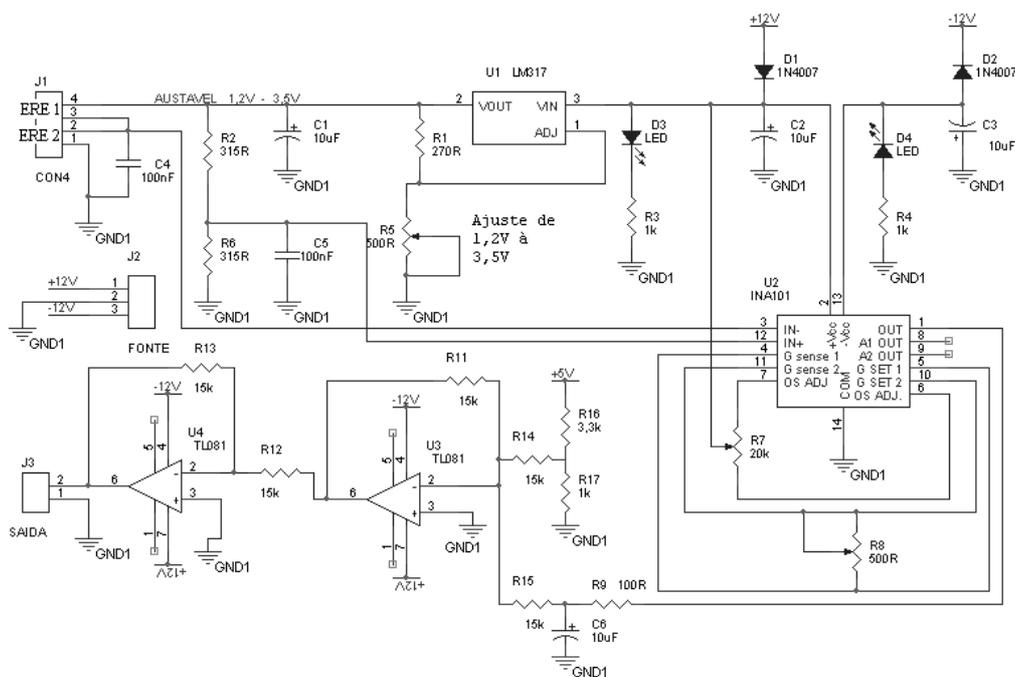


Figura 3.3: Diagrama elétrico do circuito de medição de deformação.

O circuito de medição de temperatura, ilustrado na Figura 3.4, foi projetado para obter o valor de temperatura nos fios de LMF.

Este circuito é alimentado com uma tensão elétrica de +12 V, no conector J1, de modo que o diodo D1 (1N4007) fique polarizado diretamente, evitando queimar algum componente eletrônico. Se este diodo é polarizado diretamente, o diodo D2 (LED) também fica polarizado diretamente, emitindo luz que indica uma alimentação correta do circuito. O circuito integrado AD595 da Analog Devices, que é um amplificador de instrumentação com compensador de junta fria do termopar do tipo K, conectado no conector J2, numa microplaqueta monolítica, é utilizado para combinar uma referência de 0 °C com um amplificador pré-calibrado, produzindo uma elevação de 10 mV/°C como tensão de saída diretamente do sinal advindo do termopar. Este sinal passa por um circuito de condicionamento de sinal composto por um filtro passa-baixa, com uma frequência de 80 Hz, para eliminar componentes indesejadas do sinal de saída medido no conector J3.

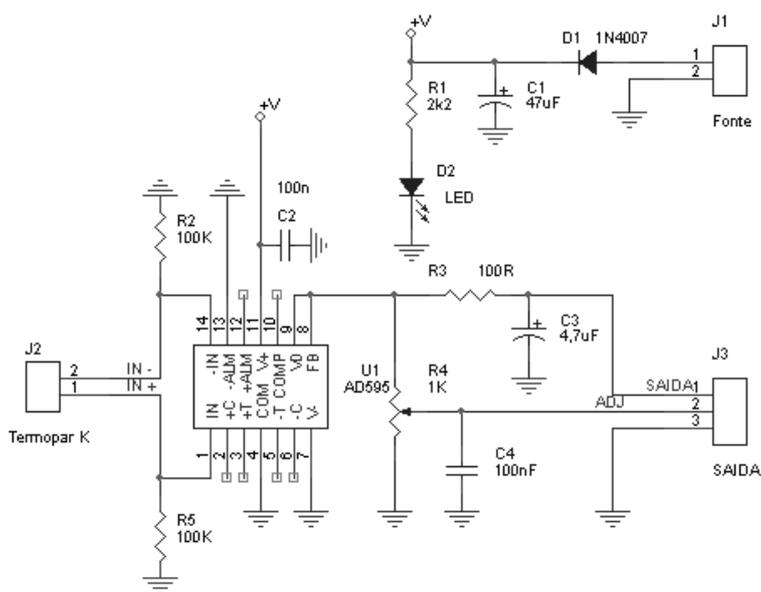


Figura 3.4: Diagrama elétrico do circuito de medição de temperatura.

De acordo com a Figura 3.2, a plataforma para análise do comportamento dos fios de LMF utiliza uma instrumentação geral baseada na *interface* de comunicação GPIB (*General Purpose Interface Bus*) para leitura e escrita de dados. O primeiro multímetro da HP34401 realiza a medição da tensão de saída do LVDT conectado à estrutura da plataforma, obtendo a deflexão na barra. O segundo multímetro realiza a medição da tensão de saída do circuito de medição de temperatura conectado à estrutura da plataforma por meio do microtermopar, obtendo a temperatura nos fios de LMF. O terceiro multímetro da HP34401 realiza a

medição da tensão de saída do circuito de medição de deformação conectado à estrutura da plataforma experimental por meio dos ERE's, obtendo a deformação na barra flexível. Por último, a fonte de alimentação da HP3632, programada para funcionar como uma fonte de corrente, realiza aquecimento dos fios de LMF por efeito Joule.

Para isto, desenvolveu-se uma interface gráfica numa planilha eletrônica que realizar a comunicação com os instrumentos de medição com *interface* GPIB, ilustrada na Figura 3.5, juntamente com um código em Visual Basic, apresentado no Apêndice D e ilustrado em diagrama de blocos na Figura 3.6.

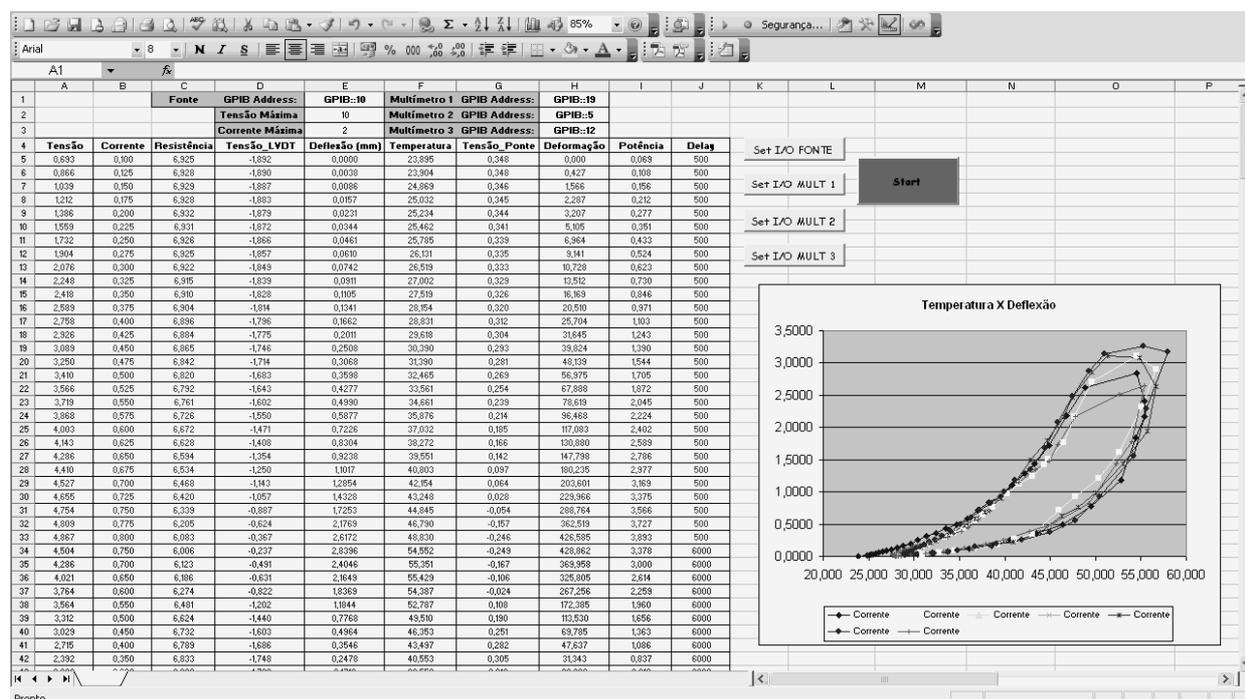


Figura 3.5: Janela desenvolvida na planilha eletrônica.

Inicialmente, deve-se pressionar os botões *SET I/O Fonte*, *SET I/O MULT 1*, *SET I/O MULT 2* e *SET I/O MULT 3* na *interface* gráfica para configurar a fonte de alimentação no canal 10 e os multímetros 1, 2 e 3 nos canais 19, 5 e 12 de comunicação GPIB como mostrado na Figura 3.6, respectivamente. Em seguida, ao pressionar o botão *Start*, configura-se a fonte de alimentação para uma fonte de corrente limitada em 10V e 2A, definidos na própria *interface*, que espera 0,5 ou 6 s, definido na coluna J, de acordo com o ciclo de aquecimento ou resfriamento do fio de LMF respectivamente. Finalizado este tempo, o código escrever na fonte de alimentação um valor de corrente elétrica, indicado na coluna B da planilha eletrônica e, em seguida, lê o valor da tensão elétrica indicado na fonte de alimentação e escreve na coluna A da planilha eletrônica. Com o fornecimento de corrente elétrica

ou não, dependendo do ciclo, aos fios de LMF, o código lê no multímetro 1 a tensão de saída do LVDT, no multímetro 2 a tensão de saída do circuito de medição de temperatura, no multímetro 3 a tensão de saída do circuito de medição de deformação e escreve estes valores nas colunas D, F e H respectivamente. Por fim, o código calcula o valor da deflexão, da temperatura e da deformação e escreve nas colunas E, F e H da planilha eletrônica respectivamente. Isto se repete a cada interação durante 5 ciclos completos (aquecimento + resfriamento).

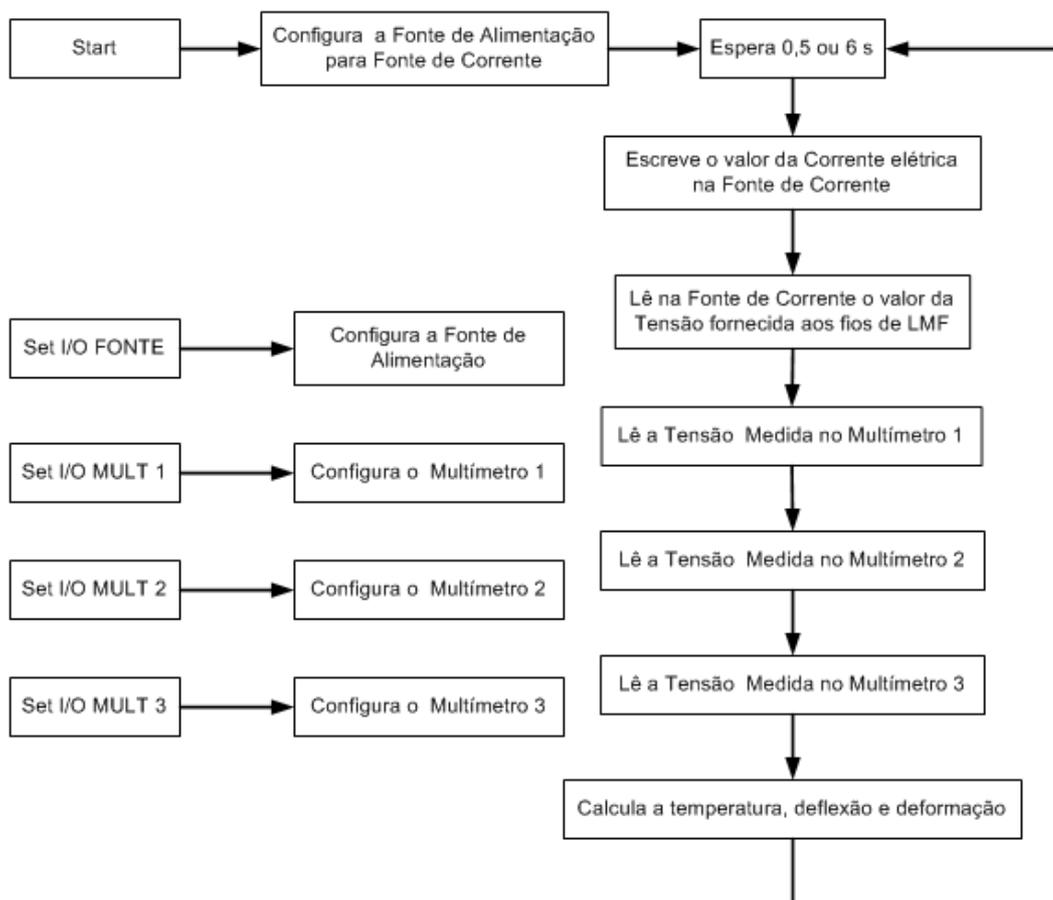


Figura 3.6: Diagrama de blocos do código desenvolvido em Visual Basic.

A Figura 3.7 ilustra o diagrama de blocos da *interface* elétrica da plataforma para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada, apresentando a estrutura da plataforma experimental, uma placa microprocessada, um PC, uma fonte de alimentação da Agilent E3632A, um gerador de função da HP 33120A, um circuito de acionamento, um circuito de medição de temperatura e um circuito de medição de deformação.

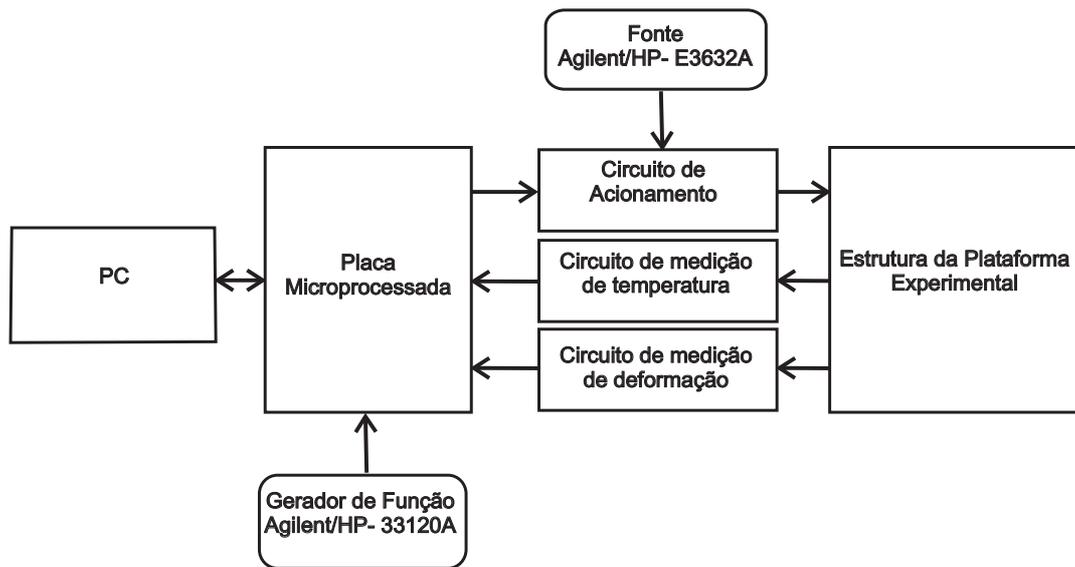


Figura 3.7: Diagram de blocos da *Interface* elétrica da plataforma para o controle de deformação na barra flexível.

O circuito de acionamento, ilustrado na Figura 3.8, foi projetado para controlar o acionamento dos fios atuadores de LMF. Além disso, o circuito permite medir o valor de corrente elétrica que está sendo submetido aos fios, por meio da queda de tensão sobre um resistor *shunt* de $0,22 \Omega$ inserido no circuito.

Este circuito é alimentado com uma tensão elétrica de +12 e -12 V, no conector J1, de modo que os diodos D1 e D2 (1N4007) fiquem polarizados diretamente respectivamente, evitando queimar algum componente eletrônico. Se estes diodos são polarizados diretamente, os diodos D3 e D4 (LED) também ficam polarizados diretamente, emitindo luz que indica uma alimentação correta do circuito. Além disso, o circuito é alimentado por uma fonte de tensão da HP E3632A, no conector J2, chaveada pelos transistores BC547, 2N2219 e IRFZ46, por meio de um sinal PWM, no pino 3 do conector J3, enviado pela placa microprocessada. Neste circuito foi inserido um resistor *shunt*, de $0,22 \Omega$ no terminal da fonte do transistor IRFZ46, para poder medir a corrente elétrica que passa pelos fios de LMF. Para isto, medi-se o valor da queda de tensão neste resistor e, em seguida, amplifica este valor, por meio de um amplificador de instrumentação de alta precisão (INA101), projetado para amplificar o sinal em 5 vezes. O sinal de saída deste amplificador passa por um filtro passa-baixa, com uma frequência de 159 Hz, para eliminar componentes indesejadas do sinal medido no pino 2 do conector J3. Devido aos conversores A/D da placa microprocessada, este circuito só pode fornecer uma corrente elétrica máxima de 2,27 A aos fios de LMF.

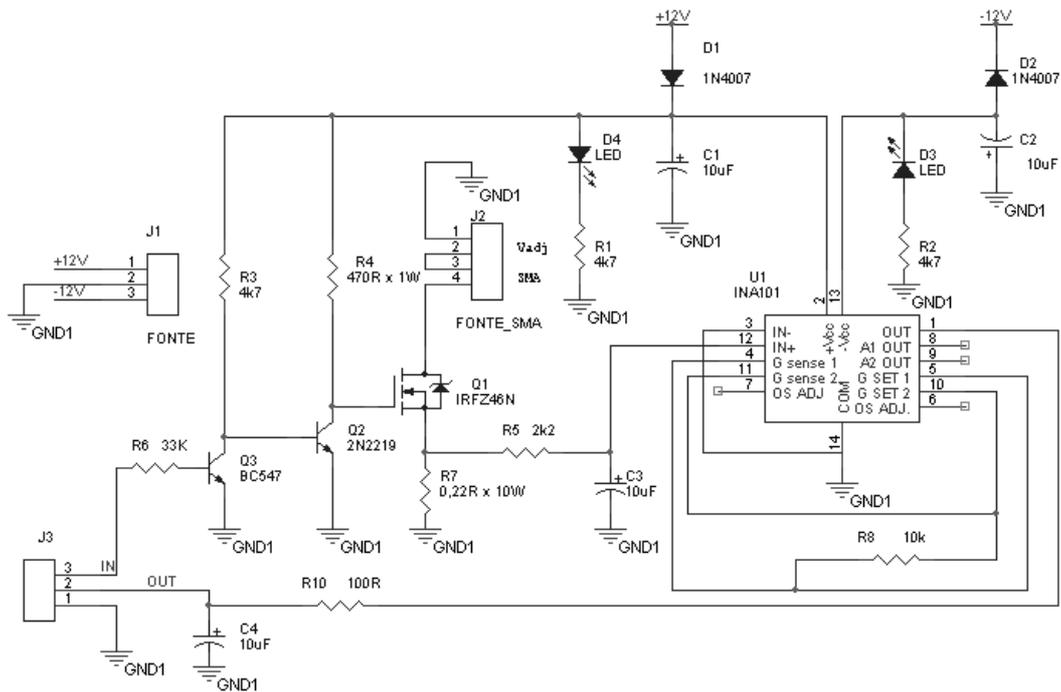


Figura 3.8: Diagrama elétrico do circuito de acionamento.

Os circuitos de medição de deformação e de temperatura foram utilizados na plataforma para o controle de deformação numa barra flexível, objetivando obter o valor da deformação na barra, quando aplicada uma força em sua extremidade livre, e o valor da temperatura nos fios de LMF, respectivamente.

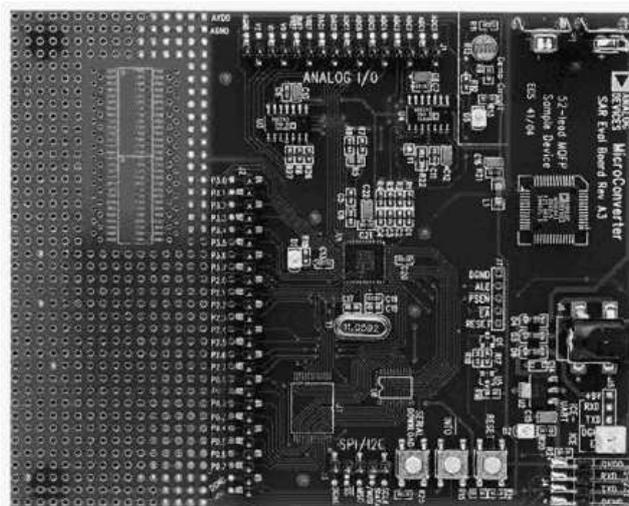


Figura 3.9: Foto da placa microprocessada da Analog Devices.

A placa microprocessada da Analog Devices, ilustrada na Figura 3.9, foi utilizada na plataforma para o controle de deformação numa barra flexível. Para esta implementação desenvolveu-se um código em linguagem C no programa da KEIL da μ Vision, apresentado no Apêndice E e ilustrado em diagrama de blocos na Figura 3.10, para controlar a tensão elétrica fornecida aos fios, fazendo passar uma corrente elétrica que realiza o seu aquecimento por efeito Joule. Essa placa é conectada ao PC executando o programa LabVIEW para visualizar as medições numa *interface* gráfica, por meio da porta de comunicação serial (RS-232) do PC.

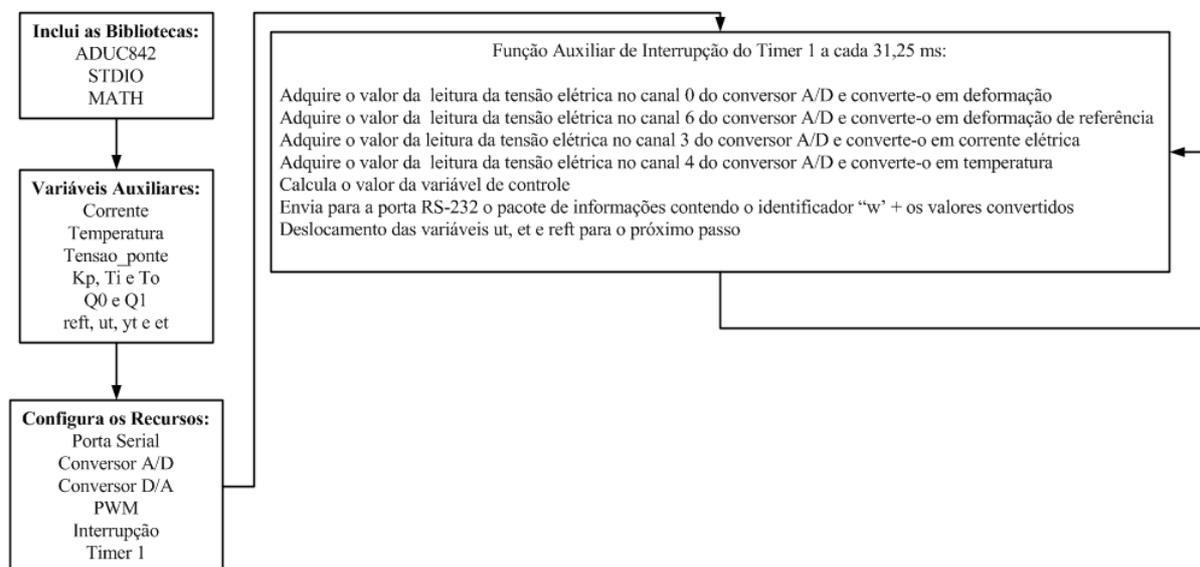


Figura 3.10: Diagrama de blocos do código desenvolvido em linguagem C.

O código de aquisição e controle de dados, implementado na placa microprocessada, inicia com a inclusão das bibliotecas do ADuC842, STDIO e MATH e a definição das variáveis auxiliares que foram utilizadas no cálculo da deformação, corrente, temperatura e das variáveis de controle. Em seguida, configura-se a porta de comunicação serial (RS-232) em 57600 bps (bits por segundo), os conversores A/D e D/A, o sinal PWM, a interrupção e o timer 1. A cada 31,25 ms a interrupção do timer 1 é atendida e executa, realizando a leitura da tensão elétrica nos canais 0, 6, 3 e 4 do conversor A/D e convertendo em deformação (yt), deformação de referência (refl), corrente elétrica (I) e temperatura (T). Por fim, este código envia para o PC um pacote de informações contendo um identificador de pacote, representado pela letra “w”, e os valores convertidos, por meio da porta de comunicação serial do PC. Este pacote de informações apresenta os valores das deformações e os valores da corrente elétrica e temperatura nos fios de LMF, respectivamente.

De acordo com as Figuras 3.7 e 3.10, a placa microprocessada é conectada ao circuito de medição de deformação, por meio do canal 0 do conversor A/D do microcontrolador, ao circuito de acionamento, por meio do canal 3 do conversor A/D, ao circuito de medição de temperatura, por meio do canal 4, e conectada ao gerador de funções 33120A da Agilent, limitada em 1 Vpp e *offset* de 1 V, por meio do canal 6 do conversor A/D.

As aquisições do valor da tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone (V_0), no circuito de medição de deformação, o valor da tensão de saída do gerador de funções (V_g), o valor da tensão de saída do circuito integrado AD595 (V_T), no circuito de medição de temperatura e o valor da queda de tensão no resistor *shunt* para obter o valor da corrente elétrica fornecida aos fios de LMF pela fonte de tensão da Agilent E3632A, no circuito de acionamento, são realizadas pelo conversor A/D do microcontrolador ADuC na placa microprocessada. Estes valores são convertidos pelo microcontrolador por meio das Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

$$\varepsilon = \frac{2}{K} \frac{V_0}{V_{EX}} \left(1 + \frac{2R_L}{R_G}\right) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = 250V_g + 150 \quad (3.2)$$

$$T = V_T * 100 \quad (3.3)$$

$$I = \frac{V_I}{5 * 0,22} \quad (3.4)$$

A Equação 3.1 é rege o funcionamento da 1/2 ponte de Wheatstone ilustrada na Figura 3.11. Com esta equação, pode-se determinar a deformação no local onde o extensômetro foi instalado, conhecendo o fator da sensibilidade extensômetro (K), o valor da tensão elétrica que excita a ponte de Wheatstone (V_{EX}), a resistência dos fios (R_L) que conecta o extensômetro a ponte de Wheatstone, a resistência do extensômetro (R_G) e tensão de saída da ponte de Wheatstone (V_0).

A fonte de tensão da Agilent E3632A, limitada em 6,5 V e 1,5 A, é conectada ao circuito de acionamento para fornecer uma tensão elétrica chaveada pelo transistor (IRFZ46) aos fios de LMF na plataforma experimental, por meio de um sinal PWM de 2,05 kHz enviado pela placa microprocessada. Essa tensão elétrica chaveada faz gerar um corrente elétrica que aquece os fios de LMF por efeito Joule, originando uma deformação (contração) dos fios e, em consequência, uma deformação na barra.

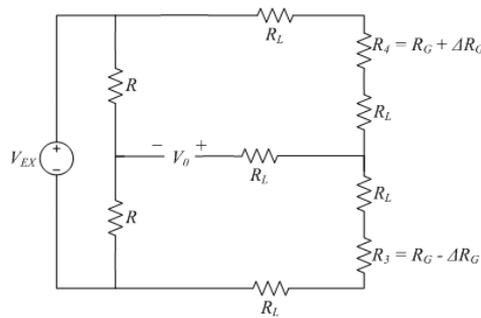
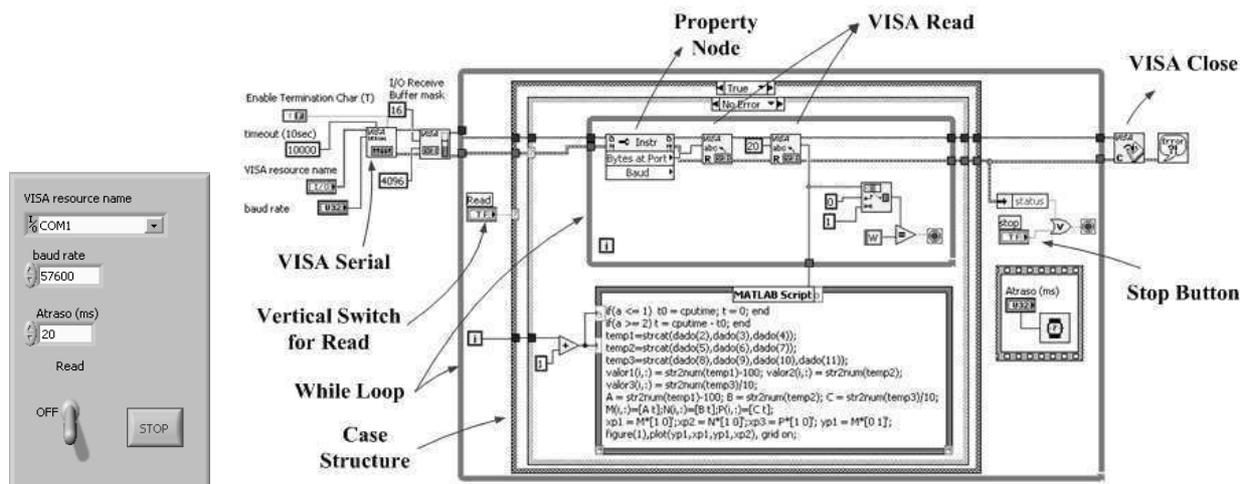


Figura 3.11: Diagrama elétrico da 1/2 ponte de Wheatstone.

Um programa, cuja janela é ilustrada na Figura 3.12, foi desenvolvido no programa LabVIEW para receber o pacote de informações enviado pela placa microprocessada e separar as informações contidas neste pacote. Essa separação é feita pelo bloco do MATLAB Script, no diagrama de blocos, para visualizar as informações num gráfico em tempo real.



(a) Painel frontal

(b) Diagrama de blocos

Figura 3.12: Janela desenvolvida no programa LabVIEW.

Nesse programa que apresenta uma estrutura de programação orientada pelo fluxo de dados da esquerda para a direita, o VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) é um controlador usado para comunicar-se com a porta de comunicação serial (RS-232) do PC de maneira bastante simplificada. Para isto, deve-se informar a porta e a taxa de comunicação nas entradas *VISA resource name* e *Baud rate* respectivamente, no painel frontal, para que o *VISA Serial* inicialize a comunicação com a porta RS-232.

O programa entra no laço (*While Loop*) com interações de 20 ms e espera a chave *Read* ser ligada, no painel frontal, para habilitar o *Case Structure*. No *Case Structure*, inseriu-se mais um laço contendo o *Property Node*, o qual identifica a quantidade de *bytes* enviado para a porta RS-232 e envia-o para o primeiro *VISA Read*.

Para eliminar erro na leitura da porta RS-232, foi inserido mais um *VISA Read* que ler 20 *bytes* de dados na forma de *strings*. Se o pacote de informações é identificado por meio do identificador de pacote, o programa sai do segundo laço e envia-o para o MATLAB Script que tem a função de separar as informações enviadas pela placa microprocessada e visualizar as informações num gráfico em tempo real. Caso contrário, o programa fica no segundo laço até identificar um pacote contendo o identificador correto.

3.2 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se uma plataforma experimental desenvolvida para analisar o comportamento dos fios de LMF de NiTi e NiTiCu, na qual será escolhido o fio com melhor desempenho para ser utilizado num sistema de controle de deformação. Além disso, esta plataforma é, também, utilizada para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada, servindo de protótipo para outras aplicações envolvendo controle de deformação.

Capítulo 4

Descrição dos Experimentos e Resultados Obtidos

Neste capítulo, apresenta-se a preparação dos fios de LMF de NiTi e NiTiCu e os resultados obtidos da plataforma experimental, desenvolvida para testar o comportamento destes fios e, também, para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada.

4.1 Preparação dos Fios de LMF

Inicialmente, realizou-se a preparação dos fios de LMF de NiTi e NiTiCu que serão utilizados no presente trabalho. Isto foi feito com o objetivo de obter o efeito de memória de forma nos fios. O fenômeno é obtido após submeter os fios a um processo de tratamento térmico e, em seguida, a um treinamento termomecânico.

4.1.1 Tratamento Térmico

O tratamento térmico foi realizado no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), colocando os fios de NiTi e NiTiCu, com 1 m de comprimento e 0,29 mm de diâmetro, em um forno elétrico a uma temperatura constante de 500 °C por um período de 20 minutos. Em seguida, retirou-se para um rápido resfriamento, sendo preferido água para extinguir o calor ou ar frio, e permitir o aparecimento das transformações de fase que inicialmente estavam inibidas, originando o seu efeito de memória de forma.

4.1.2 Treinamento Termomecânico

Após o tratamento térmico, os fios de NiTi e NiTiCu passaram por um processo de treinamento termomecânico. Para isto, utilizou-se a plataforma ilustrada na Figura 4.1.



Figura 4.1: Foto da plataforma utilizada para treinamento termomecânico dos fios de LMF.

Nesta plataforma, o fio de LMF foi fixado na base de sustentação e tracionado axialmente por meio de pesos calibrados da OHAUS. Esses pesos devem gerar uma força por unidade de área de aproximadamente 180 MPa nos fios. Assim sendo para o fio usado, que apresenta 1 m de comprimento e 0,29 mm de diâmetro, aplicou-se uma massa de 1 Kg para produzir uma tensão de 180 MPa.

A Figura 4.2 ilustra o diagrama de blocos da interface elétrica da plataforma para treinamento, apresentando a estrutura da plataforma para treinamento, uma placa microprocessada, uma fonte de alimentação da Agilent E3632A e um circuito de acionamento.

O circuito de acionamento, ilustrado na Figura 3.8, foi utilizado na plataforma para treinamento apenas para controlar o acionamento dos fios atuadores de LMF, provocando o aquecimento ou resfriamento destes fios. Este circuito é alimentado por uma fonte de tensão da Agilent E3632A chaveada pelo transistor (IRFZ46) por meio de um sinal PWM de 2,05 kHz enviado pela placa microprocessada.

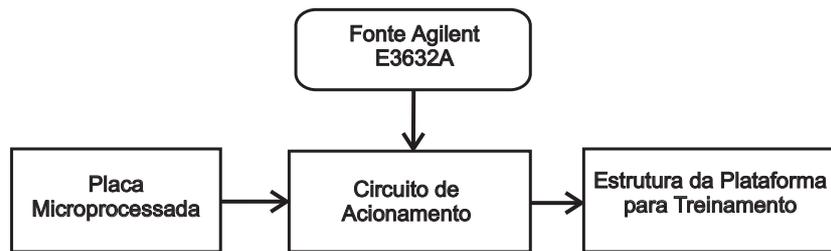


Figura 4.2: Diagrama de blocos da plataforma utilizada para treinamento.

A placa microprocessada da Analog Devices, ilustrada na Figura 3.9, foi utilizada na plataforma de treinamento para a implementação do treinamento termomecânico dos fios de LMF. Para esta implementação, desenvolveu-se um código em linguagem C no programa da KEIL da μ Vision, apresentado no Apêndice B e ilustrado no diagrama de blocos na Figura 4.3, para que o fio alcançasse seu efeito de memória de forma, por meio dos ciclos de aquecimento e resfriamento, associando uma forma a cada fase (austenita e martensita).

O código do treinamento termomecânico, implementado na placa microprocessada, inicia com a inclusão das bibliotecas do ADuC842 e STDIO e a definição das variáveis auxiliares que foram utilizadas na verificação do tempo total dos ciclos (aquecimento e resfriamento). Em seguida, configura-se a porta de comunicação serial (RS-232) em 115200 bps, os conversores A/D e D/A, o sinal PWM, a interrupção e o TIC (Contador de Intervalo de Tempo). A cada ciclo, a placa microprocessada envia um sinal PWM de 100 % no ciclo de aquecimento e 0% no ciclo de resfriamento com uma frequência de 2,05 kHz para a placa de acionamento, respectivamente. Este sinal faz chavear o transistor (IRFZ46) na placa de acionamento, na qual é conectada a uma fonte de tensão da Agilent E3632. Com este chaveamento, gera-se pulsos de corrente elétrica com um período de 30 s e *duty-cycle* de 16,67%. O valor destes pulsos são determinados pelas propriedades da composição da liga.

No treinamento termomecânico, inicia-se com os fios de LMF estendido e numa fase martensita por 25 segundos (ciclo de resfriamento), no qual a corrente elétrica é zero. E, em seguida, aplica-se um pulso de corrente elétrica por 5 segundos, no qual os fios são contraídos devido ao aquecimento dos fios por efeito Joule, atingindo uma fase austenita (ciclo de aquecimento). Este pulso aumenta a temperatura dos fios que alcança seu efeito de memória de forma, assim, associando uma forma a cada fase, por meio dos ciclos de aquecimento e resfriamento. Este procedimento foi repetido por 3000 ciclos.

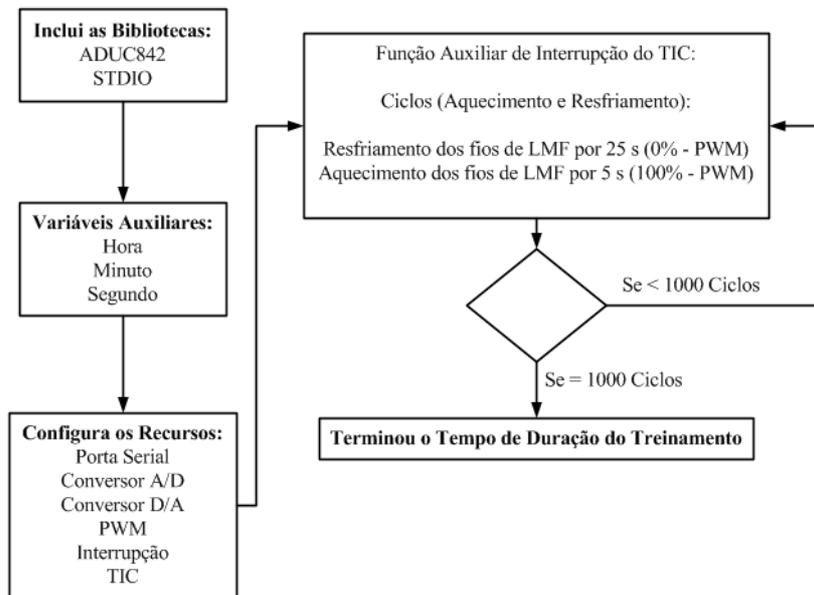


Figura 4.3: Diagrama de blocos do código desenvolvido em linguagem C para o treinamento.

4.2 Medição de Deformação Utilizando o Método dos 4 Fios na Ausência dos Atuadores de Força

Nos primeiros experimentos usou-se o método dos 4 fios para obtenção da variação da resistência elétrica dos ERE's com o multímetro digital da Agilent 34401A como ilustrado na Figura 4.4. Para isto, uma força foi aplicada na extremidade livre da barra flexível, por meio de massas calibrados de 50 até 400 g na peça de aplicação de força. Isto foi feito com o objetivo de utilizar o método dos 4 fios para calcular o valor da deformação (ε) provocada pela força aplicada na extremidade livre da barra, no ponto onde foram colados os extensômetros, por meio da Equação A.12.

O método dos 4 fios, ilustrado na Figura 4.5, foi utilizado devido ao fato de eliminar a resistência dos fios conectados ao multímetro e possibilitar medir valores muito baixos de resistência elétrica (de ohms, mili-ohm ou micro-ohm) com bastante precisão. Nesse método, a fonte de corrente DC fornece uma corrente elétrica estabilizada, medida pelo amperímetro (AM), que passa pela resistência a ser medida. Essa corrente faz gerar uma tensão na resistência, a qual é medida com um voltímetro (VM) de alta impedância por meio dos dois fios condutores P1 e P2. Desta forma, a resistência dos condutores exerce um efeito desprezível sobre a resistência a ser medida.

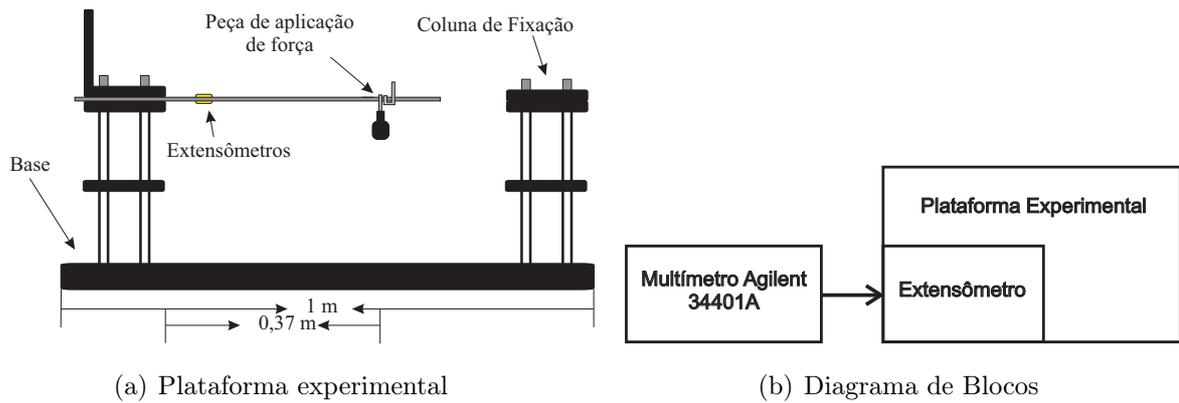


Figura 4.4: Diagrama da plataforma utilizado na medição de deformação sem as LMF.

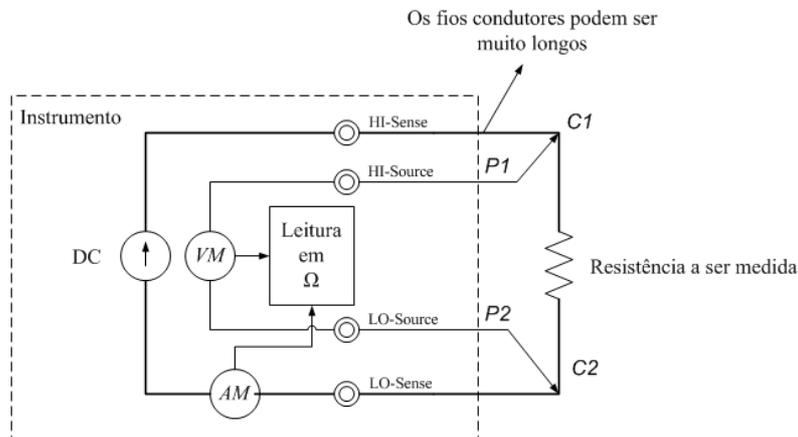


Figura 4.5: Diagrama elétrico do método dos 4 fios.

Os valores medidos pelo amperímetro e pelo voltímetro são computados pelo instrumento, que utiliza a lei de Ohm ($R = V/I$) para indicar o valor da resistência a ser medida (KUPHALDT, 2003).

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são mostrados os resultados experimentais da medição de deformação utilizando o método dos 4 fios para o extensômetro 1, colado na parte superior da barra, e para o extensômetro 2, colado na parte inferior da barra, respectivamente sem a presença dos atuadores de força. Nestas Tabelas, R_0 é a resistência inicial do extensômetro, R_f é a resistência final do extensômetro, ΔR é a variação da resistência do extensômetro ($|R_f - R_0|$) e $\Delta R/R_0$ é a variação relativa da resistência do extensômetro. Na Tabela 4.3, mostra-se o valor médio da deformação, no local onde foi colado o extensômetro, obtido a partir das Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1: Medição de deformação utilizando o extensômetro 1.

F(N)	R_0 (Ω)	R_f (Ω)	ΔR (Ω)	$\Delta R/R_0$	Deformação ($\mu m/m$)
0,5	350,22	350,27	0,050	0,0001428	67,66
1,0	350,22	350,32	0,100	0,0002855	135,32
1,5	350,22	350,37	0,150	0,0004283	202,99
2,0	350,22	350,42	0,200	0,0005711	270,65
2,5	350,22	350,47	0,250	0,0007138	338,31
3,0	350,22	350,52	0,300	0,0008566	405,97
3,5	350,22	350,57	0,350	0,0009994	473,64
4,0	350,22	350,62	0,400	0,0011421	541,30

Tabela 4.2: Medição de deformação utilizando o extensômetro 2.

Força (N)	R_0 (Ω)	R_f (Ω)	ΔR (Ω)	$\Delta R/R_0$	Deformação ($\mu m/m$)
0,5	350,12	350,07	0,050	0,0001428	67,68
1,0	350,12	350,02	0,100	0,0002856	135,36
1,5	350,12	349,97	0,150	0,0004284	203,04
2,0	350,12	349,92	0,200	0,0005712	270,73
2,5	350,12	349,87	0,250	0,0007140	338,41
3,0	350,12	349,82	0,300	0,0008568	406,09
3,5	350,12	349,77	0,350	0,0009997	473,77
4,0	350,12	349,72	0,400	0,0011425	541,45

Tabela 4.3: Deformação média na ausência dos fios de LMF.

Força (N)	Deformação ($\mu m/m$)
0,5	67,67
1,0	135,34
1,5	203,02
2,0	270,69
2,5	338,36
3,0	406,03
3,5	473,70
4,0	541,38

4.3 Medição de Deformação Utilizando o Método da Ponte de Wheatstone na Ausência dos Atuadores de Força

Neste experimento, usou-se a 1/2 ponte de Wheatstone, com 2 resistores de 330Ω e 2 extensômetros de resistência elétrica de 350Ω , para obtenção da variação de tensão elétrica na saída desta por meio de um multímetro digital da Agilent 34401A. Para isto, uma força foi aplicada na extremidade livre da barra flexível por meio de massas calibradas de 50 até 400 g na peça de aplicação de força. Isto foi feito com o objetivo de utilizar o método da ponte de Wheatstone para calcular o valor da deformação (ε) provocada pela força aplicada na barra, no ponto onde foram colados os extensômetros, por meio da Equação 3.1.

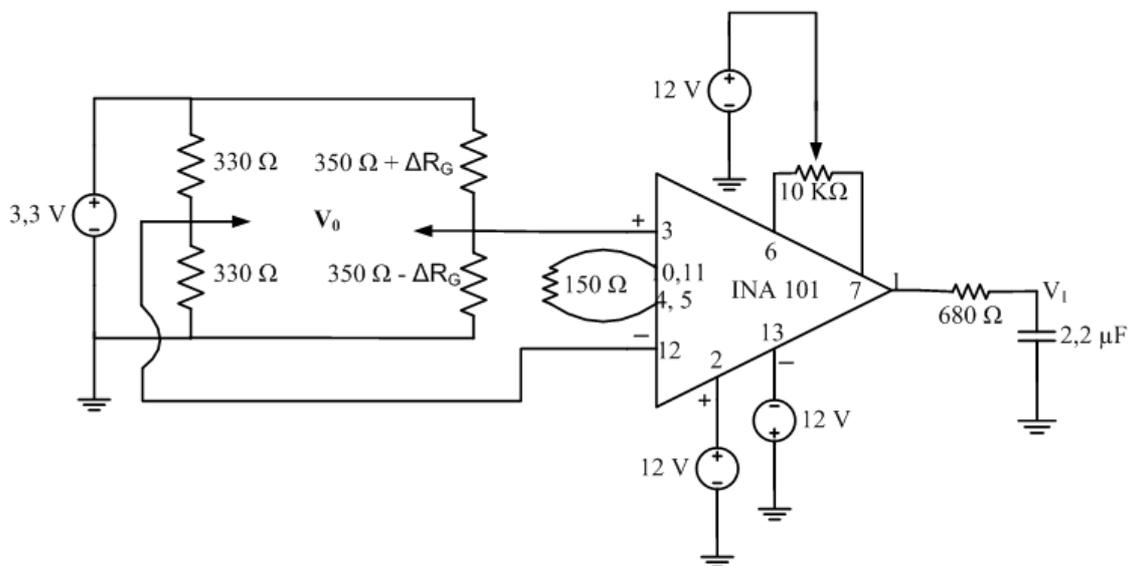


Figura 4.6: Diagrama elétrico da montagem experimental.

O sinal de saída da ponte (V_0), ilustrado no diagrama elétrico da Figura 4.6, passa por um condicionamento de sinal composto por um amplificador de instrumentação de alta precisão (INA101) com um ganho de 267 para amplificar o sinal de baixo nível e por um filtro passa-baixa com uma frequência de 106 Hz, para eliminação de componentes indesejadas no sinal a ser medido. Além disso, a tensão de saída da ponte é ajustada pelo *off-set* do amplificador para que o valor da tensão de saída da ponte amplificada seja de zero quando a deformação inicial for nula.

Na Tabela 4.4 são mostrados os resultados experimentais da medição de deformação na ausência dos atuadores de força, utilizando o método da ponte de Wheatstone. Foram realizados 3 (três) medições da tensão de saída da ponte de Wheatstone (T_1, T_2 e T_3) com o multímetro digital da Agilent. A partir destas três medições, foi feita uma média das tensões, mas esta tensão não é a tensão real devido ao ganho de 267 do amplificador de instrumentação (INA101). Portanto, a tensão real é a tensão média dividida pelo ganho do amplificador. Por fim, o valor da deformação.

Tabela 4.4: Medição de deformação na ausência dos fios de LMF.

Força (N)	T_1 (V)	T_2 (V)	T_3 (V)	Tensão $_{Média}$ (V)	Tensão $_{Real}$ (V)	Deformação ($\mu m/m$)
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000000000	0,00
0,5	0,061	0,060	0,061	0,061	0,000227216	65,38
0,1	0,124	0,125	0,124	0,124	0,000465668	133,98
1,5	0,185	0,186	0,186	0,186	0,000695381	200,08
2,0	0,250	0,249	0,248	0,249	0,000932584	268,33
2,5	0,312	0,311	0,310	0,311	0,001164794	335,14
3,0	0,374	0,373	0,372	0,373	0,001397004	401,95
3,5	0,434	0,435	0,433	0,434	0,001625468	467,69
4,0	0,493	0,492	0,495	0,493	0,001847690	531,63

4.4 Medição de Deformação Utilizando o Método dos 4 Fios na Presença dos Atuadores de Força

O experimento foi repetido como descrito na seção 4.2, mas agora a plataforma experimental encontra-se com os fios de LMF fixados na extremidade livre da barra e na coluna de fixação, exercendo uma força de ação contrária a força aplicada na extremidade livre da barra, como ilustrado na Figura 4.7. Portanto, uma força foi aplicada na extremidade livre da barra flexível por meio de massas calibradas de 50 até 700 g na peça de aplicação de força. Isto foi feito com o objetivo de utilizar o método dos 4 fios para calcular o valor da deformação (ε) com os fios de LMF sendo utilizados com atuadores de força, no ponto onde foram colados os extensômetros, por meio da Equação A.12.

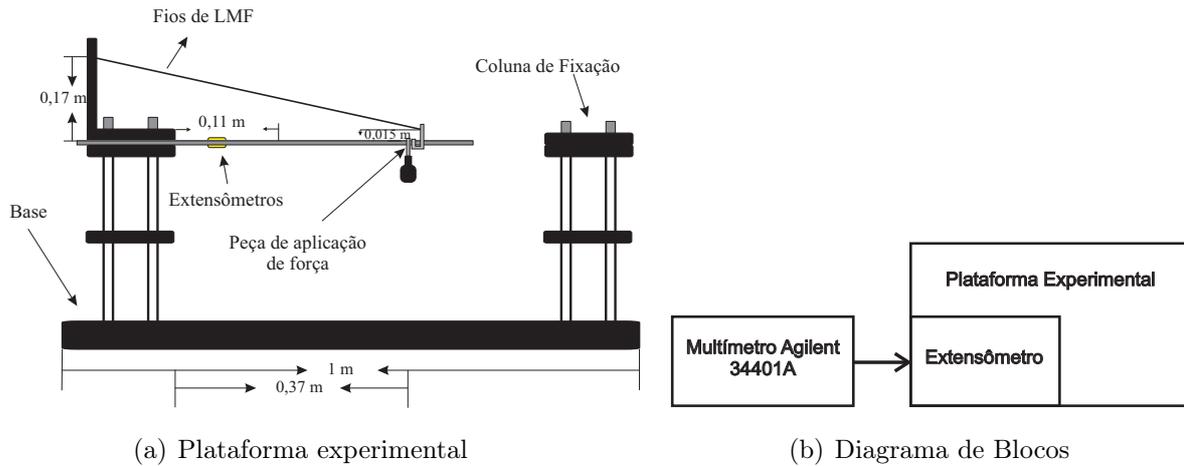


Figura 4.7: Diagrama da plataforma utilizado na medição de deformação com as LMF.

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 são mostrados os resultados experimentais do experimento da medição de deformação utilizando o método dos 4 fios para o extensômetro 1 e extensômetro 2, respectivamente na presença dos atuadores de força. Na Tabela 4.7, encontra-se o valor médio da deformação, no local onde foram colado os extensômetros, obtido a partir das Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5: Medição de deformação utilizando o extensômetro 1.

Força (N)	R_0 (Ω)	R_f (Ω)	ΔR (Ω)	$\Delta R/R_0$	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)
0,5	350,22	350,25	0,030	0,0000857	40,60
1,0	350,22	350,27	0,050	0,0001428	67,66
1,5	350,22	350,28	0,060	0,0001713	81,19
2,0	350,22	350,29	0,070	0,0001999	94,73
2,5	350,22	350,31	0,090	0,0002570	121,79
3,0	350,22	350,32	0,100	0,0002855	135,32
3,5	350,22	350,34	0,120	0,0003426	162,39
4,0	350,22	350,35	0,130	0,0003712	175,92
4,5	350,22	350,37	0,150	0,0004283	202,99
5,0	350,22	350,38	0,160	0,0004569	216,52
5,5	350,22	350,40	0,180	0,0005140	243,58
6,0	350,22	350,41	0,190	0,0005425	257,12
6,5	350,22	350,43	0,210	0,0005996	284,18
7,0	350,22	350,44	0,220	0,0006282	297,71

Tabela 4.6: Medição de deformação utilizando o extensômetro 2.

Força (N)	R_0 (Ω)	R_f (Ω)	ΔR (Ω)	$\Delta R/R_0$	Deformação ($\mu m/m$)
0,5	350,12	350,09	0,030	0,0000857	40,61
1,0	350,12	350,07	0,050	0,0001428	67,68
1,5	350,12	350,06	0,060	0,0001714	81,22
2,0	350,12	350,05	0,070	0,0001999	94,75
2,5	350,12	350,03	0,090	0,0002571	121,83
3,0	350,12	350,02	0,100	0,0002856	135,36
3,5	350,12	350,00	0,120	0,0003427	162,44
4,0	350,12	349,99	0,130	0,0003713	175,97
4,5	350,12	349,97	0,150	0,0004284	203,04
5,0	350,12	349,96	0,160	0,0004570	216,58
5,5	350,12	349,94	0,180	0,0005141	243,65
6,0	350,12	349,93	0,190	0,0005427	257,19
6,5	350,12	349,91	0,210	0,0005998	284,26
7,0	350,12	349,90	0,220	0,0006284	297,80

Tabela 4.7: Deformação média na presença dos fios de LMF.

Força (N)	Deformação ($\mu m/m$)
0,5	40,60
1,0	67,67
1,5	81,21
2,0	94,74
2,5	121,81
3,0	135,34
3,5	162,41
4,0	175,95
4,5	203,02
5,0	216,55
5,5	243,62
6,0	257,15
6,5	284,22
7,0	297,76

4.5 Medição de Deformação Utilizando o Método da Ponte de Wheatstone na Presença dos Atuadores de Força

O experimento foi repetido como descrito na seção 4.3, mas agora a plataforma experimental encontra-se com os fios de LMF fixados na extremidade livre da barra e na coluna de fixação, exercendo uma força de ação contrária a força aplicada na extremidade livre da barra. Portanto, foi aplicado uma força por meio de massas calibradas de 50 até 700 g na peça de aplicação de força. Isto foi feito com o objetivo de utilizar o método da ponte de Wheatstone para calcular o valor da deformação (ε) provocada pela força aplicada na barra, no ponto onde foram colados os extensômetros, por meio da Equação 3.1.

Na Tabela 4.8 são mostrados os resultados experimentais da medição de deformação na presença dos atuadores de força, utilizando o método da ponte de Wheatstone. Foram realizados 3 (três) medições da tensão de saída da ponte de Wheatstone (T_1, T_2 e T_3) com o multímetro digital da Agilent.

Tabela 4.8: Medição de deformação na presença dos fios de LMF.

Força (N)	T_1 (V)	T_2 (V)	T_3 (V)	Tensão _{Média} (V)	Tensão _{Real} (V)	Deformação ($\mu m/m$)
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000000000	0,00
0,5	0,041	0,040	0,039	0,0400	0,000149813	43,10
1,0	0,063	0,066	0,063	0,0640	0,000239700	68,97
1,5	0,081	0,083	0,082	0,0820	0,000307116	88,36
2,0	0,098	0,099	0,097	0,0980	0,000367041	105,61
2,5	0,116	0,117	0,116	0,1163	0,000435705	125,36
3,0	0,134	0,135	0,133	0,1340	0,000501873	144,40
3,5	0,151	0,152	0,152	0,1517	0,000568040	163,44
4,0	0,168	0,167	0,169	0,1680	0,000629213	181,04
4,5	0,187	0,188	0,186	0,1870	0,000700375	201,52
5,0	0,205	0,205	0,204	0,2047	0,000766542	220,55
5,5	0,223	0,222	0,221	0,2220	0,000831461	239,23
6,0	0,239	0,240	0,239	0,2393	0,000896380	257,91
6,5	0,260	0,260	0,257	0,2590	0,000970037	279,10
7,0	0,277	0,275	0,275	0,2757	0,001032459	297,06

Com os valores médios das deformações mostradas nos métodos dos 4 fios e da ponte de Wheatstone, construiu-se um código no MATLAB Editor para gerar um gráfico, ilustrado na Figura 4.8, da deformação em função da força peso aplicada na barra. Neste gráfico, observa-se que nos dois métodos os valores de deformação são aproximadamente iguais e linearmente proporcionais aos valores das forças peso e, também, que os valores de deformação na barra são menores na presença dos atuadores de força. Portanto, pode-se utilizar o método da ponte de Wheatstone na plataforma proposta para a medição de deformação.

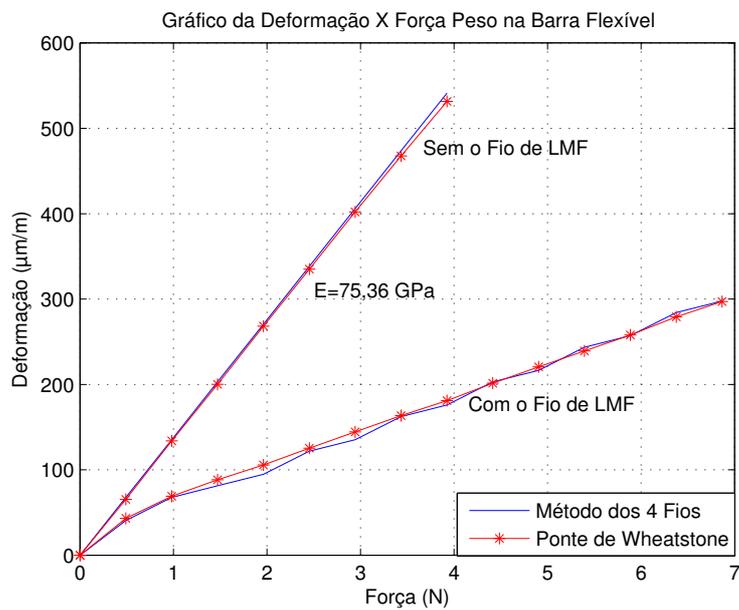


Figura 4.8: Gráfico da deformação versus a força na barra flexível.

De acordo com a literatura, pode-se calcular a deformação sofrida por uma barra submetida a uma força P por meio da Equação 4.1. Nesta Equação, P é a força aplicada na barra, L é comprimento do ponto de aplicação da força até o ponto onde foram colados os extensômetros, b é a largura da barra, t é a espessura da barra e E é o módulo de elasticidade da barra como ilustrado na Figura 4.9.

$$\varepsilon = \frac{6PL}{bt^2E} \quad (4.1)$$

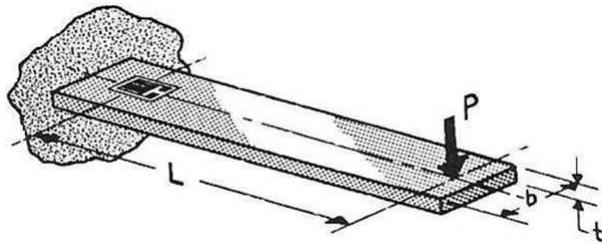


Figura 4.9: Barra flexível.

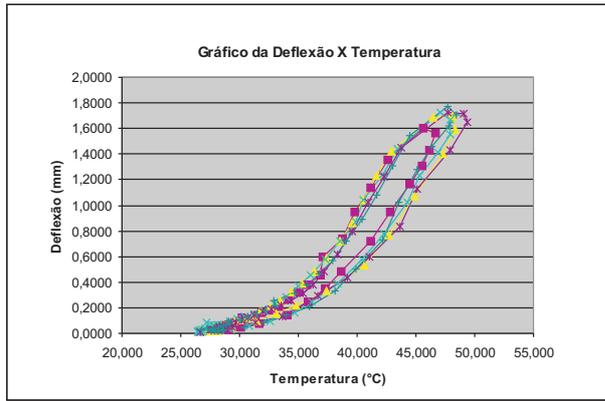
Os métodos dos 4 fios e da ponte de Wheatstone foram comparados devido ao fato de desconhecer o valor do módulo de elasticidade (E) da barra de alumínio utilizada na plataforma experimental, que de acordo com a literatura varia entre 70 e 80 GPa. A partir desta comparação, observou-se que o módulo de elasticidade é de 75,36 GPa para as deformações obtidas pelos métodos.

4.6 Plataforma Experimental Utilizada para Análise

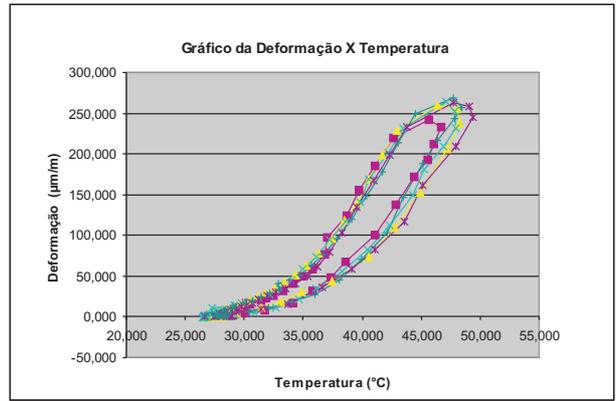
Com a plataforma experimental desenvolvida para analisar o comportamento dos fios de LMF, ilustrada na seção 3.1, realizou-se três experimentos para cada fio de NiTi e NiTiCu. Isto foi feito com o objetivo de observar o comportamento da deflexão e da deformação na barra flexível assim como da temperatura, da resistência e da potência elétrica nos fios de LMF durante 5 ciclos térmicos (aquecimento e resfriamento).

No primeiro experimento, aplicou-se uma força de 5 N na extremidade livre da barra e, em seguida, variou-se o valor de corrente elétrica fornecida aos fios de 100 até 800 mA (aquecimento), incrementando 25 mA a cada 0,5 s, e de 750 até 100 mA (resfriamento), decrementando 50 mA a cada 6 s. O segundo e terceiro experimento é uma repetição do primeiro, porém com forças de 7 e 9 N respectivamente.

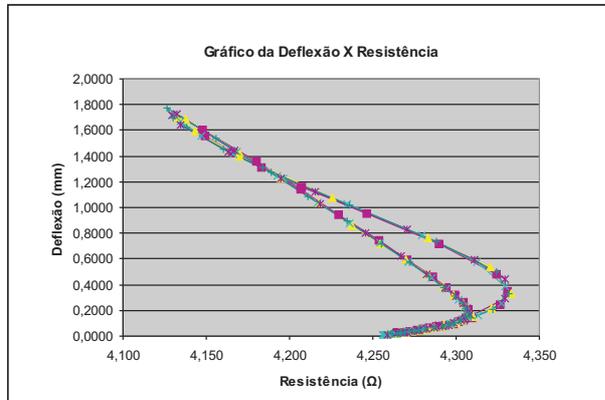
Nas Figuras 4.10 e 4.11 são ilustrados os resultados obtidos com o fios de NiTi durante os 5 ciclos térmicos para as forças 5 e 9 N respectivamente. Nestas figuras, observa-se um comportamento não-linear e o aparecimento de uma histerese em temperatura nos gráficos da deflexão, da deformação e da resistência elétrica em função da temperatura. Além disso, um comportamento não-linear e o aparecimento de uma histerese em corrente elétrica nos gráficos da deflexão e da deformação em função da corrente elétrica.



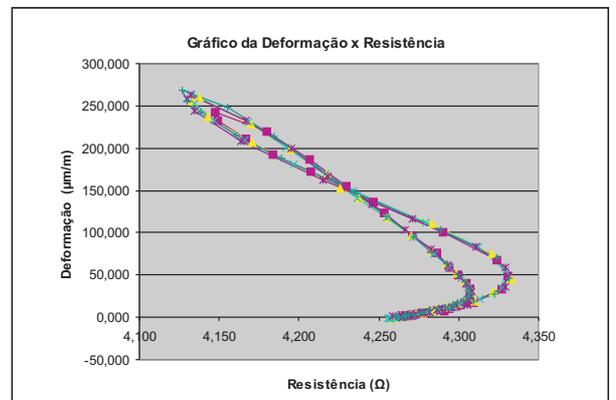
(a)



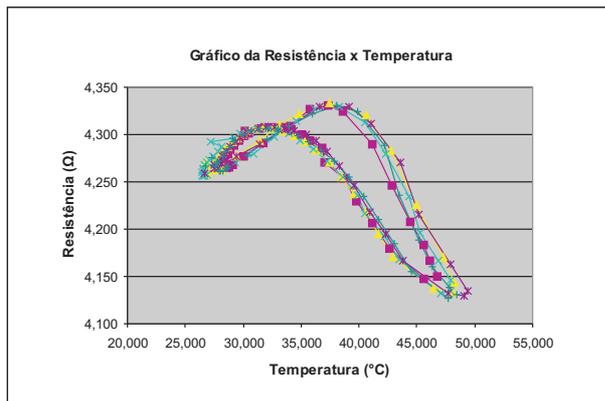
(b)



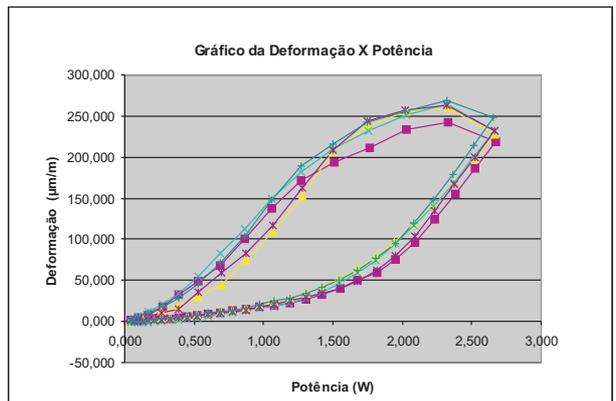
(c)



(d)

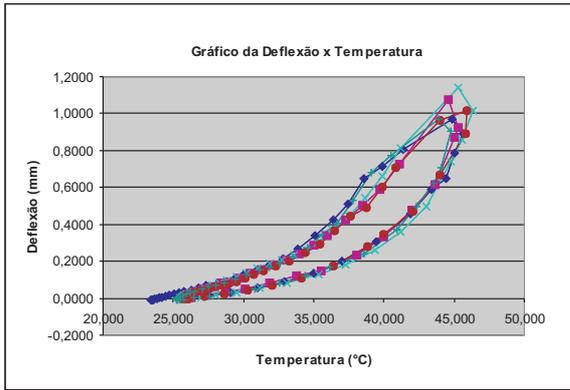


(e)

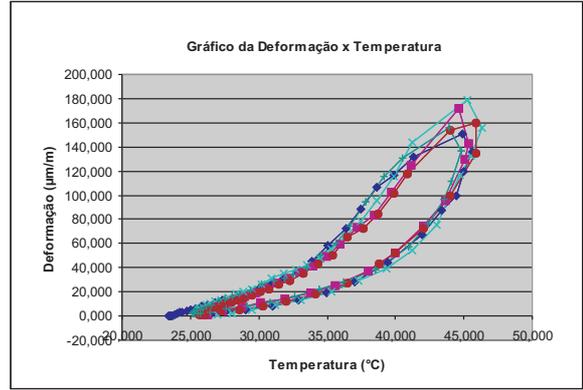


(f)

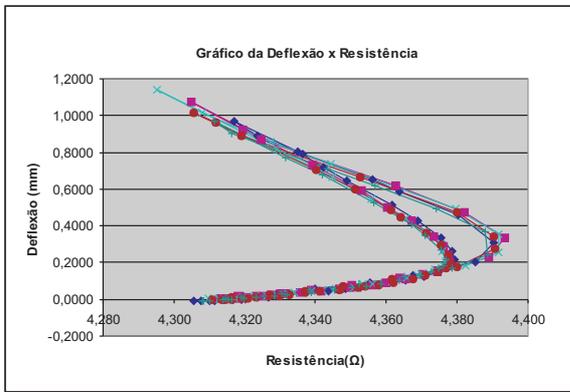
Figura 4.10: Gráficos do comportamento do fio de NiTi para uma força de 5 N.



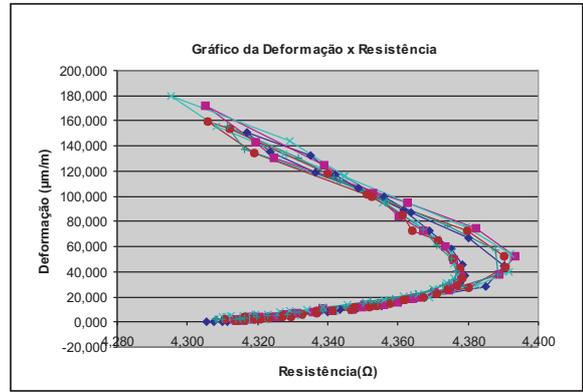
(a)



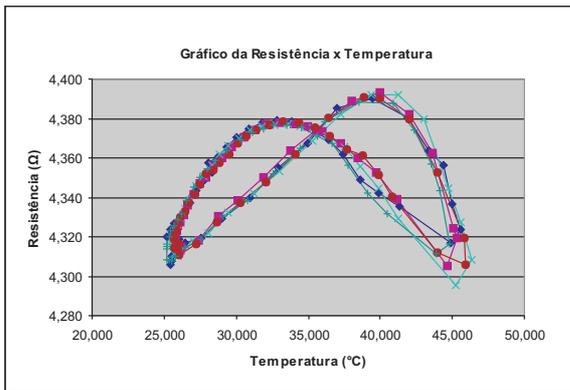
(b)



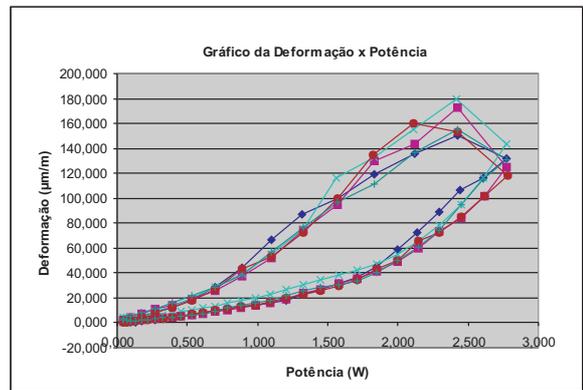
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.11: Gráficos do comportamento do fio de NiTi para uma força de 9 N.

A Tabela 4.1 contém os valores mínimos e máximos dos resultados experimentais obtidos dos três experimentos. Nesta tabela, observa-se que a deflexão, a deformação e a variação da resistência diminuem com o aumento da força. A potência elétrica aumenta devido ao valor resistência elétrica que subiu com o aumento da força. E a variação de temperatura variou em torno de 23 °C.

Tabela 4.9: Comportamento do fio de NiTi

	5 N		7 N		9 N	
	<i>Mínima</i>	<i>Máxima</i>	<i>Mínima</i>	<i>Máxima</i>	<i>Mínima</i>	<i>Máxima</i>
Deflexão (mm)	0	1,77	0	1,24	0	1,14
Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)	0	268,35	0	190,43	0	179,30
Potência (W)	0	2,67	0	2,77	0	2,78
Temperatura (°C)	26,5	49,36	24,72	46,13	25,21	46,35
Resistência (Ω)	4,13	4,33	4,26	4,38	4,30	4,39

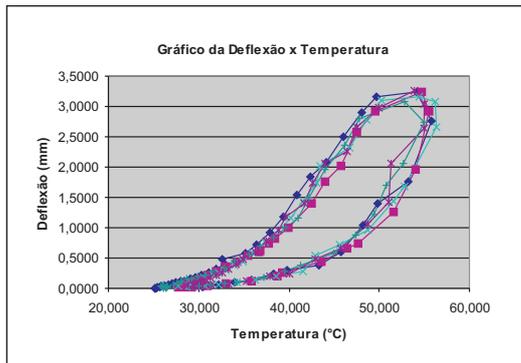
De acordo com De Araújo (2001), o problema da histerese em temperatura pode ser contornado quando medidas de deformação e de resistência elétrica são acopladas, eliminando-se a temperatura como parâmetro de controle. Mesmo assim, observa-se uma relação não-linear nos gráficos da deflexão e da deformação em função da resistência elétrica nos fios de NiTi.

A não-linearidade nos gráficos da deflexão e da deformação em função da resistência elétrica nos fios de NiTi, deve-se a presença de uma fase martensítica intermediária, fase romboedral (fase R), a qual impossibilita a obtenção de uma relação linear.¹

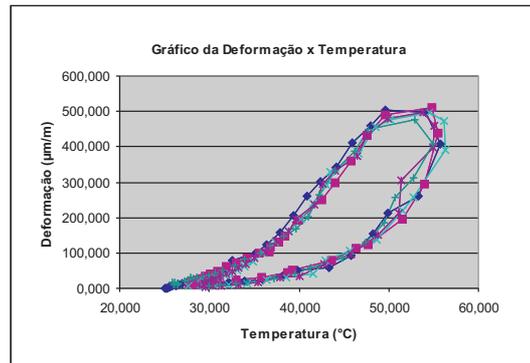
Nas Figuras 4.12 e 4.13 são ilustrados os resultados obtidos com os fios de NiTiCu durante os 5 ciclos térmicos para as forças 5 e 9 N respectivamente. Nestas figuras, observa-se também um comportamento não-linear e o aparecimento de uma histerese em temperatura nos gráficos da deflexão, da deformação e da resistência elétrica em função da temperatura. Além disso, um comportamento não-linear e o aparecimento de uma histerese em corrente elétrica nos gráficos da deflexão e da deformação em função da corrente elétrica.

Neste caso, observou-se uma relação linear e quase sem histerese no gráfico da deflexão e com histerese no gráfico da deformação em função da resistência elétrica nos fios quando medidas de deformação e de resistência elétrica são acopladas, eliminando-se a temperatura como parâmetro de controle. A presença de uma histerese maior no gráfico da deformação em função da resistência elétrica pode ser explicada por alguma falha na aplicação das técnicas de colagem do extensômetro de resistência elétrica.

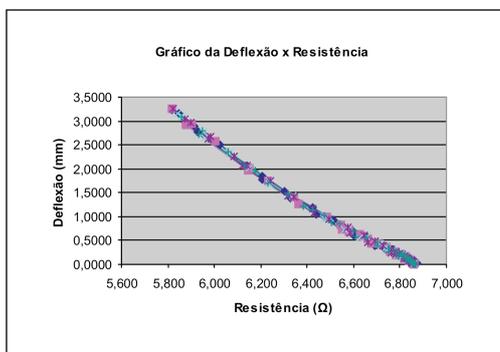
¹A fase romboedral é uma fase martensítica intermediária na transformação de fase martensita \rightarrow austenita.



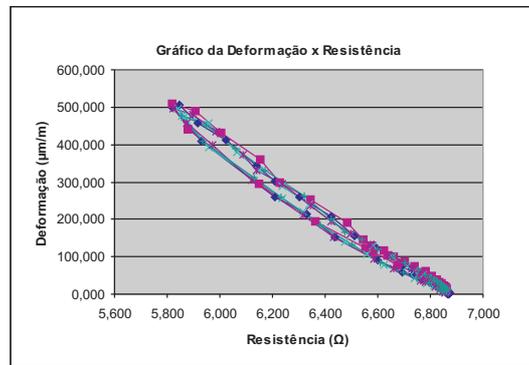
(a)



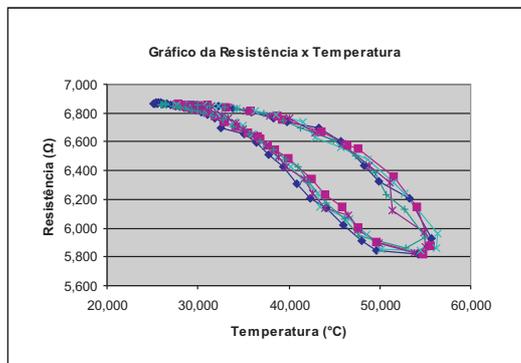
(b)



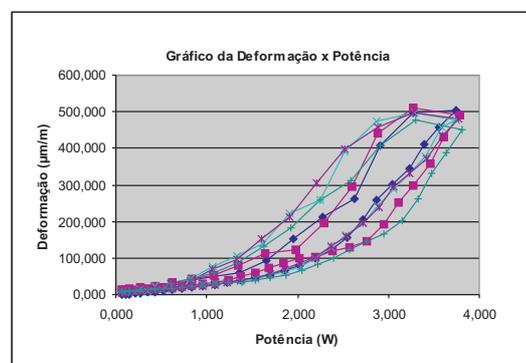
(c)



(d)

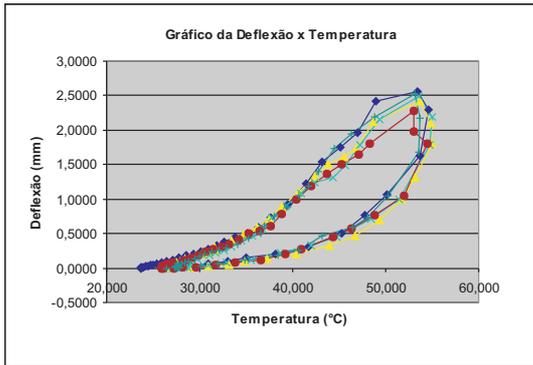


(e)

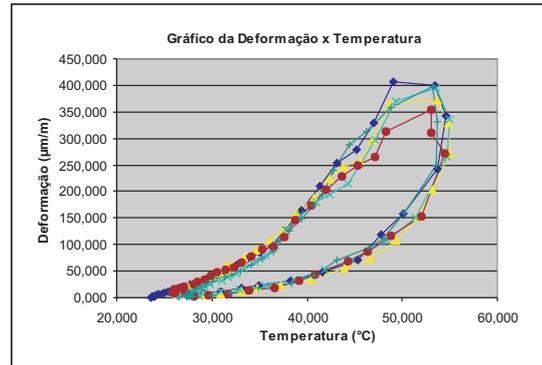


(f)

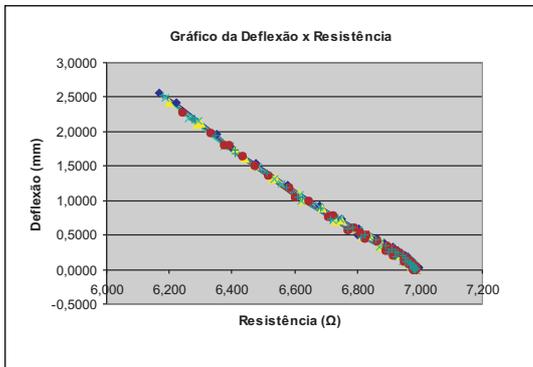
Figura 4.12: Gráficos do comportamento do fio de NiTiCu para uma força de 5 N.



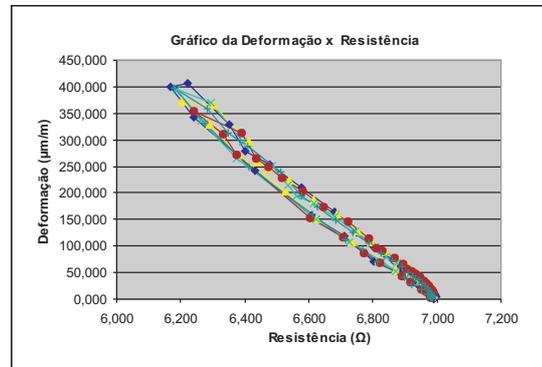
(a)



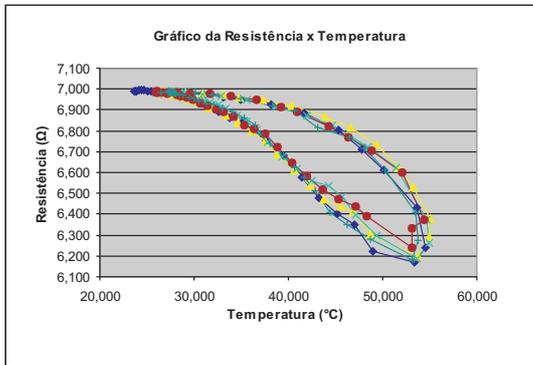
(b)



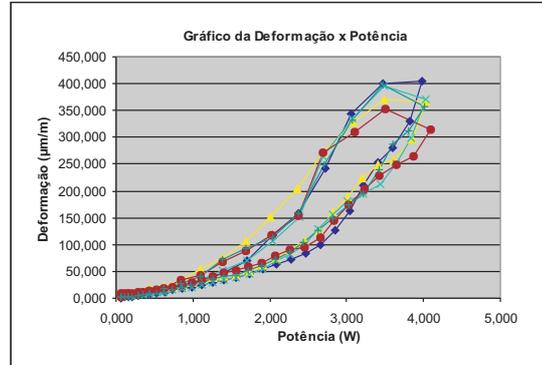
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.13: Gráficos do comportamento do fio de NiTiCu para uma força de 9 N.

A Tabela 4.10 contém os valores mínimos e máximos dos resultados experimentais obtidos dos três experimentos. Nesta tabela, observa-se que a deflexão, a deformação e a variação da resistência diminuem com o aumento da força. A potência elétrica aumenta devido ao valor resistência que subiu com o aumento da força. E a variação de temperatura variou em torno de 34 °C.

Tabela 4.10: Comportamento do fio de NiTiCu

	5 N		7 N		9 N	
	<i>Mínima</i>	<i>Máxima</i>	<i>Mínima</i>	<i>Máxima</i>	<i>Mínima</i>	<i>Máxima</i>
Deflexão (mm)	0	3,25	0	3,25	0	2,56
Deformação ($\mu m/m$)	0	510,47	0	499,39	0	399,77
Potência (W)	0	3,80	0	3,97	0	4,09
Temperatura (°C)	25,19	56,32	23,90	58,01	23,96	55,02
Resistência (Ω)	5,82	6,87	5,90	6,93	6,18	7,00

Para uma melhor visualização dos gráficos da deflexão e da deformação em função da resistência elétrica dos fios de NiTi e NiTiCu, ilustra-se na Figura 4.14 a união dos gráficos quando aplicado as forças de 5, 7 e 9 N.

Na Figura 4.14, observa-se que o valor da resistência elétrica inicial do fio aumenta quando a força aplicada na extremidade livre da barra é aumentada. A variação da resistência elétrica do fio de NiTi é bem menor do que a do fio de NiTiCu, que alcança a uma variação máxima de aproximadamente 1 Ω . Além disso, o fio de NiTiCu gera uma deflexão e uma deformação na barra bem maior do que o fio de NiTi quando submetido a um mesmo pulso de corrente elétrica.

Devido as curvas do gráfico da deflexão em função da resistência elétrica apresentar uma relação linear e quase sem histerese, como ilustrada na Figura 4.14 (c), utilizou-se um ajuste de curvas mesmo com a presença da pequena histerese existente para obter uma equação linear da deflexão na barra em função da resistência elétrica nos fios como mostrado nas Equações 4.2, 4.3 e 4.4 quando aplicadas as forças de 5, 7 e 9 N respectivamente.

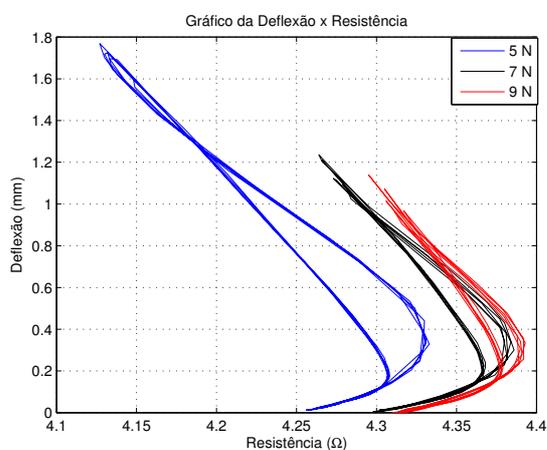
$$Y_{5N} = -2,929x + 20,07 \quad (4.2)$$

$$Y_{7N} = -2,985x + 20,66 \quad (4.3)$$

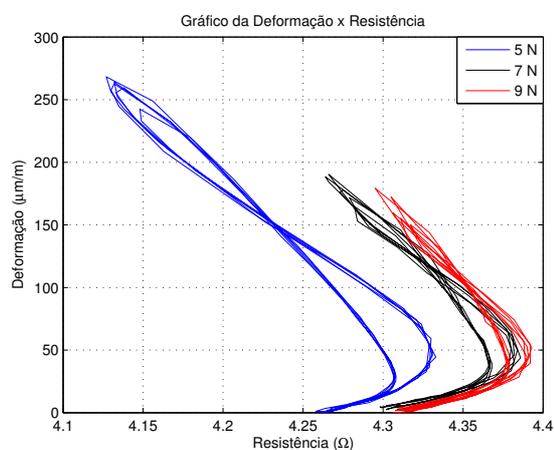
$$Y_{9N} = -2,961x + 20,71 \quad (4.4)$$

A partir destas equações, pode-se utilizar fios de LMF de NiTiCu como sensor de deflexão apenas medindo a resistência elétrica do fio, devido à sua relação linear e quase sem histerese no comportamento da deflexão da barra em função da resistência elétrica dos fios de LMF, que é ideal para o controle do fio atuador. Além disso, como um atuador elétrico ou térmico.

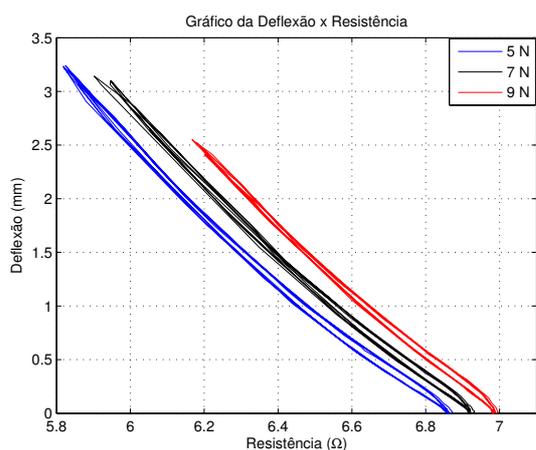
Os fios de LMF de NiTiCu, por apresentarem uma maior deflexão e deformação na barra flexível em relação aos de NiTi, foram utilizados neste trabalho apenas como atuador elétrico na plataforma experimental para controle de deformação de uma viga simplesmente engastada, dificultando a ação de controle devido ao aparecimento de uma histerese em temperatura presente nestes.



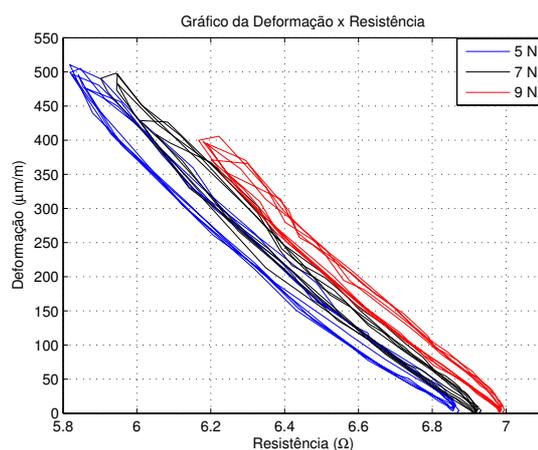
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.14: Gráficos do comportamento dos fios de NiTi (A e B) e NiTiCu (C e D) para uma força de 5, 7 e 9 N.

4.7 Plataforma Experimental Utilizada para Controle

Com a plataforma experimental desenvolvida para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada, ilustrada na seção 3.1, realizou-se dois experimentos com uma força de 7 N aplicada na extremidade livre da barra.

O primeiro experimento tem como objetivo controlar a deformação na barra com um sinal de referência quadrada, senoidal e triangular, variando a frequência de 10 até 90 mHz deste para observar a largura de banda que o sistema responde. O segundo experimento seria repetir o primeiro experimento acrescido de um perturbação externa no sistema de controle, por meio de um *shaker* que varia a sua frequência de 2 até 4,5 Hz.

Para estes experimentos, utilizou-se a liga de memória de forma de NiTiCu como atuador termomecânico, que demonstrou um desempenho melhor em relação ao fio de NiTi como mostrado na seção 4.6.

No primeiro experimento, iniciou-se utilizando a identificação de sistemas, que utiliza técnicas alternativas de modelagem matemática, devido as incertezas do atuador de LMF causadas por impossibilidades de ter todos seus componentes precisamente especificados e as dificuldades associadas em obter um modelo analítico preciso.

Para identificar e desenvolver o modelo matemático do sistema, utilizou-se um sistema de controle em malha aberta como ilustrado na Figura 4.15.

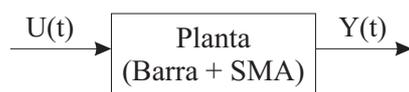


Figura 4.15: Diagrama de blocos do sistema de controle em malha aberta.

Na Figura 4.16, ilustra-se a resposta do sistema de controle em malha aberta, aplicando um degrau de tensão de 6,5 V fornecida por uma fonte de alimentação conectada ao circuito de acionamento com um sinal PWM de 100% ($U(t)$). Este degrau de tensão fornece uma corrente de aproximadamente 1,14 A para que os fios de LMF sejam aquecidos por efeito Joule, provocando uma contração dos fios e uma deflexão de 0,065 m na barra, que leva a uma deformação máxima de 763 $\mu m/m$ na barra ($Y(t)$).

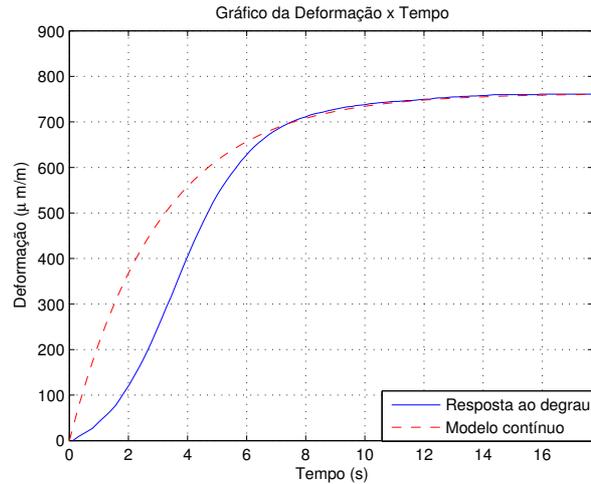


Figura 4.16: Gráfico da resposta do sistema de controle em malha aberta.

A aquisição e o controle de dados em malha aberta são implementados numa unidade microprocessada, baseada no microcontrolador ADuC, conectada ao PC executando o LabVIEW para visualizar as medições numa interface gráfica como discutido na seção 3.1.1.

A identificação, com os dados de entrada e saída do sistema de controle em malha aberta, foi realizada por meio da função `ident` do MatLab, interface gráfica para a identificação de sistemas, obtendo um modelo contínuo de primeira ordem como mostrado na Equação 4.5. Na Figura 4.16, ilustra-se a saída estimada do modelo com um tempo de amostragem (T_0) de 0,156 s.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{1 + \tau_p s} = \frac{7,63}{1 + 3,04s} \quad (4.5)$$

O modelo matemático de um sistema é necessário para a implementação de um controlador eficiente que alcance o melhor desempenho do sistema. Portanto, dentre os diversos processos de sintonia de controladores, utilizou-se a técnica de sintonia direta (cancelamento de pólos-zeros) que resulta num controlador PI para o modelo do sistema de primeira ordem encontrado.

Na Figura 4.17, ilustra-se o diagrama de blocos do sistema de controle projetado em malha fechada, em que a entrada do sistema $R(t)$ é o valor de referência para a deformação na barra. $Y(t)$ é a saída atual do sistema que corresponde ao valor de deformação na barra, onde os extensômetros estão localizados. $E(t)$ é o erro e corresponde a diferença entre $R(t)$ e $Y(t)$. $U(t)$ é a variável de controle gerada pelo controlador PI que corresponde a um valor de *duty cycle*.

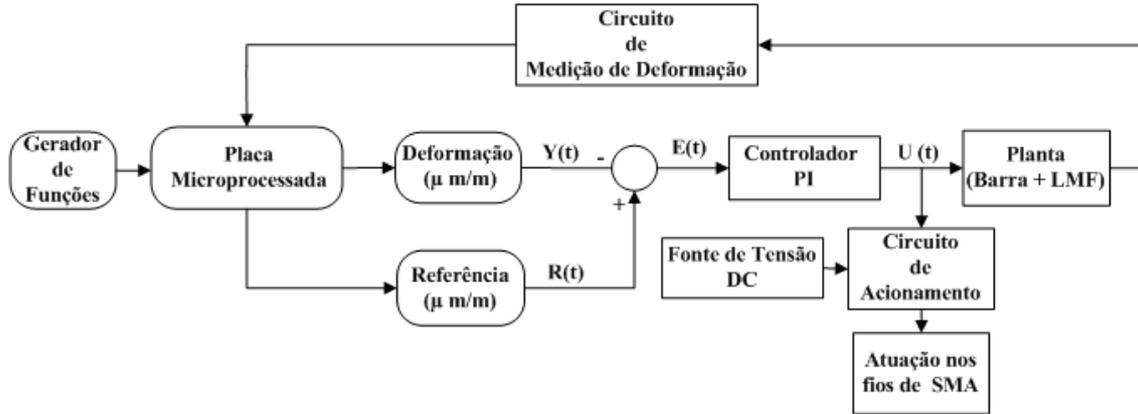


Figura 4.17: Diagrama de blocos do sistema de controle PI em malha fechada.

A ação do controlador PI usa a função de transferência $G_c(s)$, definida na Equação 4.6, para a qual K_p (ganho proporcional) e T_i (tempo integrativo) são os parâmetros do controlador. Estes parâmetros foram calculados usando a técnica de sintonia direta, obtendo-se $K_p = 1,25$ e $T_i = 3,04$, considerando que a constante de tempo do sistema em malha fechada fosse 0,32 s como parâmetro de projeto. Esta constante de tempo, que é dez vezes menor do que a constante de tempo do sistema em malha aberta (τ_p), foi escolhida para tentar melhorar a resposta do sistema, pois as LMF tem se revelado apenas em sistemas onde baixas frequências são requeridas.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4.6)$$

Para facilitar a programação na unidade microprocessada, o controlador PI foi discretizado de forma recursiva. Isto significa que o cálculo do controle em um instante $u(k)$ é baseado em um valor de instante anterior $u(k-1)$ somado a termos corretores como mostrado na Equação 4.7. O termo $u(k)$ é o sinal de saída do controlador, $u(k-1)$ é o sinal de saída com uma amostra de atraso, $e(k)$ é o sinal de erro do sistema, $e(k-1)$ é o sinal de erro com uma amostra de atraso e T_0 é o tempo de amostragem do sistema (SOUZA; FILHO, 2001).

$$u(k) = u(k-1) + K_p e(k) - K_p \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) e(k-1) \quad (4.7)$$

Na Figura 4.18, mostra-se os resultados gráficos do sistema de controle sem nenhuma perturbação externa para um sinal de referência quadrada de 70 mHz, variando de 75 até 580 $\mu m/m$. Nesta figura, observa-se um tempo de subida e descida entorno de 4 e 6 s respectivamente. Ao variar a frequência do sinal de referência, observou-se que a ação de controle funcionou até uma frequência de 70 mHz, apresentando um erro máximo entorno de 5 % quando a referência quadrada apresentava uma deformação de 75 $\mu m/m$. O valor da corrente elétrica no fio de LMF variou entre 0 e 1,08 A e a temperatura variou de 30 a 65 °C.

Na Figura 4.19, mostra-se os resultados gráficos do sistema de controle sem perturbação externa para um sinal de referência senoidal de 40 mHz, variando de 75 até 580 $\mu m/m$. Ao variar a frequência do sinal de referência, observou-se que a ação de controle funcionou muito bem até uma frequência de 40 mHz, apresentando um erro máximo entorno de 2 % com um pico de 10 % no ponto de inversão de ciclo quando o valor de referência senoidal chega a 75 $\mu m/m$. O valor da corrente elétrica no fio de LMF variou entre 0 e 0,8 A e a temperatura variou de 30 a 65 °C.

Na Figura 4.20, apresenta-se os resultados gráficos do sistema de controle sem perturbação externa para um sinal de referência triangular de 10 mHz, variando de 75 até 580 $\mu m/m$. Ao variar a frequência do sinal de referência, observou-se que a ação de controle funcionou até uma frequência de 10 mHz, apresentando um erro máximo entorno de 4 % com um pico de 10 % no ponto de inversão de ciclo quando o valor de referência atinge 75 $\mu m/m$. O valor da corrente elétrica no fio de LMF variou entre 0 e 1,05 A e a temperatura variou de 30 a 63 °C.

Nas Figuras 4.21 até 4.23, apresentam-se os resultados gráficos do sistema de controle com uma perturbação externa de 3,5 Hz, provocada pelo *shaker*, para um sinal de referência quadrada, senoidal e triangular de 20 mHz, variando de 75 até 580 $\mu m/m$. Nestas figuras, observa-se que o *shaker* só provoca uma perturbação externa na barra quando esta apresenta uma deformação abaixo de 200 $\mu m/m$. Além disso, observa-se que a ação de controle funcionou muito bem até um perturbação externa de 3,5 Hz, apresentando um erro máximo entorno de 30 %. No sinal de referência quadrada, a perturbação provocou um aumento do tempo de subida e descida para 7 s, como mostrado na Figura 4.21.

Por fim, observou-se no escalímetro uma deflexão de 0,055 m na barra quando os atuadores foram acionados pela ação de controle.

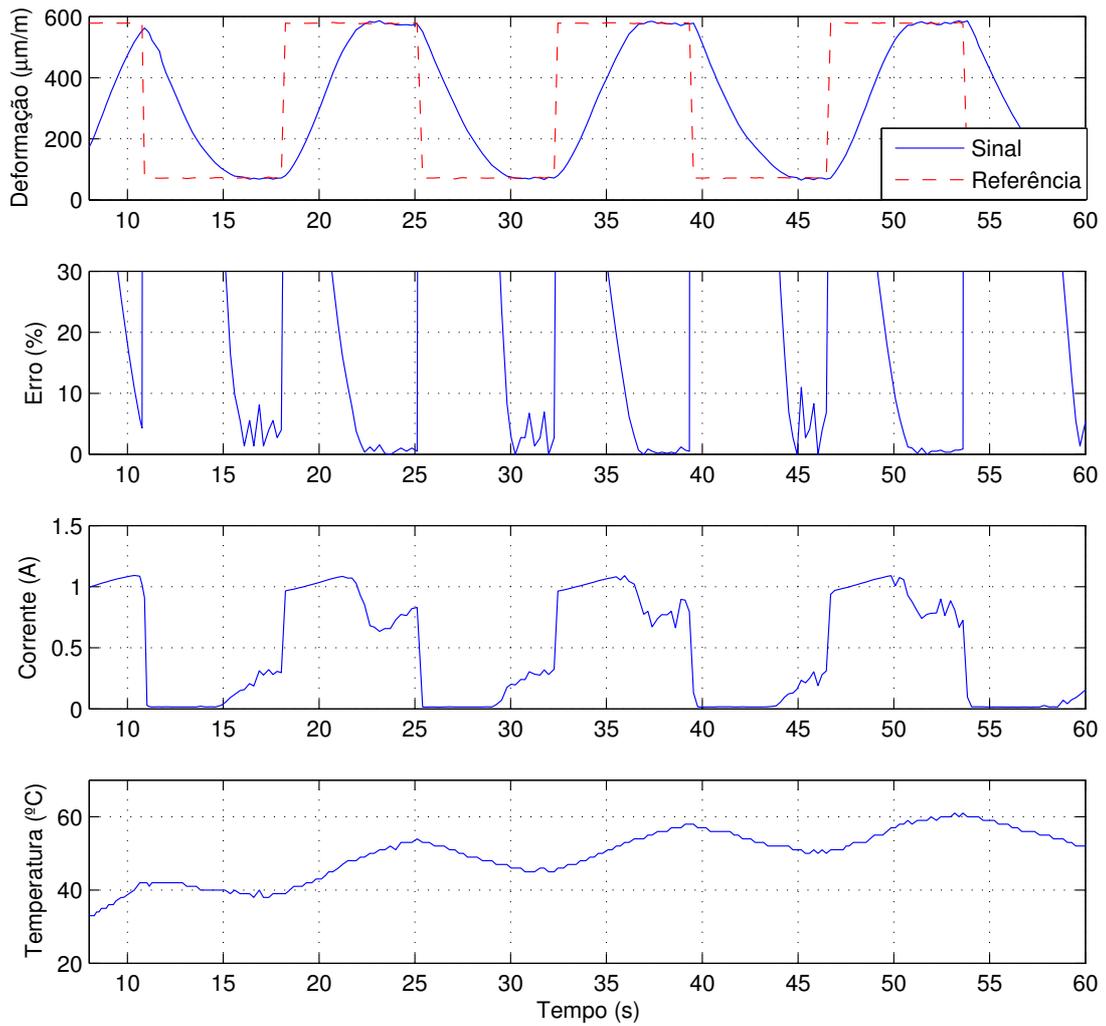


Figura 4.18: Gráficos de uma referência quadrada de 70 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra.

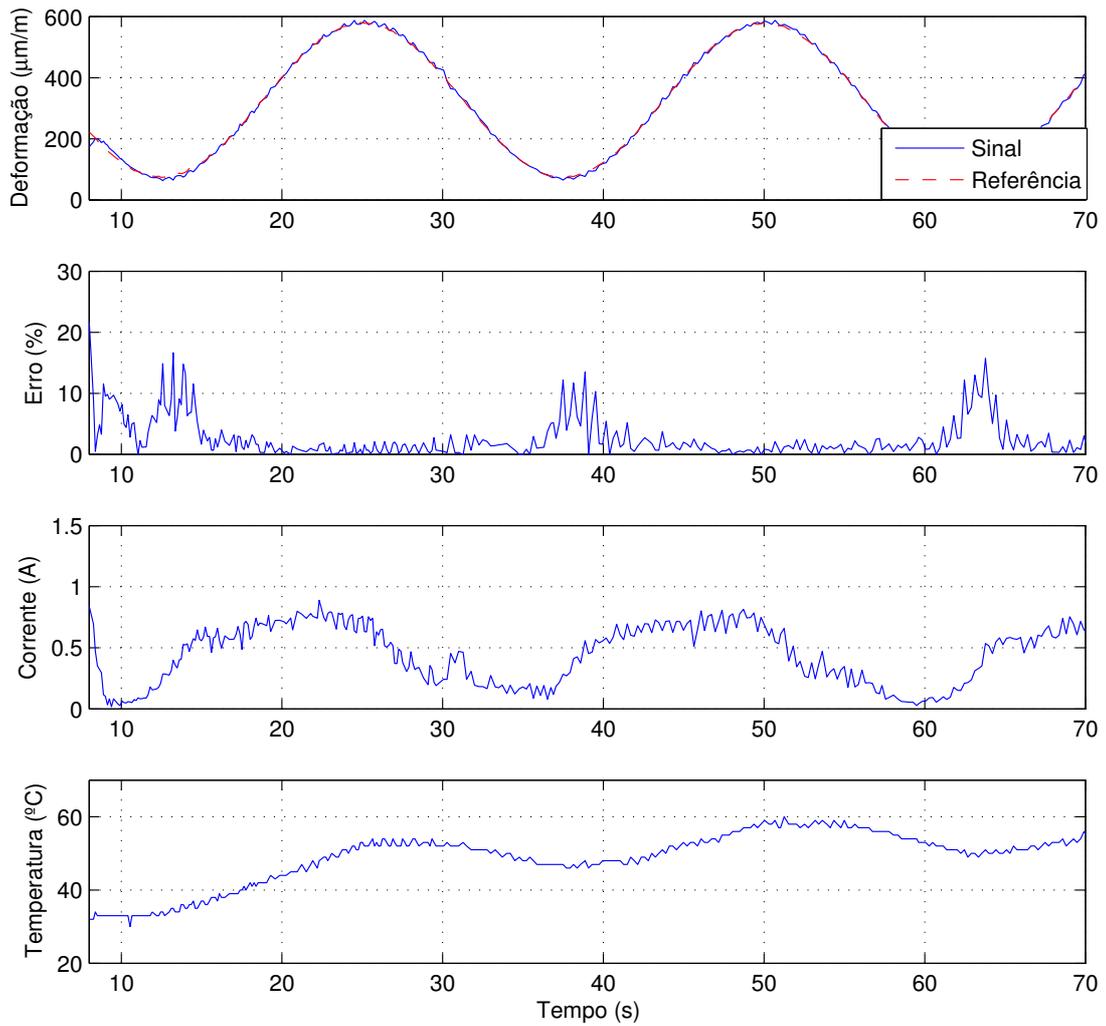


Figura 4.19: Gráficos de uma referência senoidal de 40 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra.

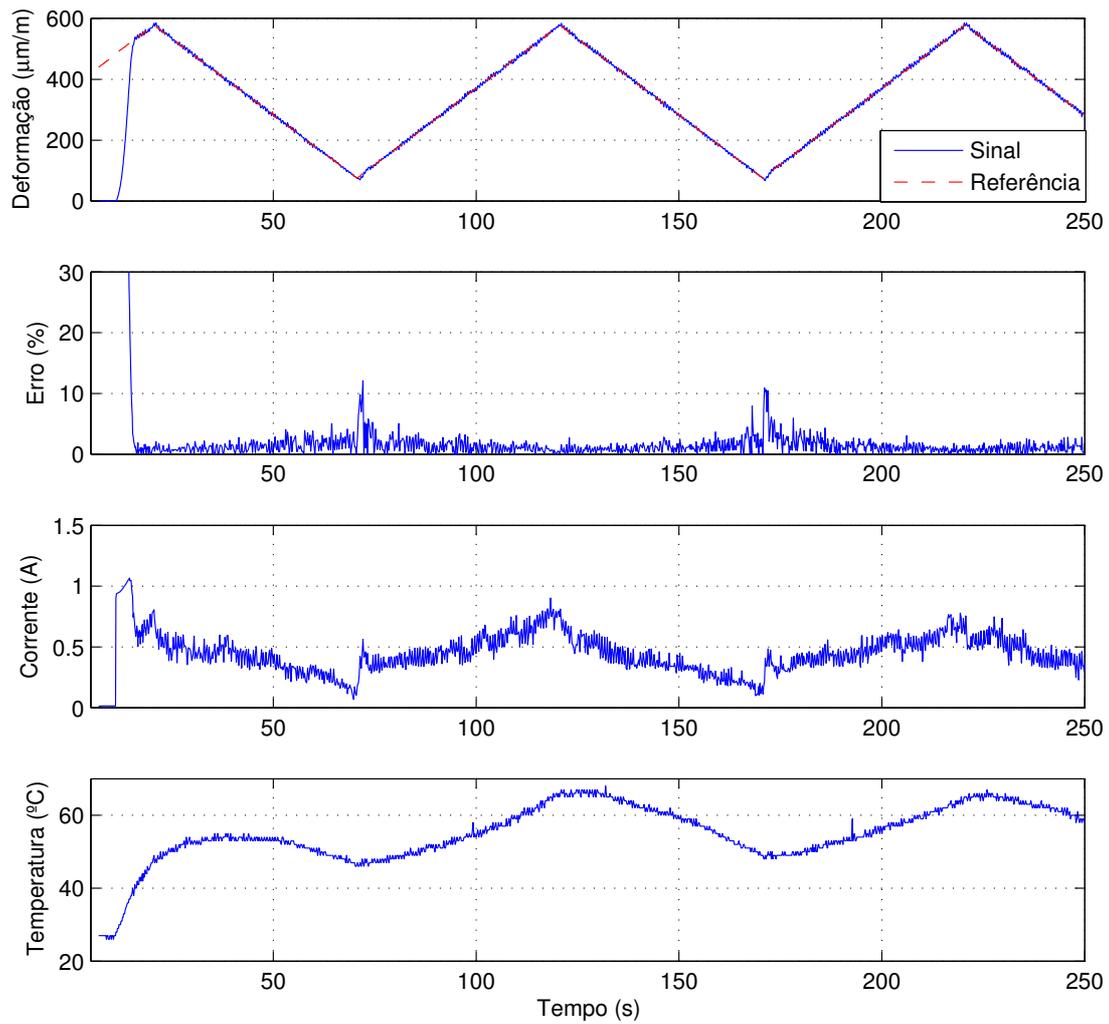


Figura 4.20: Gráficos de uma referência triangular de 10 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra.

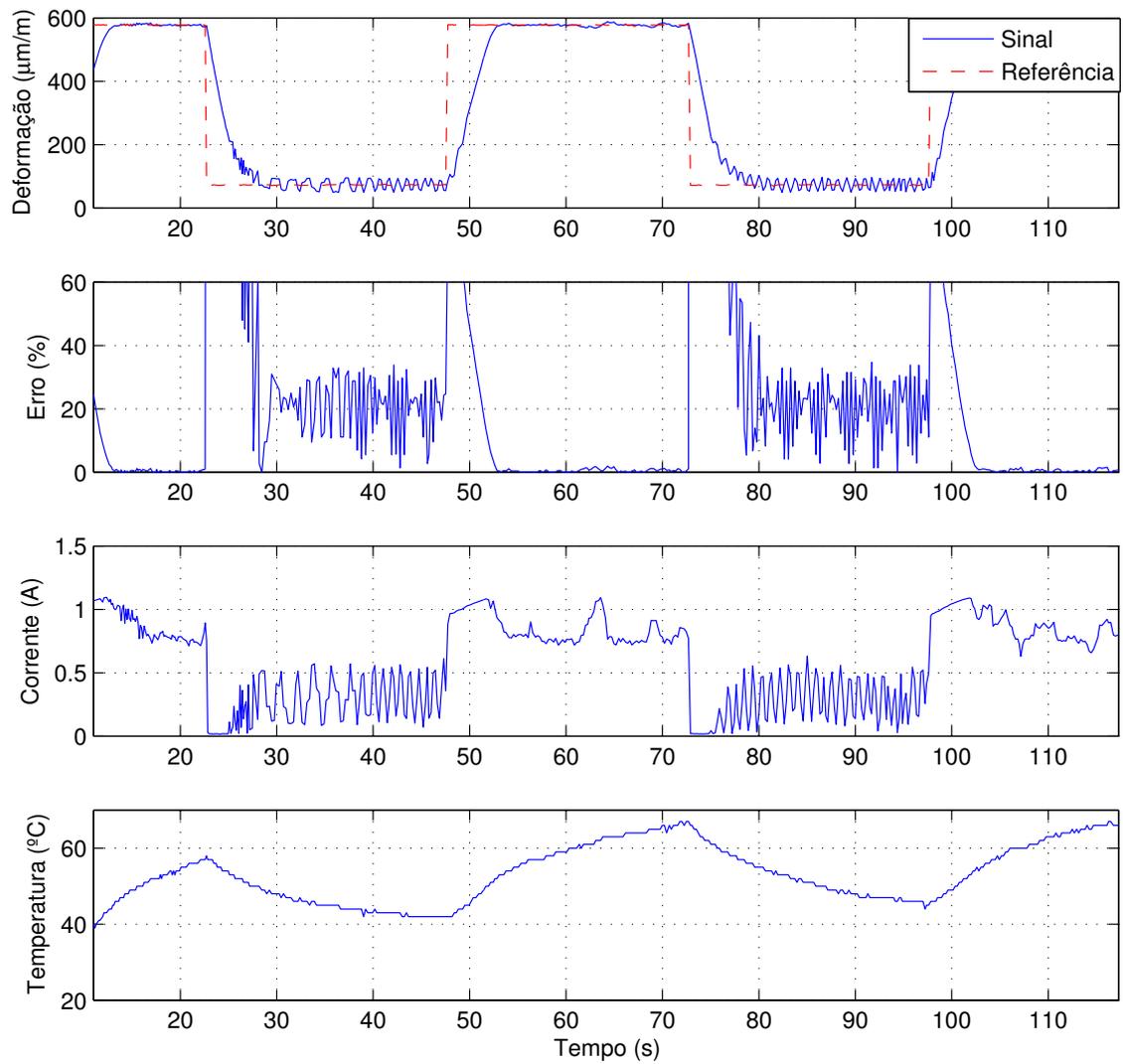


Figura 4.21: Gráficos de uma referência quadrada de 20 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra e uma perturbação externa de 3,5 Hz na barra.

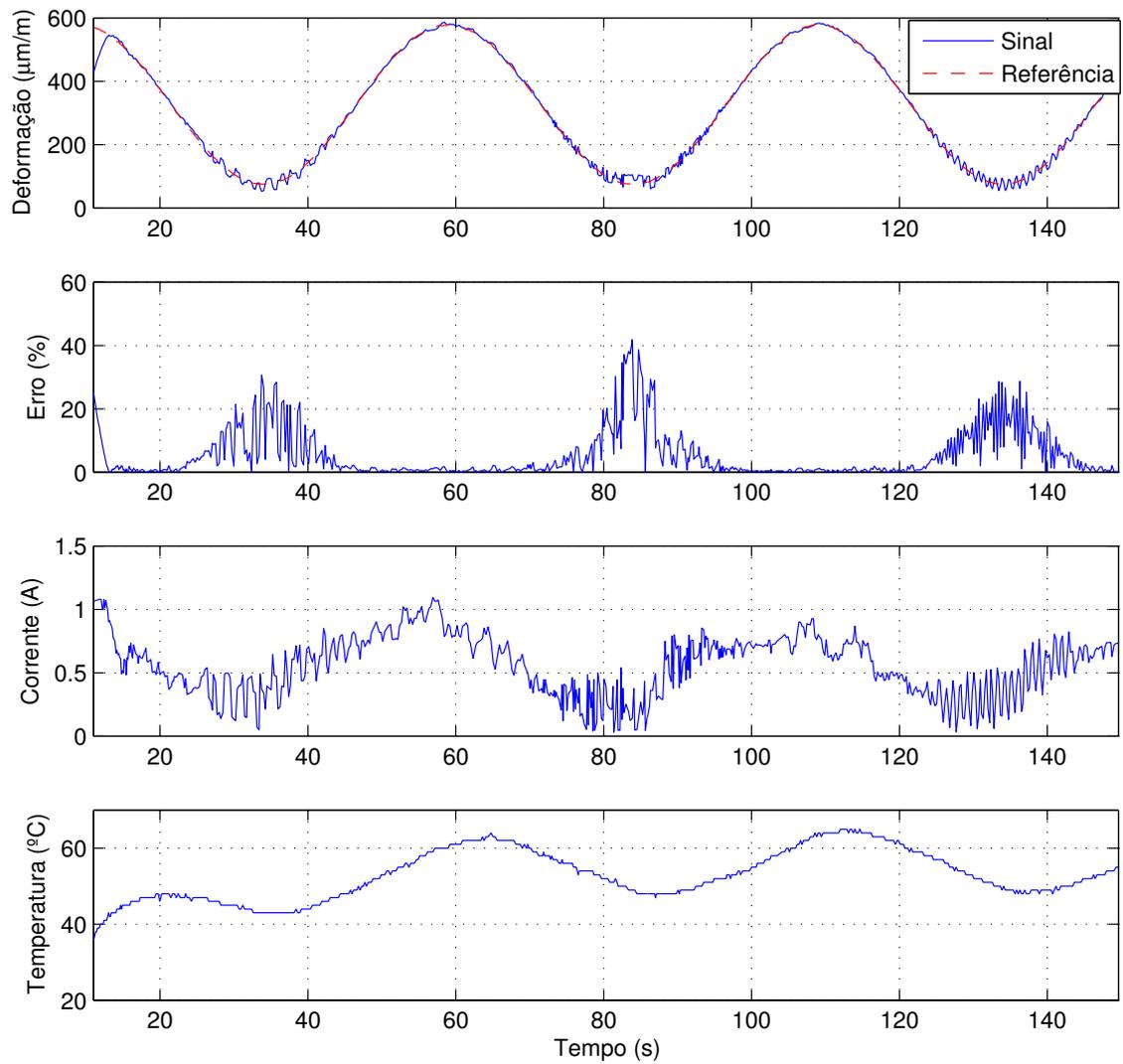


Figura 4.22: Gráficos de uma referência senoidal de 20 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra e uma perturbação externa de 3,5 Hz na barra.

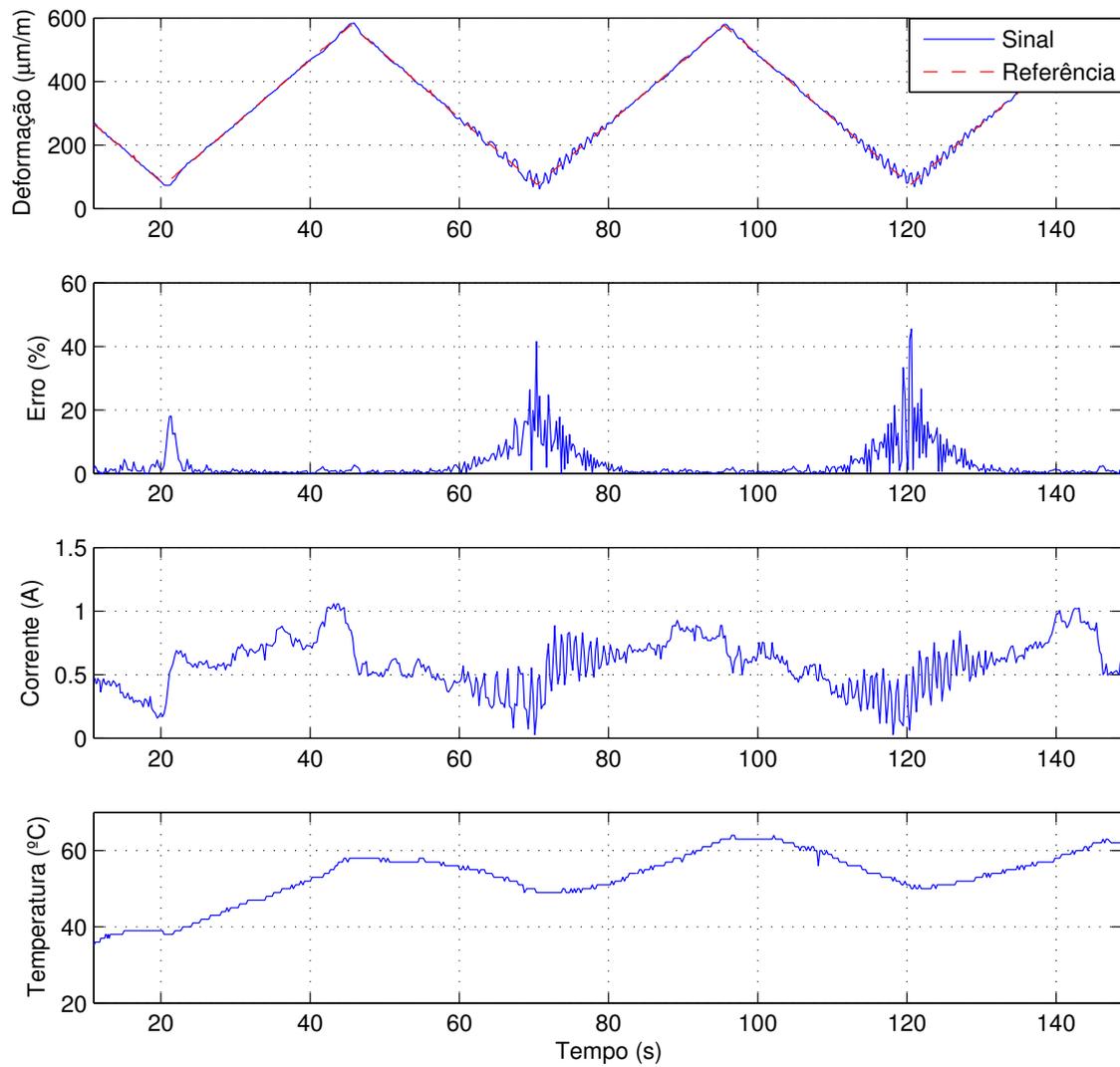


Figura 4.23: Gráficos de uma referência triangular de 20 mHz quando aplicada uma carga mecânica de 7N na extremidade livre da barra e uma perturbação externa de 3,5 Hz na barra.

4.8 Conclusão

As LMF de NiTi e NiTiCu apresentam o seu efeito de memória de forma após um processo de tratamento térmico e treinamento termomecânico. O tratamento permite o aparecimento das transformações de fase que inicialmente estavam inibidas, originando o seu efeito de memória de forma. E o treinamento permite associar uma forma a cada fase, por meio de ciclos de aquecimento e resfriamento. Portanto, a preparação dos fios de LMF é de fundamental importância.

As deformações medidas pelos métodos dos 4 fios e da ponte de Wheatstone apresentam os valores de deformações aproximadamente iguais e linearmente proporcionais aos valores das forças aplicadas na extremidade livre da barra flexível. O valor de deformação na barra é menor na presença dos fios de LMF, utilizados como atuadores de força, devido uma força de ação contrária gerada por estes fios. Portanto, pode-se utilizar o método da ponte de Wheatstone na plataforma proposta para a medição de deformação.

Os métodos dos 4 fios e da ponte de Wheatstone foram comparados devido ao fato de desconhecer o valor do módulo de elasticidade (E) da barra de alumínio utilizada na plataforma experimental. A partir desta comparação, observou-se que o módulo de elasticidade é de 75,36 GPa para as deformações obtidas pelos métodos.

Uma plataforma experimental, contendo uma base de sustentação, duas colunas de fixação, uma barra flexível, dois extensômetros de resistência elétrica, uma peça de aplicação de força, dois fios de liga de memória de forma, um LVDT, um *shaker*, um microtermopar e um escalímetro, foi desenvolvida para analisar o comportamento dos fios de LMF de NiTi e NiTiCu e, também, para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada. Assim, tornando-se uma plataforma experimental versátil.

Com a plataforma experimental desenvolvida para analisar o comportamento dos fios, permitiu-se observar um comportamento não-linear e o aparecimento de uma histerese em temperatura nos comportamentos da deflexão, da deformação e da resistência elétrica em ambos os fios. Além disso, a resistência elétrica no fio de NiTiCu é maior do que no fio de NiTi, gerando uma maior deflexão e uma deformação na barra quando submetido a um mesmo pulso de corrente.

A histerese em temperatura foi contornada no fio de NiTiCu quando medidas de deflexão e de deformação na barra flexível juntamente com a resistência elétrica do fio são acopladas, eliminando-se a temperatura como parâmetro de controle. A partir desta constatação, foi obtida uma relação linear e quase sem histerese para o comportamento da deflexão

em função da resistência elétrica do fio de NiTiCu, possibilitando utilizá-lo como atuador termomecânico e/ou sensor de deflexão ao mesmo tempo. Por outro lado, isto não ocorreu no fio de NiTi devido a anomalia no comportamento da resistência elétrica em função da temperatura no fio provocada pela transformação associada a uma fase romboedral (fase R) presente nos fios de NiTi, a qual impossibilita a obtenção de uma relação linear.

Com a plataforma experimental desenvolvida para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada, permitiu-se observar que o controlador PI realizou uma boa ação de controle para um sinal de referência quadrada, senoidal e triangular com uma frequência máxima de 70, 40 e 10 mHz respectivamente. Além disso, conseguiu controlar a deformação na barra mesmo com a adição de uma perturbação externa máxima de 3,5 Hz, provocada por um *shaker*, para um sinal de referência de 20 mHz no sistema de controle.

Capítulo 5

Conclusão

Nesta dissertação, desenvolveu-se uma plataforma experimental, contendo uma barra flexível simplesmente engastada, dois extensômetros de resistência elétrica para medir a deformação na barra, dois fios de LMF utilizados como atuador de força, um LVDT para medir a deflexão na barra, um microtermopar para medir a temperatura nos fios, um *shaker* para provocar uma perturbação externa na barra e um escalímetro para observar a deflexão na extremidade livre da barra, que analisa o comportamento dos fios de LMF de NiTi e NiTiCu e, também, realiza o controle de deformação na barra.

As deformações na barra flexível podem ser medidas utilizando os métodos dos 4 fios e da ponte de Wheatstone, pois apresentam valores de deformações aproximadamente iguais e linearmente proporcionais aos valores das forças aplicadas na extremidade livre da barra.

Com a plataforma experimental desenvolvida para analisar o comportamento dos fios, permitiu-se observar um comportamento não-linear e o aparecimento de uma histerese em temperatura nos comportamentos da deflexão, da deformação e da resistência elétrica em ambos os fios. Além disso, um desempenho melhor no fio de NiTiCu em relação ao fio de NiTi quando estes são submetidos a um mesmo pulso de corrente elétrica.

A histerese em temperatura foi contornada no fio de NiTiCu quando medidas de deflexão e de deformação na barra flexível juntamente com a resistência elétrica do fio são acopladas, eliminando-se a temperatura como parâmetro de controle. A partir desta constatação, foi obtida uma relação linear e quase sem histerese para o comportamento da deflexão em função da resistência elétrica do fio de NiTiCu, possibilitando utilizá-lo como atuador termomecânico e/ou sensor de deflexão ao mesmo tempo.

Com a plataforma experimental desenvolvida para realizar o controle de deformação numa barra flexível simplesmente engastada, permitiu-se determinar que a deformação final da barra flexível, quando submetida a perturbações internas (convecção natural) e externas (vibrador eletrodinâmico), pode ser controlada com um sinal de referência quadrada, senoidal e triangular por intermédio da tensão elétrica fornecida ao fio, na qual faz passar uma corrente elétrica no fio de LMF que realiza o aquecimento deste por efeito Joule.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Aqui são sugeridas algumas futuras investigações que dariam prosseguimento aos estudos atuadores de ligas com memória de forma para o controle da deformação de uma barra flexível. Principais trabalhos identificados a serem desenvolvidos são:

1. Caracterização das propriedades do fio de liga com memória de forma para eliminar os problemas que impedem a identificação do sistema;
2. Melhorar o sistema modelado de primeira ordem para um de segunda ordem, no qual utilizaria um controlador PID, por meio da técnica de sintonia direta;
3. Para melhorar a ação de controle, deve-se elaborar técnicas de controle que sejam capazes de controlar a temperatura e a força nos fios de SMA como garantia de desempenho e estabilidade;
4. Utilizar a liga de memória de forma como sensor e atuador.

Apêndice A

Extensômetro de Resistência Elétrica

Neste apêndice, descreve-se a definição, as aplicações, as características, o princípio de funcionamento, a classificação e o sistema de codificação do extensômetro de resistência elétrica (ERE). Além disso, a técnica utilizada para aplicação deste sensor e os circuitos elétricos envolvidos.

A.1 Extensômetro de resistência elétrica

O extensômetro de resistência elétrica, ilustrado na Figura A.1, também conhecido como *strain gauge*, é uma pequena grade formada por finas lâminas metálicas que pode ser colado à superfície de um componente ou estrutura a ser medida as deformações, transformando pequenas variações de dimensões da estrutura em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Isto com uma fina camada de adesivo, na qual serve para transmitir as deformações da estrutura ao *strain gauge*, além de servir de isolante entre os dois (LIMA et al., 2007).

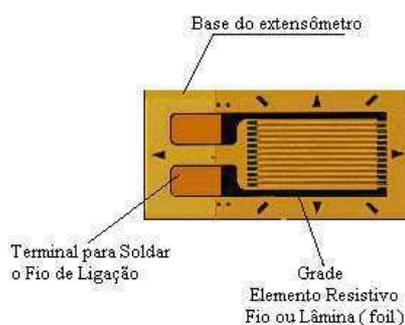


Figura A.1: Extensômetro de resistência elétrica.

Os *strain gauge* são utilizados na análise experimental de deformações em máquinas, pontes, locomotivas, navios e na construção de transdutores de força, tensão, pressão, fluxo, aceleração, entre outros (LIMA et al., 2007).

As características dos extensômetros de resistência elétrica podem ser resumidas nos seguintes itens: alta precisão de medida; pequeno tamanho e pouco peso; baixo custo; excelente linearidade; facilidade de instalação; excelente resposta estática e dinâmica; ampla faixa de temperatura; aplicável mesmo sob condições severas, desde que faça o tratamento adequado; efetua medidas à distância; dentre outros (LIMA et al., 2007).

Os fabricantes dos *strain gauges* são relativamente poucos, dentre os quais estão: Kiowa (Japão), Micro Measurements (EUA), HBM (Alemanha Ocidental), BLH (EUA), Phillips (Holanda) (LEUCKERT, 2000).

Devido a todas essas vantagens atualmente o *strain gauge* é indispensável a qualquer equipe que se dedique ao estudo experimental de medições (MAGALHÃES, 2003).

A.2 Princípio de funcionamento

Pode-se ter uma noção do princípio do funcionamento de um extensômetro, analisando a equação da resistência elétrica de um condutor cilíndrico de seção uniforme, mostrada na Equação A.1 (LEUCKERT, 2000; MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003; ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004):

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (\text{A.1})$$

Na Equação A.1, R é a resistência elétrica do condutor, L é o comprimento do condutor, A é a área da seção transversal do condutor e ρ é a resistividade do condutor, na qual varia com a temperatura do condutor e com a deformação sofrida pelo condutor.

Aplicando o logaritmo de ambos os lados da Equação A.1 e por diferenciação obtém-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (\text{A.2})$$

Considerando-se que a área A seja proporcional ao quadrado do diâmetro D do condutor e sabendo-se que uma variação relativa no diâmetro está relacionada com uma variação relativa no comprimento L , por meio do coeficiente de Poisson (ν), proposto pelo cientista francês Siméon Denis Poisson, como mostrado na Equação A.3 (LEUCKERT, 2000).

$$\nu = - \frac{\Delta D/D}{\Delta L/L} \quad (\text{A.3})$$

Pode-se verificar que:

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{A.4})$$

Substituindo-se a Equação A.4 na Equação A.2, obtém-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (\text{A.5})$$

Experiências mostram que a deformação (ε) está relacionada com uma variação relativa no comprimento L , portanto, pode-se escrever a Equação A.5 da seguinte forma:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (\text{A.6})$$

De acordo com Bridgman, a mudança na resistividade (ρ) ocorre na proporção da variação do volume do material. E considerando isto tem-se (MAGALHÃES, 2003):

$$\Delta \rho = c\rho \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \quad (\text{A.7})$$

onde c é uma constante do material do condutor determinada experimentalmente. E como:

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{A.8})$$

tem-se:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c(1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{A.9})$$

Substituindo-se a Equação A.9 na Equação A.6, obtém-se:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1 + c) + 2\nu(1 - c) \quad (\text{A.10})$$

A maior parte dos materiais resistivos utilizados na confecção dos extensômetros elétricos são ligas especiais, no qual o valor de c é igual a 1. Substituindo-se c por 1 na Equação A.10, tem-se:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = 2 \quad (\text{A.11})$$

O valor definido na Equação A.11 pode ser substituído por uma constante K , também conhecida como fator sensibilidade do extensômetro, obtendo-se:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (\text{A.12})$$

Pela Equação A.12, deduz-se que a deformação, dentro de certos limites, é diretamente proporcional a uma variação relativa da resistência do extensômetro. E quando o fator de sensibilidade (K) for conhecido e medindo-se a variação relativa da resistência, obtém-se a medida da deformação (ε) no ponto onde foi colado o extensômetro.

A magnitude da deformação é muito pequena. Por isto, a magnitude é freqüentemente multiplicada por 10^6 e expressa em unidade de $\mu m/m$. Esta unidade é também grafada como $\mu\varepsilon$ (LIMA et al., 2007).

Em geral, a resistência elétrica dos extensômetros possuem 120 ou 350 Ω , podendo haver outros valores de resistência para usos especiais como 500 e 1000 Ω . Esta resistência deve ser elevada para obter condições de se medir as variações da resistência elétrica (LEUCKERT, 2000; MAGALHÃES, 2003).

Os valores do fator de sensibilidade variam entre 2,0 e 4,0 como mostrado na Tabela A.1. Porém, a liga níquel possui um valor de K de -12, na qual provocará uma diminuição de sua resistência elétrica quando submetido a uma tração.

Tabela A.1: Valores de K de algumas ligas utilizadas na confecção dos extensômetros (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

Metal ou Liga (%)	Nome Comercial	K	Observação
Cobre - Níquel (44 N_i , 55 C_u , 1 M_n)	Advance	+ 2,1	Uso geral
Cobre - Níquel (45 N_i , 55 C_u)	Constantan	+ 2,1	Uso geral
Níquel - Cromo (80 N_i , 20 C_r)	Nicromo V	+ 2,2	Trabalha à altas temperaturas e resistente à oxidação
Níquel - Cromo (74 N_i , 20 C_r , 3 F_e , 3 A_l)	Karma	+ 2,1	Melhor resistência à fadiga e excelente estabilidade
Aço - Cromo - Molibidênio (36 N_i , 8 C_r , 0,5 M_o , 55,5 F_e)	Isolastic	+ 3,5	Sensível à temperatura
Níquel (100 N_i)	Níquel	- 12,0	-

A.3 Classificação

Os extensômetros de resistência elétrica podem ser classificados de acordo com: o material utilizado como elemento resistivo; o material utilizado como base e a configuração da grade (JÚNIOR, 2003; MAGALHÃES, 2003).

O material utilizado como elemento resistivo divide-se em: extensômetro de fio e de lâmina. O material utilizado como base divide-se em: extensômetro com base de papel; baquelite; poliéster; poliamida; epóxi; dentre outros. E a configuração da grade divide-se em: extensômetro uniaxial; biaxial; triaxial e com modelos especiais.

A.3.1 Material utilizado como elemento resistivo

Os extensômetros de fio, ilustrado na Figura A.2, são constituídos de um fio metálico resistivo fino disposto em ziguezague, colocado em uma base, na qual serve para transmitir as deformações da estrutura em estudo para o fio e isolar eletricamente esse fio (LEUCKERT, 2000; MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

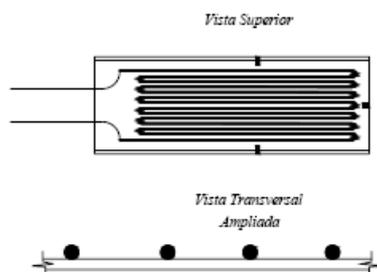


Figura A.2: ERE do tipo fio (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).

Os extensômetros de lâmina, ilustrado na Figura A.3, foram produzidos pela primeira vez na Inglaterra em 1952 por Saunders e Roe. Estes, a princípio, são idênticos aos de fio, mas a diferença básica está no processo de fabricação, na qual se usa uma finíssima lâmina de uma liga resistiva depositada sobre uma base. Em seguida, essa lâmina é recortada por um processo de máscara fotosensitiva corroída com ácido (idêntico ao processo de fabricação de circuito impresso) para formar uma grade desejada (LEUCKERT, 2000; MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

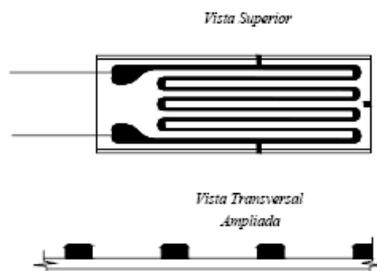


Figura A.3: ERE do tipo lâmina (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).

As vantagens deste tipo de extensômetro em relação aos de fios são: a versatilidade de fabricação; baixo custo; podem ser feitos de vários tamanhos; grande estabilidade durante prolongamento do período de carga; são mais estáveis durante exposição a temperatura externas e possuem uma área maior de colagem. Em consequência disto, diminuem a tensão no adesivo, obtendo-se deformação lenta e histerese bem menores (LEUCKERT, 2000; MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

As principais ligas metálicas resistivas utilizadas para fabricação de extensômetros são: Constantan, Isoelastic, K-alloy, Karma, dentre outras (JÚNIOR, 2003).

A.3.2 Material utilizado como base

A base do extensômetro era feita de papel, mas surgiram os extensômetros com de base de poliamida, epóxi, baquelite e poliéster com o desenvolvimento da tecnologia dos materiais. Estas bases devem atender a certas especificações como: espessura mínima; elevada resistência mecânica; elevada rigidez dielétrica; boa aderência às colas; material não higroscópico e que a temperatura produza o mínimo de influência possível (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

Quando o material base combina-se com o material utilizado como elemento resistivo, o extensômetro apresenta certas aplicações específicas como: medições dinâmicas, medições estáticas, medições em alta temperatura, dentre outras (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

A.3.3 Configuração da grade

Quando deseja-se realizar medições de deformações em uma única direção conhecida, utiliza-se os extensômetros uniaxial. Estes extensômetros são fabricados com uma única grade, como ilustrados nas Figuras A.4, A.5 e A.6, e com uma dupla grade como ilustrado na Figura A.7 (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

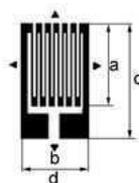


Figura A.4: Extensômetro uniaxial simples - forma tradicional (ECXELSENSOR, 2007).

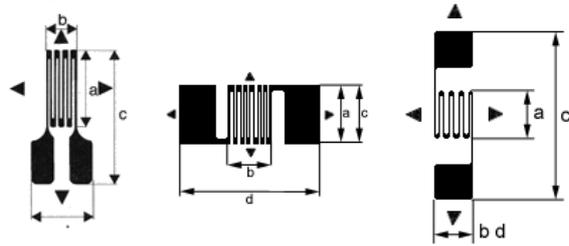


Figura A.5: Extensômetros uniaxiais simples - forma especial (ECXELESENSOR, 2007).

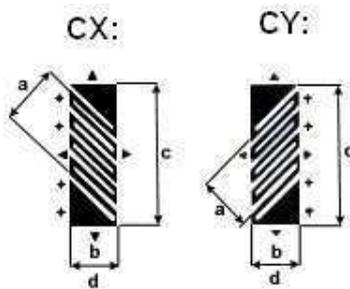


Figura A.6: Extensômetros uniaxiais a 45° (ECXELESENSOR, 2007).

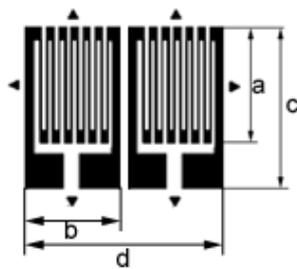


Figura A.7: Extensômetro uniaxial duplo (ECXELESENSOR, 2007).

Quando deseja-se realizar medições em uma ou duas direções conhecidas, utiliza-se os extensômetros biaxiais. Estes extensômetros são fabricados com uma forma de roseta dupla, na qual é composta por dois extensômetros sobre uma mesma base sensível a deformação em duas direções como ilustrado na Figura A.8 (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

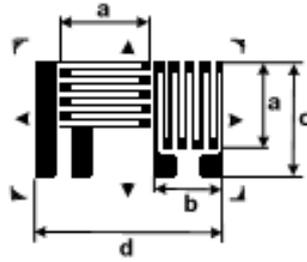


Figura A.8: Extensômetros biaxial a 90° (ECXELSENSOR, 2007).

Quando deseja-se realizar medições em uma ou mais direções não conhecidas, utiliza-se os extensômetros triaxial. Estes extensômetros são fabricados com uma forma de roseta tripla, na qual é composta por três extensômetros sobre uma mesma base sensível a deformação em três direções como ilustrado nas Figuras A.9 e A.10 (MAGALHÃES, 2003).

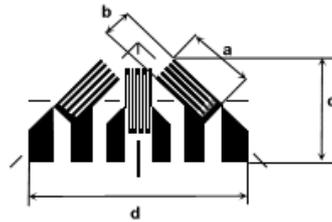


Figura A.9: Extensômetro triaxial a 90° (ECXELSENSOR, 2007).

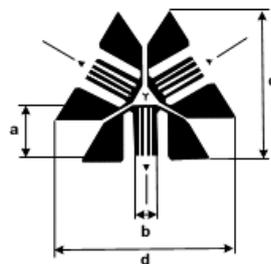


Figura A.10: Extensômetro triaxial a 120° (ECXELSENSOR, 2007).

A.4 Sistema de codificação

As empresas fornecem aos extensômetros uma codificação baseada em um conjunto de letras e números que os identifica, por meio suas características. A codificação do extensômetro, ilustrada na Figura A.11, é baseada na codificação da empresa Excel Sensor (EXELSENSOR, 2007).



Figura A.11: Sistema de codificação (EXELSENSOR, 2007).

A.5 A escolha correta

A escolha correta do extensômetro de resistência elétrica deve obedecer a três fatores: a dimensão do extensômetro; a geometria da grade e o tipo do extensômetro (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

A.5.1 Dimensão do extensômetro

As dimensões do extensômetro, ilustradas na Figura A.4, são informadas pelas letras a, b, c e d, onde as letras a e c representam o comprimento da grade e total do extensômetro respectivamente e as letras b e d representam a largura da grade e total do extensômetro respectivamente. Uma vez que o extensômetro vai indicar uma deformação média, essas dimensões não podem ser superiores a região onde ocorrem as maiores deformações (JÚNIOR, 2003).

A.5.2 Geometria da grade

Para medições de deformações em uma única direção e em duas direções conhecidas, utiliza-se a configuração do extensômetro uniaxial e a do biaxial respectivamente. Entretanto, para esses dois tipos de medições, a geometria da grade do extensômetro deve ser posicionada de tal modo que a direção da deformação coincida com a direção da grade. Para medições de deformações não conhecidas, utiliza-se a configuração do extensômetro triaxial (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

A.5.3 Tipo do extensômetro

A escolha do tipo do extensômetro depende de sua aplicação, por exemplo, nas medidas de deformações estáticas ou dinâmicas, e das condições de trabalho, por exemplo, a corrente elétrica de excitação e a auto-compensação de temperatura (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

Para ser utilizado em medições de deformações estáticas, um ERE deve satisfazer as seguintes condições: ter uma grande sensibilidade longitudinal; uma mínima sensibilidade transversal; uma baixa sensibilidade a temperatura, onde grandes variações de temperatura ocorram, e uma máxima estabilidade elétrica. E para medições de deformações dinâmicas, o extensômetro deve ter uma grande sensibilidade longitudinal e ser confeccionado com materiais resistentes à fadiga (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

A corrente elétrica de excitação que deve ser imposta ao circuito depende da corrente elétrica suportada pelo extensômetro. Os valores práticos são os seguintes: até 25 *mA* para os extensômetros com base de papel; até 50 *mA* para os extensômetros com base de baquelite colado em metal e até 6 *mA* para os extensômetros aplicados em materiais de baixo coeficiente de condução térmica, tais como: plásticos, gesso, concreto, entre outros (MAGALHÃES, 2003; JÚNIOR, 2003).

A variação da resistência elétrica do extensômetro em função da temperatura (T) é decorrente de quatro efeitos: da sensibilidade do extensômetro (K) que cresce ou decresce com o aumento da temperatura dependendo da liga, acarretando em uma variação da resistência muito pequena, assim, sendo este efeito ignorado; da grade do extensômetro que sofre uma expansão, com o aumento da temperatura, por meio da expressão: $\Delta L/L = \alpha_1 \Delta T$, na qual α_1 é o coeficiente de dilatação térmica do material do extensômetro; da estrutura onde está colado o extensômetro, sofrendo uma expansão com o aumento da

temperatura, por meio da expressão: $\Delta L/L = \beta_1 \Delta T$, na qual β_1 é o coeficiente de dilatação térmica do material da estrutura à qual está aplicado extensômetro e da resistência do extensômetro que varia com o aumento da temperatura, por meio da expressão: $\Delta R/R = \gamma_1 \Delta T$, na qual γ_1 é o coeficiente térmico de resistividade elétrica do extensômetro (LEUCKERT, 2000).

Ao variar a temperatura, utilizando-se $\alpha_1 \neq \beta_1$, uma expansão diferente ocorrerá entre o extensômetro e o material da estrutura. Esta expansão diferente, provocará no extensômetro uma deformação mecânica, $\varepsilon = (\beta_1 - \alpha_1) \Delta T$, que não ocorre na estrutura. O extensômetro reage a esta deformação indicando uma variação na resistência ($\Delta R/R = \varepsilon K$), da mesma maneira que indicaria uma variação para uma deformação devido a uma carga aplicada à estrutura. É impossível separar-se essa “deformação aparente” da deformação provocada por uma carga aplicada (LEUCKERT, 2000; MAGALHÃES, 2003).

A variação relativa da resistência elétrica com a temperatura pode ser expressa por:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T} = (\beta_1 - \alpha_1) K \Delta T + \gamma_1 \Delta T \quad (\text{A.13})$$

No entanto, pode haver uma compensação no extensômetro de modo a anular o efeito dos três fatores geradores da deformação aparente. Em primeiro lugar, tem-se que combinar perfeitamente α_1 e β_1 , com $\gamma_1 = 0$ e, em segundo lugar, α_1 e β_1 descasados, desde que o efeito de γ_1 cancele o efeito do descasamento de α_1 e β_1 (LEUCKERT, 2000).

A.6 Técnica de aplicação do ERE

A técnica para aplicação do extensômetro, de preparo da superfície, de colagem, de fiação, de verificação e de proteção do extensômetro, são utilizadas para obter resultados fiéis da medida de deformação. Portanto, adota-se medidas que minimizem ou eliminem os efeitos indesejáveis como a influência da temperatura, da umidade e qualquer outro fator (MAGALHÃES, 2003).

A técnica descrita nesta dissertação é utilizada para a maioria dos casos, mas pode ser modificada para um uso específico.

A.6.1 Preparo do local da aplicação

Inicialmente, deve-se limpar o local de trabalho, as ferramentas de manipulação e a região da superfície de fixação do extensômetro, com desengraxante ¹, como ilustrado nas Figuras A.12 (a) e (b). O solvente mais utilizado é o álcool isopropílico, mas qualquer outro solvente, como acetona, benzila e tolueno, poderá ser usado desde que não venha reagir com o material que está sendo limpo.

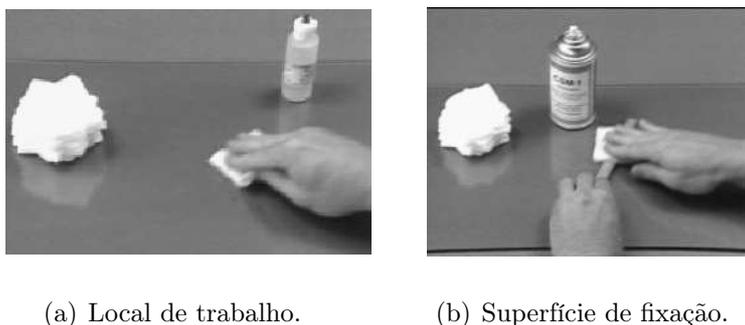


Figura A.12: Limpeza inicial do extensômetro.

É conveniente aplicar o produto, numa região maior do que aquela ocupada pelo ERE, sem deixá-lo evaporar, e secar a superfície com material adequado como gaze ou algodão, de preferência, envolto numa pinça. Essa operação deve ser repetida tantas vezes até que a gaze ou o algodão não apresente sinal de sujeira.

Para conseguir uma superfície ideal, necessita-se lixar a superfície de fixação, como ilustrado na Figura A.13, com lixa para metais de números 240 à 320 de modo a obter uma superfície plana que não venha interferir no desempenho do extensômetro. Quando obtida a superfície ideal, deve-se repetir o processo de limpeza descrito acima.



Figura A.13: Lixando a superfície de fixação do extensômetro.

¹Solvente orgânico recomendado na limpeza e remoção de gorduras de objetos utilizados no processo de colagem, bem como de locais de trabalho.

Quando limpa a superfície ideal, deve-se fazer as marcações necessárias para o posicionamento do extensômetro, como ilustrado na Figura A.14, evitando a utilização do lápis, pois o grafite é lubrificante e se deixado no local de colagem ocorrerá formação de bolhas. Essa operação é feita com o auxílio de ferramentas para traçados como réguas, transferidores, dentre outros.



Figura A.14: Marcações do posicionamento do extensômetro.

Marcada a posição, deve-se repetir o processo de limpeza descrito acima utilizando-se o condicionador² na região de fixação e, em seguida, o neutralizador³. Isto garantirá uma boa colagem do extensômetro na peça. Para evitar recontaminação e oxidação da superfície, o extensômetro deve ser instalado até 30 minutos após a preparação da superfície.

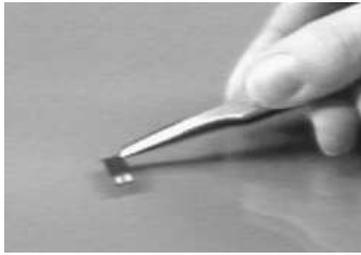
A.6.2 Colagem do extensômetro

Os adesivos normalmente utilizados na colagem de extensômetro são: poliéster; fenólico; cianoacrilato; nitrocelulose; fenólico; epóxi; poliamida e cerâmico.

Concluída a preparação da superfície, retira-se o extensômetro de sua embalagem com uma pinça, cuidadosamente, pelos cantos, evitando tocar na área da grade, como ilustrado na Figura A.15 (a), e coloca-o sobre a superfície de trabalho com a face de colagem (opaca) virada para baixo como ilustrado na Figura A.15 (b). Em seguida, com o auxílio de uma fita adesiva transparente, durex ou celofone, centralizada sobre o extensômetro, como ilustrado nas Figuras A.15 (b) e (c), transferi-se e posiciona-se o extensômetro para o local de colagem na peça metálica, como ilustrado na Figura A.16, tomando cuidado para que o extensômetro fique alinhado.

²Líquido volátil, ligeiramente ácido, recomendado para a remoção de pequenas oxidações superficiais e para melhorar as condições de adesão do extensômetro.

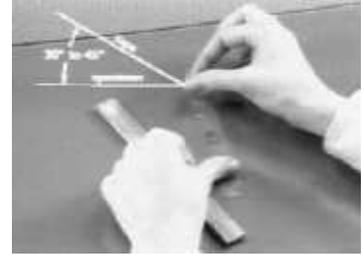
³Líquido volátil, ligeiramente básico, usado para neutraliza a acidez introduzida pelo condicionador.



(a) Retirando o extensômetro.



(b) Centralização da fita.



(c) Transporte do extensômetro.

Figura A.15: O transporte e posicionamento do extensômetro.

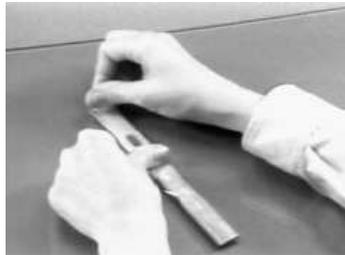


Figura A.16: Posicionamento do extensômetro sobre a peça.

A colagem, propriamente dita, é feita descolando a fita adesiva até que o extensômetro e o conector estejam separados da superfície de fixação, como ilustrado na Figura A.17 (a), aplicando uma quantidade generosa de adesivo sobre o ponto de colagem e, novamente, colando a fita como ilustrado nas Figuras A.17 (b) e (c) respectivamente.



(a) Retirando a fita.



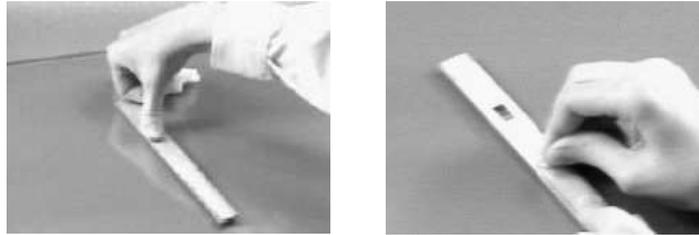
(b) Aplicando adesivo.



(c) Colocando a fita.

Figura A.17: Colagem do extensômetro sobre a peça.

É interessante realizar uma pequena pressão sobre o extensômetro com o dedo ou material adequado para eliminar o excesso de cola e evitar bolhas, como ilustrado na Figura A.18 (a). Após alguns minutos, retira-se a fita adesiva com cuidado para poder verificar e soldar os fios nos terminais do extensômetro, como ilustrado na Figura A.18 (b).



(a) Aplicando pressão.

(b) Retirando a fita.

Figura A.18: Extensômetro sobre a peça.

A.6.3 Verificação e fiação

Após o processo de colagem do extensômetro, é necessário realizar testes de verificação das condições elétricas do extensômetro. Em primeiro lugar, medi-se o valor da resistência do extensômetro, na qual deve ser igual a resistência nominal fornecida pelo fabricante. Nesta operação pode-se, também, constatar a presença de bolhas de ar debaixo da grade do extensômetro, apalpando-o com uma borracha macia. Caso ocorra uma variação de resistência, é sinal que o extensômetro não está bem colado, devendo ser retirado.

Concluído o teste de verificação das condições elétricas do extensômetro, é necessário descascar e torcer os fios com aproximadamente 2,5 cm do isolamento de ambas as pontas dos fios como ilustrado nas Figuras A.19 (a) e (b) respectivamente.

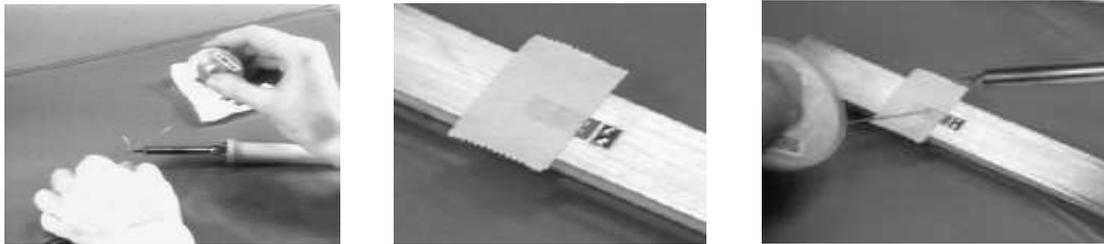


(a) Fios descascados.

(b) Fios torcidos.

Figura A.19: Preparação dos fios.

Terminado a preparação dos fios, deve-se estanhar os fios com o ferro de solda na temperatura adequada como ilustrado na Figura A.20 (a). Em seguida, deve-se proteger a região da grade do extensômetro com uma fita adesiva, como ilustrado na Figura A.20 (b), para estanhar os terminais do extensômetro como ilustrado na Figura A.20 (c).



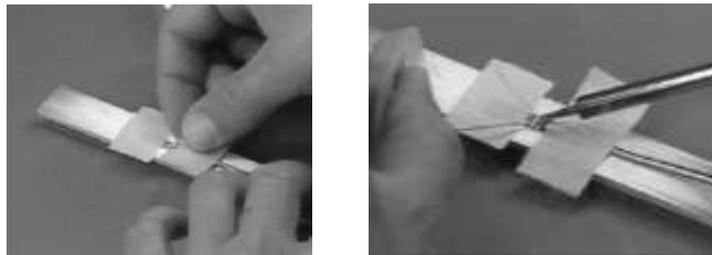
(a) Fios estanhados.

(b) Proteção da grade.

(c) Terminais estanhados.

Figura A.20: Preparação para a soldagem dos fios nos terminais do extensômetro.

Estanhado os terminais do extensômetro, deve-se colocar um pedaço de cerca de 2,5 cm de fita adesiva sobre o fio, como ilustrado na Figura A.21 (a), para posicionar e executar a soldagem dos fios nos terminais do extensômetro, como ilustrado na Figura A.21 (b).



(a) Posicionamento dos fios.

(b) Soldagem dos fios.

Figura A.21: Soldagem dos fios nos terminais do extensômetro.

Concluída a soldagem dos fios nos terminais do extensômetro, deve-se retirar a fita adesiva, com ajuda de uma pinel e de um solvente, como ilustrado na Figura A.22 (a). E, em seguida, secar com um chumaço de gaze como ilustrado na Figura A.22 (b).



(a) Retirando a fita.

(b) Secando a área.

Figura A.22: Preparação para a fixação do fio na peça.

Para finalizar o processo de fixação do extensômetro, deve-se prender e fixar o fio à aproximadamente 2,5 cm do terminal com a ajuda de uma pinça e uma fita respectivamente, como ilustrado nas Figuras A.23 (a) e A.23 (b).



(a) Fixação do fio na peça.



(b) Colocando a fita.

Figura A.23: Fixando o fio na peça.

A.6.4 Proteção

Os materiais de proteção tem como finalidade: evitar presença de umidade; evitar curto circuito entre os terminais e os extensômetros e entre estes e a peça de ensaio.

A operação de proteção, caso desejada, deve ser realizada logo após a fixação do fio na peça. Para isto, aplica-se uma camada de borracha de silicone ou de resina de poliéster ou epóxi para garantir o isolamento elétrico entre os elementos condutores. Terminado a aplicação, deve-se esperar secar por 24 horas.

A.7 Circuitos

Os circuitos elétricos utilizados em extensometria são: o potenciométrico e o de ponte de Wheatstone. Os circuitos potenciométricos são recomendados para ensaios dinâmicos e os circuitos em ponte de Wheatstone são recomendados para ensaios estáticos e dinâmicos. Portanto, nesta seção será descrito o circuito de ponte de Wheatstone.

A.7.1 A Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone, ilustrada na Figura A.24, é um circuito composto de quatro resistências equivalentes R_i ($i = 1, 2, 3$ e 4). Estas resistências são excitadas por uma fonte de tensão contínua, apresentando uma diferença de potencial “ V_{EX} ”, nos terminais “A” e “D”. E a tensão “ V_0 ”, entre os terminais “B” e “C”, é tensão do sinal de saída (MAGALHÃES, 2003; INSTRUMENTS, 2003).

É muito comum a utilização do circuito de ponte de Wheatstone na comparação de impedâncias (resistência, capacitância e indutância) e, também, pode ser utilizado para medir suas variações relativas. Para isto, é necessário um condição denominada de balanço ou equilíbrio que ocorre se e somente se $R_1/R_2 = R_4/R_3$ ou quando a saída indicar uma tensão V_0 nula. Desta forma, consegue-se comparar a resistência R_1 com a resistência R_2 , conhecendo-se a razão entre R_4 e R_3 que leve a ponte ao equilíbrio, assim como comparar R_4 com R_3 , conhecendo-se a razão entre R_1 e R_2 (LEUCKERT, 2000; INSTRUMENTS, 2003).

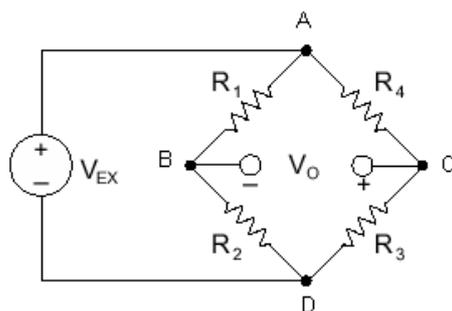


Figura A.24: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone.

Onde:

$$V_0 = \left[\left(\frac{R_3}{R_4 + R_3} \right) - \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \right] \cdot V_{EX} \quad (\text{A.14})$$

O circuito de ponte de Wheatstone é utilizado para medir variações relativas que ocorre em suas impedâncias, em um só dos elementos da ponte, simultaneamente em dois elementos ou, ainda, simultaneamente nos quatro elementos da ponte, por meio da medição da variação da tensão do sinal de saída (V_0), diferente de zero, por unidade da tensão de excitação. No primeiro caso a ponte denomina-se de “ponte de um elemento ativo” ou “1/4 de ponte”, no segundo caso “ponte de dois elementos ativos” ou “1/2 de ponte” e no terceiro caso “ponte de quatro elementos ativos” ou “ponte completa” (LEUCKERT, 2000).

A.7.2 Ponte de Wheatstone com um ERE

A ponte de Wheatstone, ilustrada na Figura A.25, é um circuito que compõe-se de três resistências equivalentes R_i ($i = 1, 2$ e 3) e um extensômetro de resistência elétrica ($R_G + \Delta R$).

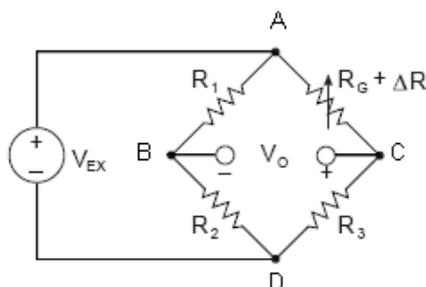


Figura A.25: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com um ERE.

Assumindo-se que:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_G$$

$$R_4 = R_G + \Delta R$$

$$\Delta R = K\varepsilon R_G$$

Em seguida, substituindo-se na Equação A.14, temos:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = \frac{-\varepsilon K}{4} \left(\frac{1}{1 + \frac{K\varepsilon}{2}} \right) \quad (\text{A.15})$$

Pode-se notar, na Equação A.15, que nesta configuração o termo $\left(\frac{1}{1 + \frac{K\varepsilon}{2}}\right)$ provoca uma não linearidade na relação entre a tensão medida e a deformação no corpo de prova. Esta configuração é desaconselhada para medições exatas, pois se ignorou a presença da resistência elétrica dos fios condutores (R_L) que conecta o ERE a ponte.

Portanto, a ponte de Wheatstone, ilustrada na Figura A.26, é um circuito que compõe-se de três resistências equivalentes R_i ($i = 1, 2$ e 3) e um extensômetro de resistência elétrica ($R_G + \Delta R$) conectado a dois fios de resistências R_L .

Assumindo-se que:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_G$$

$$R_4 = R_G + \Delta R + 2R_L$$

$$\Delta R = K\varepsilon R_G$$

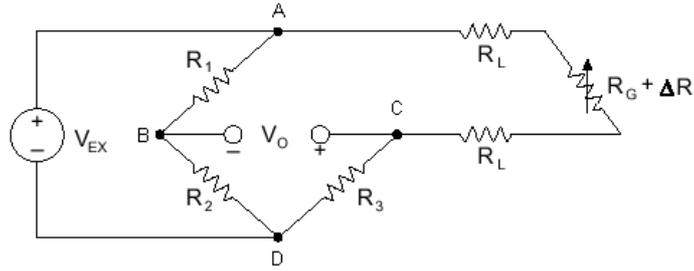


Figura A.26: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com 1 ERE conectado a 2 fios.

Em seguida, substituindo-se na Equação A.14, temos:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\left(\frac{\varepsilon K R_G}{4} + \frac{R_L}{2}\right) \frac{1}{[R_G(1 + \frac{\varepsilon K}{2}) + R_L]} \quad (A.16)$$

Nesta configuração, a maior dificuldade é obtida quando necessita-se compensar os efeitos de temperatura, na qual a resistência ao longo do fio pode sofrer alterações. A variação da resistividade do fio em função da temperatura pode gerar erros de alguns $\mu m/m$.

Na Figura A.27, ilustra-se a ponte de Wheatstone composta por três resistências equivalentes R_i ($i = 1, 2$ e 3) e um extensômetro de resistência elétrica ($R_G + \Delta R$) conectado a três fios de resistências R_L ($i = 1, 2$ e 3). Nesta configuração, as resistências R_{L1} e R_{L3} dos fios estão conectadas nos braços adjacentes da ponte, na qual qualquer mudança na resistência em função da temperatura manterá a ponte equilibrada, resolvendo o problema da configuração anterior. A resistência R_{L2} , conectada a entrada de medição, será desprezível, pois o medidor (multímetro, ou amplificador de instrumentação) possui uma resistência de entrada bastante elevada.

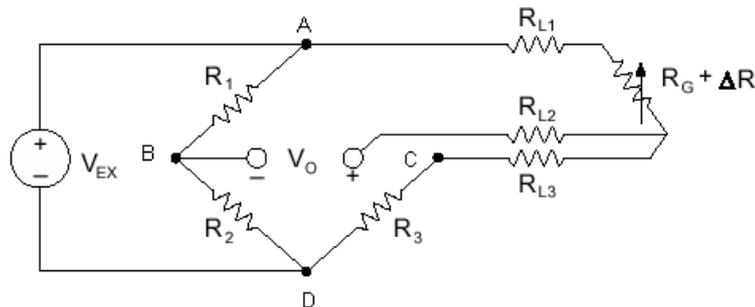


Figura A.27: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com 1 ERE conectado a 3 fios.

Assumindo-se que:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_G$$

$$R_{L1} = R_{L3} = R_L$$

$$R_4 = R_G + \Delta R + R_{L1} + R_{L3} = R_G + \Delta R + 2R_L$$

$$\Delta R = K\varepsilon R_G$$

Em seguida, substituindo-se na Equação A.14, temos:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{\varepsilon K}{4} \frac{1}{\left(1 + \frac{\varepsilon K}{2} + \frac{R_L}{R_G}\right)} \quad (\text{A.17})$$

Comparando-se a Equação A.17 com a A.15, tem-se que a resistência dos condutores é introduzida na expressão, por meio do termo $\frac{R_L}{R_G}$. Para minimizar os efeitos da resistência dos condutores R_L na Equação A.17, aconselha-se utilizar extensômetros com resistência nominal R_G elevada. Desta forma, os efeitos da não linearidade da relação $\frac{V_0}{V_{EX}}$ serão minimizados.

A.7.3 Ponte de Wheatstone com dois extensômetros

A ponte de Wheatstone, ilustrada na Figura A.28, é um circuito que compõe-se de duas resistências equivalentes R_i ($i = 1$ e 2) e dois extensômetros de resistência elétrica, sendo um com resistência $R_G + \Delta R$ e um com $R_G - \Delta R$.

Os extensômetros devem ser colados nas faces do corpo de prova, na qual sofrem deformações opostas, de maneira que, enquanto um se contrai, o outro se estende na mesma proporção. Desta forma, as resistências sofrerão as mesmas alterações, além de minimizar o efeito da temperatura, pois a variação da temperatura local será sensibilizado pelas duas grades resistivas dos extensômetros.

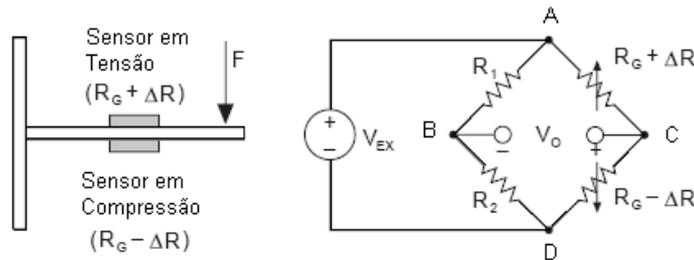


Figura A.28: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com dois extensômetros.

Assumindo-se que:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R_G \\ R_3 &= R_G - \Delta R \\ R_4 &= R_G + \Delta R \\ \Delta R &= K\varepsilon R_G \end{aligned}$$

Em seguida, substituindo-se na Equação A.14, temos:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{K\varepsilon}{2} \quad (\text{A.18})$$

Pode-se notar, na Equação A.18, que nesta configuração apresenta, além da linearidade, um valor duas vezes maior na tensão medida em relação a deformação no corpo de prova do que em um circuito utilizando apenas um extensômetro. Ou seja, a utilização de dois extensômetros faz com que a sensibilidade da ponte seja dobrada. Esta configuração é desaconselhada para medições exatas, pois se ignorou a presença da resistência elétrica dos fios condutores (R_L) que conecta o ERE a ponte.

Portanto, a ponte de Wheatstone, ilustrada na Figura A.29, é um circuito que compõe-se de duas resistências equivalentes R_i ($i = 1$ e 2) e dois extensômetros de resistência elétrica ($R_G + \Delta R$ e $R_G - \Delta R$) conectados a cinco fios de resistências R_L . Nesta configuração, as resistências R_{L1} , R_{L2} , R_{L3} e R_{L4} dos fios estão conectadas nos braços adjacentes da ponte, na qual qualquer mudança na resistência em função da temperatura manterá a ponte equilibrada. A resistência R_{L5} , conectada a entrada de medição, será desprezível, pois o medidor (multímetro, ou amplificador de instrumentação) possui uma resistência de entrada bastante elevada.

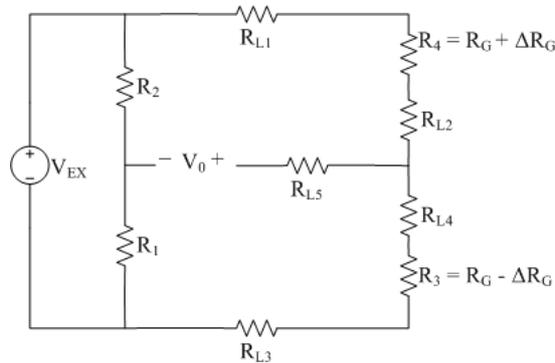


Figura A.29: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com 2 ERE's conectado a 5 fios.

Assumindo-se que:

$$R_1 = R_2 = R_G$$

$$R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R_{L4} = R_L$$

$$R_3 = R_G - \Delta R + R_{L3} + R_{L4} = R_G - \Delta R + 2R_L$$

$$R_4 = R_G + \Delta R + R_{L1} + R_{L2} = R_G + \Delta R + 2R_L$$

$$\Delta R = K\varepsilon R_G$$

Em seguida, substituindo-se na Equação A.14, temos:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{K\varepsilon}{2} \frac{R_g}{(2R_L + R_g)} \quad (\text{A.19})$$

Comparando-se a Equação A.18 com a A.19, tem-se que a resistência dos condutores é introduzida na expressão, por meio do termo $\frac{R_g}{2R_L + R_g}$. Para minimizar os efeitos da resistência dos condutores R_L na Equação A.19, aconselha-se utilizar extensômetros com resistência nominal R_G elevada. Desta forma, os efeitos da não linearidade da relação $\frac{V_0}{V_{EX}}$ serão minimizados.

A.7.4 Ponte de Wheatstone com quatro extensômetros

A ponte de Wheatstone, ilustrada na Figura A.30, é um circuito que compõe-se de quatro extensômetros de resistência elétrica, sendo dois com resistência $R_G + \Delta R$ e dois com $R_G - \Delta R$. Os extensômetros devem ser colados nas faces do corpo de prova, no qual sofrem deformações opostas, de maneira que, enquanto dois se contraem, os outros se estendam na mesma proporção. Desta forma, as resistências sofrerão as mesmas alterações, além de minimizar o efeito da temperatura, pois a variação da temperatura local será sensibilizado pelas quatro grades resistivas dos extensômetros.

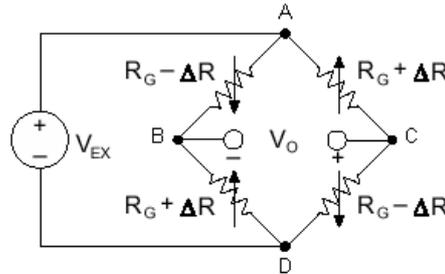


Figura A.30: Diagrama elétrico da ponte de Wheatstone com quatro extensômetros.

Assumindo-se que:

$$R_1 = R_3 = R_G - \Delta R$$

$$R_2 = R_4 = R_G + \Delta R$$

$$\Delta R = K\varepsilon R_G$$

Em seguida, substituindo-se na Equação A.14, temos:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -K\varepsilon \quad (\text{A.20})$$

Pode-se notar, na Equação A.20, que nesta configuração apresenta, além da linearidade, um valor quatro vezes maior na tensão medida em relação a deformação no corpo de prova do que em um circuito utilizando apenas um extensômetro. Ou seja, a utilização de quatro extensômetros faz com que a sensibilidade da ponte seja quadruplicado.

Apêndice B

Código do Treinamento Termomecânico

A placa microprocessada foi utilizada para a implementação do treinamento termomecânico dos fios de LMF. Para esta implementação, desenvolveu-se um código em linguagem C no programa da KEIL da μ Vision como apresentado a seguir:

```
// UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
// DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE
// ALUNO: WALBER MEDEIROS LIMA

#include "ADuC842.H" /* Inclui o Cabeçalho do ADuC842 */
#include <STDIO.H> /* Inclui o Cabeçalho I/O */

/*-----
                Protótipos de Funções
-----*/

void config_tempo (void); /* Configuração do tempo */
void config_serial (void); /* Configuração da porta serial */
void config_pwm (void); /* Configuração do PWM */
void config_dac (void); /* Configuração do DAC */
void config_adc (void); /* Configuração do conversor A/D */
```

```

/*-----
                Variáveis Auxiliares
-----*/

unsigned int hora, minuto, segundo;
int a, b, c;

/*-----
                Função Principal
-----*/

void main (void)
{

P0 = 0;
a = 0;
b = 1;
c = 0;
P2_6 = 0; P2_7 = 0;

/* Chamando as Funções Auxiliares */

config_serial();
config_tempo();
config_pwm ();
config_dac ();
config_adc();

/* Início do Programa */

while (1){

hora = HOUR;
minuto = MIN;
segundo = SEC;

```

```

if(a == 0){
printf("TEMPO DE DURAÇÃO DO TREINAMENTO (RESFRIANDO): %d:%d:%d \n\r" ...
... ,hora,minuto,segundo);
printf("Quantidade de ciclos: %d \n\r" ,b);
}

if (a == 1){ /* Aquecimento */
INTVAL = 0x04; /* Tempo de Aquecimento de 5s */
PWMCON = 0x97; /* 0x1001.0111 -> Modo 1 - PWM 16 com resolução variável */
PWM1H = 0x07; /* PWM1H/L -> Determina o período do PWM_1 de 15 bits */
PWM1L = 0xFF;
PWMOH = 0x07; /* PWMOH/L -> Determina o duty cycle da saída do PWM_1 */
PWMOL = 0xFF;
printf("TEMPO DE DURAÇÃO DO TREINAMENTO (AQUECENDO): %d:%d:%d \n\r" ...
... ,hora,minuto,segundo);
}

if (a == 2){/* Resfriamento */
INTVAL = 0x0B; /* Tempo de Resfriamento de 25s */
PWMCON = 0x97; /* 0x1001.0111 -> Modo 1 - PWM 16 com resolução variável */
PWM1H = 0x07; /* PWM1H/L -> Determina o período do PWM_1 de 15 bits */
PWM1L = 0xFF;
PWMOH = 0x00; /* PWMOH/L -> Determina o duty cycles da saída do PWM_1 */
PWMOL = 0x00;
printf("TEMPO DE DURAÇÃO DO TREINAMENTO (RESFRIANDO): %d:%d:%d \n\r" ...
... ,hora,minuto,segundo);
printf("Quantidade de ciclos: %d \n\r" ,b);
}

if (hora == 8 & minuto == 20 & segundo == 0){ /* Tempo do Final do Tratamento */
a=3;
PWMCON = 0x97; /* 0x1001.0111 -> Modo 1 - PWM 16 com resolução variável */
PWM1H = 0x07; /* PWM1H/L -> Determina o período do PWM_1 de 15 bits */

```

```

PWM1L = 0xFF;
PWM0H = 0x00; /* PWM0H/L -> Determina o duty cycle da saída do PWM_1 */
PWM0L = 0x00;
EA = 0;

while(1){
PWMCON = 0x97; /* 0x1001.0111 -> Modo 1 - PWM 16 com resolução variável */
PWM1H = 0x07; /* PWM1H/L -> Determina o período do PWM_1 de 15 bits */
PWM1L = 0xFF;
PWM0H = 0x00; /* PWM0H/L -> Determina o duty cycles da saída do PWM_1 */
PWM0L = 0x00;
printf ("TERMINOU O TEMPO DE DURAÇÃO DO TREINAMENTO DA LIGA \n");
} // fim do 2º While

} // fim do if

} // fim do 1º While

} //fim do main

/*-----
          Funções Auxiliares de interrupção
-----*/

void TIC_int () interrupt 10 {

a++;
b++;

if(a == 2){b=b-1;}

if(a == 3){a = 1;}

}

```

```
/*-----  
                          Funções Auxiliares  
-----*/
```

```
void config_tempo (void)
```

```
{
```

```
/* Configurações do TIC */
```

```
TIMECON = 0x13; /* Configura o TIC em segundos */
```

```
INTVAL = 0x0B; /* Tempo de Resfriamento de 25s */
```

```
HOUR = 00;
```

```
MIN = 00;
```

```
SEC = 0;
```

```
/* Configuração da interrupção externa */
```

```
IEIP2 = 0xA4; /* Habilita a interrupção do TIC */
```

```
EA = 1; /* Habilita interrupções */
```

```
}
```

```
void config_serial (void)
```

```
{
```

```
/* Configura o clock em 8.388608MHz */
```

```
PLLCON = 0x81; // 81
```

```
/* Configuração do Timer 3 como gerador de BAUD RATE de 115200KPS */
```

```
T3CON = 0x83; // 81
```

```
T3FD = 0x09; // 09
```

```
/* Configuração dos registradores da porta serial UART */
```

```
SCON = 0x52;
```

```
}
```

```
void config_pwm (void){
```

```
/* Configura o PWM no modo 0 */
```

```
PWMCON = 0x00;
```

```
P2_6 = 0; P2_7 = 0;
```

```
}
```

```
void config_dac (void){
/* Configura o DAC DAC_0 e DAC_1 com 0V */
DACCON = 0x7B;
}
void config_adc (void){
ADCCON1 = 0x80; /* 0x1000.0000 (MD1=1) */
ADCCON2 =0x20; /* 0x0010.0000 (CCONV=1, CS2=0, CS1=0 e CS0=0) */
}
```

Apêndice C

Código para a Comunicação GPIB

Na análise do comportamento dos fios de LMF foram utilizados três multímetros e uma fonte de corrente com comunicação GPIB entre os instrumentos, na qual utilizou o programa da Microsoft Office Excel no desenvolvimento de um código em Visual Basic para realizar tal comunicação como apresentado a seguir:

```
Sub cmdStart_Click()  
  
    Dim n As Integer  
    Dim reply As Double  
    Dim reply2 As Double  
    Dim reply3 As Double  
    Dim reply4 As Double  
    Dim Tensao_Inicial As Double  
  
    With Pwr  
        .WriteString "*RST"  
        .WriteString "Volt " & Str$(Range("E2").Value)  
        .WriteString "Curr " & Str$(Range("E3").Value)  
  
        For n = 5 To 306  
  
            Cells(1, 1) = n  
            reply = Cells(n, 2)
```

```

        .WriteString "Curr " & Str$(Cells(n, 2))
        .WriteString "Output on"           ' Turn on the output

'If Application.Wait(Now + TimeValue("0:00:05")) Then
'End If

delay Cells(n, 10)

        .WriteString "Meas:Volt?"
        reply = .ReadNumber
        Cells(n, 1) = reply

With DMM1
        .WriteString "Measure:Voltage:DC?"
        reply2 = .ReadNumber
End With

With DMM2
        .WriteString "Measure:Voltage:DC?"
        reply3 = .ReadNumber
End With

With DMM3
        .WriteString "Measure:Voltage:DC?"
        reply4 = .ReadNumber
End With

Cells(n, 4) = reply2
Cells(n, 5) = (Cells(n, 4) - Cells(5, 4)) / 52.391
Cells(n, 6) = reply3 * 100
Cells(n, 7) = reply4
Tensao_Inicial = (Cells(5, 7) - Cells(n, 7)) / 401
Cells(n, 8) = (2*Tensao_Inicial*(350+2*0.3)/(3.3*2.11*350))* 1000000

Next n

```

End With

End Sub

Private Sub cmdSetI01_Click()

SetI01 Cells(1, 5)

End Sub

Private Sub cmdSetI02_Click()

SetI02 Cells(1, 8)

End Sub

Private Sub cmdSetI03_Click()

SetI03 Cells(2, 8)

End Sub

Private Sub cmdSetI04_Click()

SetI04 Cells(3, 8)

End Sub

Apêndice D

Código do Controle de Deformação

A placa microprocessada foi utilizada para a implementação da medição e controle de deformação na barra flexível, na qual utilizou o programa da KEIL no desenvolvimento de um código em linguagem C para tal implementação como apresentado a seguir:

```
// UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
// DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA - DEE
// ALUNO: WALBER MEDEIROS LIMA

#include "ADuC842.H" /* Inclui o Cabeçalho do ADuC832 */
#include <STDIO.H> /* Inclui o Cabeçalho I/O */
#include <MATH.H>

/*-----
                Prototipos de Funções
-----*/

void config_serial (void); /* Configuração da porta serial */
void config_adc (void); /* Configuração do conversor A/D */
void config_dac (void); /* Configuração do DAC */
void config_pwm (void); /* Configuração do PWM */
void config_interp (void); /* Configuração da interrupção */
void configura_timer1 (void); /* Configuração do tempo */
```

```

float leitura_ad (unsigned char canal); // Leitura do conversor A/D

/*-----
          Variáveis Auxiliáres
-----*/

unsigned char canal_ad = 0;
int transval_1,transval_6;

idata int transval_3,transval_4, a = 1;

idata float corrente, temperatura;

idata float Tensao_ponte, Tensao_inicial_ponte;

//float Kp = 1.25;          /* Ganho proporcional */
//float Ti = 3.0403;       /* Tempo integrativo */
//float To = 0.1566; /* Tempo de amostragem do processo */

//NiTiCu
//float Kp = 0.4;          /* Ganho proporcional */
//float Ti = 2.8;         /* Tempo integrativo */
//float To = 0.064; /* Tempo de amostragem do processo */

//float Kp = 0.8;          /* Ganho proporcional */
//float Ti = 5.8;         /* Tempo integrativo */
//float To = 0.064; /* Tempo de amostragem do processo */

float Kp = 0.8;          /* Ganho proporcional */
float Ti = 5.8;         /* Tempo integrativo */
float To = 0.064; /* Tempo de amostragem do processo */

float Q0, Q1;
float reft = 0; // Valor de referência na entrada para o sistema de controle r(t)
float reft_1 = 0;

```

```

float ut = 0; /* Sinal de saída do controlador */
float ut_1 = 0; /* Sinal de saída do controlador com 1 amostra de atraso */
int pt = 0; /* Potência fornecida */
float yt = 0; /* Saída do sistema em controle -> y(t) */
float et = 0; /* Sinal de erro do sistema -> et = r(t) - y(t) */
float et_1 = 0; /* Sinal de erro com 1 amostra de atraso */

/*-----
                Função Principal
-----*/

void main (void) {

config_serial ();
config_adc();
config_dac ();      /* Configuração do DAC */
config_pwm ();
config_interp();
configura_timer1();

while (1)
{

} // Fim do While

} // Fim do main

/*-----
                Funções Auxiliares de interrupção
-----*/

void Timer1_ISR (void) interrupt 3{

TR1 = 0; /* Para o Timer 1 */

```

```

/* Carregando novamente o Timer 1 para a contagem de 31.2495 ms */
TH1 = 0x00;
TL1 = 0x00;

TR1 = 1; /* Dispara o Timer 1 */

// Faz a leitura do canal 0 (Tensão de saída da ponte)
canal_ad = 1;
Tensao_ponte = leitura_ad(canal_ad)*0.0006103515625;

if (a == 1){
Tensao_inicial_ponte = Tensao_ponte; // Tensão inicial da Ponte
a = 2;
}

// Tensão de saída da ponte
Tensao_ponte = (Tensao_inicial_ponte - Tensao_ponte)/401;

// Converte o valor de tensão da ponte em deformação
yt = (2*Tensao_ponte*(350+2*0.3)/(3.3*2.11*350)*1000000);

transval_1 = yt+100;
TI=1;
printf("W%3.3d",transval_1);
TI=0;

canal_ad = 6;
reft = ((leitura_ad(canal_ad)*0.0006103515625)*250)+150; // x1000

transval_6 = reft;
TI=1;
printf("%3.3d",transval_6);
TI=0;

```

```

canal_ad = 3;
corrente = (leitura_ad(canal_ad)*0.6103515625)/(5*0.22); // x1000

transval_3 = corrente;
TI=1;
printf("%4.4d\n",transval_3);
TI=0;

/*canal_ad = 4;
temperatura = (leitura_ad(canal_ad)*0.06103515625); // x1000

transval_4 = temperatura;
TI=1;
printf("%3.3d\n",transval_4);
TI=0; */

et = reft - yt;
//et = yt - reft;

Q1 = -Kp*(1 - (To/Ti));
Q0 = Kp;

ut = ut_1 + Q0*et + Q1*(et_1); // Expressão do controlador PI

if (ut >= 100){
PWM1H = 2047>>8;
PWM1L = 2047;
PWM0H = 2047>>8;
PWM0L = 2047;
//ut = ut/3;
ut = 100;
}
else if (ut <= 0){
PWM1H = 2047>>8;
PWM1L = 2047;

```

```

PWM0H = 0000>>8;
PWM0L = 0000;
ut = 0;
}
else{
pt = ((2047*ut)/100)+050;
PWM1H = 2047>>8;
PWM1L = 2047;
PWM0H = pt>>8;
PWM0L = pt;
}

// Deslocamento das variáveis para o próximo passo

ut_1 = ut;
et_1 = et;
reft_1 = reft;

return;
}

/*-----
                Funções Auxiliares
-----*/

void config_serial (void){
PLLCON = 0x83;
T3CON = 0x81;
T3FD = 0x09;
SCON = 0x50;} //57600

void config_adc (void){
ADCCON1 = 0x80;
}

```

```

void config_dac (void){
/* Configuração do Conversor D/A */
DACCON = 0x7F; /* 0x0111.1011 */
}

void config_pwm (void){
/* Configura o PWM no modo 0 */
PWMCON = 0x00;
P2_6 = 0;
P2_7 = 0;
PWMCON = 0x97;}

void configura_timer1 (void){
TMOD = (TMOD & 0x0F) | 0x10; // Ajusta o Timer 1 para 16-bit
TH1 = 0x00;
TL1 = 0x00;
}

void config_interp (void){
EA = 1; /* Habilita todas as interrupções */
ET1 = 1; /* Habilita a interrupção do Timer 0 */
TR1 = 1; /* Dispara o Timer 1 */
}

float leitura_ad (unsigned char canal){
unsigned int bufferad[16];
unsigned int temp = 0;
unsigned char i;
unsigned int valor_ad;

for (i=0;i<10;i++){
    ADCCON2 =((ADCCON2 & 0xF0) | canal); // Seleciona o canal
    SCONV = 1; // Dispara a conversão
    while (ADCCON3 && 0x80); // Espera a conversão Terminar
    bufferad[i] = ADCDATAL | ((ADCDATAH & 0x0F) << 8); // Valor do canal do ADC
}
}

```

```
temp = temp + bufferad[i];  
}
```

```
valor_ad = (temp/10);  
return valor_ad;  
}
```

Referências Bibliográficas

AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas - Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. [S.l.]: UFMG, 2004. ISBN 85-7041-400-5.

ALBERTA, U. of. *SMA/MEMS Research website*. Disponível em: <<http://www.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/>>, 2005.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. de. *Extensometria Básica*. Ilha Solteira - SP, Brasil, 2004. Acesso em 13 março 2007. Disponível em: <<http://www.nepae.feis.unesp.br/Apostilas/Extensometria20basica.pdf>>.

ARAÚJO, C. J. de et al. Sobre a possibilidade de controlar atuadores à memória de forma via medidas de variação de resistência elétrica: uma análise experimental. *V Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica*, Mérida - Venezuela, 2003.

AURICCHIO, F. *Shape Memory alloy: Applications, Macromodeling and Numerical Simulations*. 1–4 p. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) — University of California at Berkeley, California, USA, 1995.

ECXELSENSOR. *Alta Tecnologia em Sensores de Deformação, Força e Correlatos*. Itatuba - SP, Brasil, 2007. Acesso em 13 março 2007. Disponível em: <<http://www.excelsensor.com.br>>.

FERNANDES, C.; ARIEIRA, S. *Ligas com memória de forma*. Disponível em: <<http://www.engmateriais.eng.uminho.pt/paginas/InfAlunos/disciplinas/matmet/LMF.final.ppt>>, 2005.

GIURGIUTIU, V. Active-materials induced-strain actuation for aeroelastic vibration control. *The Shock and Vibration Digest*, v. 32, n. 5, p. 355–368, 2000.

GORBET, R. R. R. A novel differential shape memory alloy actuator for position control. *Cambridge University Press*, v. 13, p. 423–430, 1995.

- INSTRUMENTS, N. *Measuring Strain with Strain Gauges*. [S.l.], 2003. Acesso em 13 março 2007. Disponível em: <<http://www.fe.untz.ba/predmeti/emj/pdfs/AN078.pdf>>.
- JÚNIOR, E. B. *O Extensômetro de Resistência Elétrica - Manual Prático*. Ilha Solteira - SP, Brasil: Autoria Independente, 2003.
- JONNALAGADDA, K. D. *Local Displacements and Load Transfer of Shape Memory Alloys in Polymeric Matrices*. Tese (Tese de Doutorado em Teoria e Aplicações Mecânicas) — Graduate College of the University of Illinois, Urbana, Illinois, 1997.
- KELLY, B. L. *Beam Shape Control Using Shape Memory Alloys*. 1–16 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Austronáutica) — Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, dec 1998.
- KHIDIR, E. A. et al. *A new concept of a linear smart actuator*. *ELSEVIER - Sensors and Actuators*, p. 244–249, 2007.
- KUPHALDT, T. *Kelvin (4-wire) Resistance Measurement*. 2003. All About Circuits. Acesso em 23 julho 2007. Disponível em: <http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_8/9.html>.
- LAURENTS, K. J. D.; MAVROIDIS, C. Mechanical design of a shape memory alloy actuated prosthetic hand. *Technology and Health Care*, p. 91–106, 2002.
- LEUCKERT, C. *Sistema Portátil de Aquisição de Dados para Análise Dinâmica de Estruturas Mecânicas*. 7–25 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — (UFRGS, Porto Alegre - RS, Brasil, Abril de 2000. Acesso em 13 março 2007. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ppgee/tese-eng-0307559.pdf.gz>>.
- LIMA, W. M. et al. Measurement and control of the deformation in a flexible beam using shape memory alloy. *COBEM 2007 - 19th International Congress of Mechanical Engineering*, Brasília - DF, Brasil, p. 1–8, nov 2007.
- MAGALHÃES, E. P. *Comportamento Experimental de uma Cortina de Estaca Prancha Assente em Solo Poroso do DF*. 72–89 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília - DF, Brasil, Maio de 2003. Acesso em 13 março 2007. Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/teses/GDM10503.pdf>>.
- MOALLEM, M.; LU, J. Application of shape memory alloy actuators for flexure control: Theory and experiments. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, v. 10, n. 5, p. 495–501, 2005.

- MOREIRA, F. J. de O. *Um Controlador H_∞ de Banda Limitada para o Controle Ativo de Vibração Estrutural*. Tese (Tese de Doutorado em Mecânica dos Sólidos e Projetos Mecânicos) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1998.
- NASCIMENTO, M. M. S. F. *Contribuição ao Estudo da Histerese em Ligas com Memória de Forma*. 1–17 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, Dezembro de 2002.
- PAIVA, A. *Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma*. 18–38 p. Dissertação (Tese de doutorado em Engenharia Mecânica) — PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, Abr 2004.
- PAIVA, A.; SAVI, M. A.; PACHECO, P. M. C. L. Modelos constitutivos para ligas com memória de forma. *2º Congresso Temático de Aplicações de Dinâmica e Controle (DINCOM)*, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, ago 2003.
- ROMANO, R.; TANNURI, E. A. Modelagem e validação experimental de um atuador baseado em liga de memória de forma. *Controle & Automação*, v. 19, n. 1, p. 30–42, 2008.
- SILVA, E. P. da; MESQUITA, A. L. A. Controle de vibração de vigas flexíveis usando atuadores de ligas com memória de forma. 2005.
- SONG, G.; MA, N. Control of shape memory alloy actuators using pulse-width pulse-frequency (pwpf) modulation. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003.
- SONG, G.; MA, N. Robust control of a shape memory alloy wire actuated flap. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*, v. 16, p. 51–57, 2007.
- SOUZA, C. P. de; FILHO, J. T. C. *Controle por computador: Desenvolvendo Sistema de Aquisição de Dados para PC*. [S.l.]: EDUFMA, 2001. ISBN 85-85048-31-X.
- TEIXEIRA, R. L. *Uma Metodologia de Projetos de Controladores Híbridos Inteligentes com Aplicações no Controle Ativo de Vibrações Mecânicas*. 1 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, Brasil, Maio de 2001.
- VALENZUELA, W. A. V. *Sistema de Articulação Inteligente por Meio da Liga com Memória de Forma*. 16–24 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, Agosto de 2005.