

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

**CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA
MULTIFUNCIONAL PARA TESTES ELETRO-TERMO-
MECÂNICOS DE MATERIAIS COM MEMÓRIA DE FORMA**

MANUEL PEREIRA DO NASCIMENTO NETO

CAMPINA GRANDE
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

**CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA
MULTIFUNCIONAL PARA TESTES ELETRO-TERMO-
MECÂNICOS DE MATERIAIS COM MEMÓRIA DE FORMA**

MANUEL PEREIRA DO NASCIMENTO NETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.
(Campo de pesquisa: Materiais Avançados)

CAMPINA GRANDE
2007



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFSCG

N244c Nascimento Neto, Manuel Pereira do
2007 Concepção e desenvolvimento de uma máquina multifuncional para testes eletro-termo-mecânicos de materiais com memória de forma/ Manuel Pereira do Nascimento Neto.- Campina Grande, 2007.
65f.: il.

Referências.

Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientadores: Prof. Dr. Carlos José de Araújo.

1— Transformações de Fases 2— Materiais com Memória de Forma 3 —
Caracterização Eletro-termo-mecânica de Ligas com Memória de Forma — Título

CDU 620.181

**CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE
UMA MÁQUINA MULTIFUNCIONAL PARA
TESTES ELETRO-TERMO-MECÂNICOS DE
MATERIAIS COM MEMÓRIA FORMA**

Manuel Pereira do Nascimento Neto

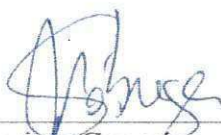
Dissertação defendida em 23/02/2007 e aprovada pela banca
examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Carlos José de Araújo
Orientador
UAEM – UFCG



Prof. Dr. Walman Benício de Castro
Examinador Interno
UAEM – UFCG



Prof. Dr. Severino Cesarino da Nóbrega Neto
Examinador Externo
CEFET – PB

Campina Grande – PB
Fevereiro de 2007

DEDICATÓRIA

Além de minha adorável esposa, Carla, duas outras pessoas me vêm à mente como merecedoras de um agradecimento especial: André Luis e Danilo Kelson, nossos filhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar;

A minha família;

Ao Prof. Carlos José de Araújo, pela orientação;

Aos alunos de iniciação científica: Antonio Aristófanes da Cruz Gomes, Jobson Alberto da Silva, Luiz Fernando Alves Rodrigues e Rômulo Pierre Batista dos Reis, pelo auxílio nas atividades experimentais;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica por disponibilizar o acesso aos laboratórios e a oficina mecânica.

Ao CNPq pelo financiamento dos diversos projetos desenvolvidos no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UFCG.

MENSAGEM

É Possível esquecer-se daqueles com quem rimos, mas nunca
esqueceremos aqueles com quem choramos.

A natureza é um constante vai-e-vem: ondas do mar, ventos e nuvens,
bichos, flores, pessoas.

A chegada não é o começo, a partida não é o final.

Assim somos nós: um dia viemos; um dia, iremos.

Podemos ir para o trabalho, escola, outro bairro, viajar.

Podemos ir para voltar e ir para ficar. Mesmo que não se saiba onde nem
quando ir, há sempre um tempo de partir.

Na vida, tudo passa.

Ficam as marcas e a saudade que o tempo certamente levará, trazendo
novos dias, nova vida num incessante vai-e-vem, que jamais irá parar.

E entre vindas e idas, é preciso entender a dor, não como uma razão para
duvidar de Deus,

mas como um difícil caminho para encontrá-lo.

Legrand

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A – Austenita;
- A_f - Temperatura de término da transformação martensita - austenita;
- A_s - Temperatura de início da transformação martensita - austenita;
- DSC - Calorimetria diferencial de varredura;
- ε - Deformação
- ε_{tran} - Deformação de transformação
- EMF - Efeito Memória de Forma;
- EMFR - Efeito memória de forma reversível;
- EMFS - Efeito memória de forma simples ou de único sentido;
- F – Força gerada
- G_a - Energia química livre da fase austenítica ;
- G_m - Energia química livre da fase martensita;
- H_t - Histerese da transformação;
- HV - Dureza Vicker;
- I - Corrente elétrica em A;
- I_2 - Corrente convencional de atuação, para disjuntores, ou corrente convencional de fusão, para fusíveis;
- I_B - Corrente de projeto;
- I_n - Corrente nominal do dispositivo de seccionamento;
- I_Z - Capacidade de condução de corrente dos condutores;
- LaMMEA- Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas;
- LMF - Ligas com Memórias de Forma;
- M – Martensita;
- M_f - Temperatura de término da transformação austenita – martensita;
- M_s - Temperatura de início da transformação austenita - martensita;
- R - Resistência elétrica;
- PE – Pseudoelasticidade;
- T - Temperatura na lâmina;
- t - tempo;
- TMA – Dilatometria, análise termomecânica;

TMT – Transformação martensítica termoelástica;

T_o – Temperatura de Equilíbrio;

V - Diferença de potencial;

y - Flecha devido a deformação da lâmina;

$\Delta G^{A \rightarrow M}$ - Variação da energia livre de Gibbs da fase austenítica para martensítica

% wt - Percentual em peso;

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1	Principais componentes da máquina de ensaios	27
------------	--	----

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Visão microscópica do EMF	5
FIGURA 3.2	Visão macroscópica esquemática do EMF	6
FIGURA 3.3	Micrografia ótica mostrando uma microestrutura martensítica típica	7
FIGURA 3.4	Curva típica de transformação de uma LMF.....	8
FIGURA 3.5	Esquemática da formação de uma plaqueta de martensita dentro do cristal da fase matriz austenita.	9
FIGURA 3.6	Plaquetas de martensitas em grupos de auto-acomodação em “V” na liga Cu-Al-Ni-0,6Mn (composição em peso).....	10
FIGURA 3.7	Esquemática do equilíbrio entre as fases austenita e martensita.	11
FIGURA 3.8	Ilustração esquemática da mudança de forma por EMFR	13
FIGURA 3.9	Comportamento termomecânico das LMF	14
FIGURA 3.10	Aplicação na odontologia do efeito superelástico	17
FIGURA 3.11	Luva de LMF para conexão de tubos. Fonte	18
FIGURA 3.12	Aplicação de um atuador térmico do tipo mola com memória de forma	19
FIGURA 3.13	Exemplos de elementos ativos em ligas de cobre com EMF reagindo à passagem de corrente elétrica ($i > 0$)	19
FIGURA 3.14	Óculos com características superelásticas	22
FIGURA 4.1	Projeto conceitual da estrutura mecânica rígida da máquina de testes em Auto-CAD	24
FIGURA 4.2	Projeto conceitual de acessórios e componentes da máquina de testes em Auto-CAD	25
FIGURA 4.3	Máquina de testes com acessórios e componentes.....	26
FIGURA 4.4	Ilustração do funcionamento da máquina no modo tração	28
FIGURA 4.5	Ilustração do funcionamento da máquina no modo flexão	29
FIGURA 4.6	Reservatório de 13 litros onde fica o fluido que receberá a amostra a ser testada	30
FIGURA 4.7	Sistema de aquisição de dados com módulo multiplexador de 20 canais.	31

FIGURA 4.8	Sensores de deslocamento LVDT.....	32
FIGURA 4.9	Sensores de deslocamento LVDT montados para levantamento de curvas	33
FIGURA 4.10	Curva característica do LVDT tipo DG/5.0	34
FIGURA 4.11	Curva característica do LVDT tipo DF/5.0	34
FIGURA 4.12	Montagem da Célula de Carga A250	36
FIGURA 4.13	Curva característica da Célula de Carga A250	36
FIGURA 4.14	Máquina de fusão a plasma	37
FIGURA 4.15	Processo de fusão a plasma	38
FIGURA 4.16	Cortadeira metalográfica para a obtenção de lâminas LMF	39
FIGURA 4.17	Analizador de imagens	40
FIGURA 4.18	Microdurômetro da marca Future – Tech, modelo FM – 700	40
FIGURA 4.19	Impressão deixada durante o ensaio de microdureza Vickers	41
FIGURA 4.20	Ilustração esquemática do SMRT	42
FIGURA 4.21	Plataforma experimental de medição da resistência elétrica em função da temperatura em amostras de LMF	43
FIGURA 4.22	Método dos quatro fios	43
FIGURA 5.1	Microestrutura da liga Ni-Ti-Cu	44
FIGURA 5.2	Variação da Resistência em função da temperatura para a liga Ni-Ti-Cu	45
FIGURA 5.3	Microestrutura da liga Cu-Al-Ni	46
FIGURA 5.4	Variação da Resistência em função da temperatura para a liga Cu-Al-Ni	46
FIGURA 5.5	Tela do computador durante o ensaio de tração	47
FIGURA 5.6	Evolução da temperatura e da deformação durante o ensaio de tração	48
FIGURA 5.7	Evolução da temperatura e da resistência durante o ensaio de tração	49
FIGURA 5.8	Comportamento da histerese $\epsilon - T$ obtido na operação no modo tração	50

FIGURA 5.9	Comportamento da histerese R - T obtido na operação no modo tração	51
FIGURA 5.10	Tela do computador durante o ensaio de flexão	52
FIGURA 5.11	Ilustração da amostra de lâmina deformada para ensaio de geração de força no modo flexão	53
FIGURA 5.12	Evolução da temperatura e da força gerada durante o ensaio no modo flexão	54
FIGURA 5.13	Evolução da temperatura e da resistência elétrica durante o ensaio no modo flexão	55
FIGURA 5.14	Comportamento histerético F - T obtido na operação no modo flexão	56
FIGURA 5.15	Comportamento histerético R - T obtido na operação no modo flexão	57
FIGURA 5.16	Comportamento da flecha imposta a amostra durante o ensaio no modo flexão.....	58

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Integral de Joule necessária para aquecer o condutor desde a temperatura máxima para serviço contínuo até a temperatura limite de curto-circuito.....	20
-----------	---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivo Específico	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Breve Histórico Sobre as LMF	4
3.2 Efeito Memória de Forma . (EMF)	4
3.3 Transformação Martensítica	6
3.3.1 Características Gerais das Transformações Martensíticas	8
3.3.2 – Transformação Martensítica Termoelástica	10
3.4 Outros Comportamentos Termomecânicos das LMF	12
3.4.1 Efeito Memória de Forma Reversível (EMFR)	12
3.4.2 Efeito Superelástico	13
3.5 Degradação do Efeito de Memória de Forma	14
3.6 Ligas Comerciais com EMF	15
3.7 Aplicação das LMF	16
3.7.1 Aplicação em Aparelhos Ortodônticos	17
3.7.2 Aplicação em Conectores	17
3.7.3 Aplicação em Atuadores Térmicos	18
3.7.4 Aplicação no Setor Elétrico	19
3.7.5 Armações para Óculos	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23

4.1	Concepção e Montagem da Máquina de Testes	23
4.1.1	Banho Termoregulável	29
4.1.2	Sistema de Aquisição de Dados	30
4.1.3	Sensor de Deslocamento LVDT	31
4.1.3.1	Montagem e Caracterização	32
4.1.4	Célula de Carga	35
4.1.3.1	Montagem e Caracterização	35
4.2	Validação da Máquina	37
4.2.1	Obtenção da Amostra de Testes	37
4.2.2	Caracterização Prévia das Amostra	39
4.2.2.1	Microscopia Ótica	39
4.2.2.2	Microdureza	40
4.2.2.3	Resistência Elétrica em Função da Temperatura	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Características das Amostras de Testes	44
5.2	Validação da máquina multifuncional	47
5.2.1	Máquina Operando no Modo Tração Sob Carga Constante	47
5.2.2	Máquina operando no modo de geração de força em modo de flexão 3 pontos a deflexão constante.	52
6	CONCLUSÕES	59
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
8	REFERÊNCIAS	62

RESUMO

Neste trabalho foi realizada a concepção, montagem e testes de uma máquina multifuncional para caracterização eletro-termomecânica de ligas com memória de forma. A máquina desenvolvida consiste da união de uma prensa hidráulica com um banho termoregulável, uma fonte de corrente, sensores de temperatura, deslocamento e força, um sistema de aquisição de dados, além das adaptações mecânicas para aplicação de carregamento mecânico nas amostras. Foram testados dois modos de operação: A – ciclagem térmica com a amostra submetida à tração uniaxial constante (peso) e B – ciclagem térmica com a amostra submetida a uma flecha central constante em flexão três pontos. Em ambos os modos de operação, medidas de resistência elétrica foram realizadas concomitantemente com aquelas de temperatura, deslocamento e força. Para validar a máquina operando no modo A foi utilizada uma amostra industrial da LMF Cu-14,0Al-4,0Ni (% em peso), enquanto para o modo B empregou-se uma amostra da LMF Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso) obtida em laboratório pela técnica Plasma Skull Push Pull (PSPP). Os testes de validação demonstraram o bom funcionamento do equipamento proposto para determinar as principais propriedades destes materiais funcionais, como as temperaturas de transformação, histerese em temperatura, efeito memória de forma sob carga constante e geração de força sob deformação imposta.

ABSTRACT

In this work it was accomplished the conception, assembly and tests of a multifunctional machine for eletro-thermomechanical characterization of shape memory alloys (SMA). The developed machine consists of the union of a hydraulic press with a thermal bath, a current source, and sensors of temperature, displacement and force, a data acquisition system, besides the mechanical adaptations for application of mechanical loading in the samples. Two operation manners were tested: A - thermal cycling with the sample submitted to constant uniaxial tensile load (dead weigh) and B - thermal cycling with the sample submitted to a constant central deflection in three points bending. In both operation manners, measures of electrical resistance were accomplished simultaneously with those of temperature, displacement and force. To validate the machine operating in the way A it was used an industrial sample of the Cu-14,0Al-4,0Ni (% weight) SMA, while for the way B a sample of the Ni-44,7Ti-5,9Cu (% in weight) SMA was used. This Ni-Ti-Cu SMA was obtained at laboratory by the Plasma Skull Push Pull (PSPP) technique. The validation tests demonstrated the good operation of the proposed equipment to determine the main properties of these functional materials, as the transformation temperatures, temperature hysteresis, shape memory effect under constant load and force generation under imposed deformation.

1 INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) representam uma nova classe de materiais capazes de produzir um deslocamento considerável sob carga quando submetidas a uma variação de temperatura. Os efeitos de memória de forma (EMF) e pseudoelasticidade (PE) são fenômenos termoelásticos, associados à transformação de fase martensítica reversível presentes nas LMF. Outro fenômeno característico dessas ligas é o efeito memória reversível conseguido após submetê-las a um processo de treinamento (ZHANG, 1997), permitindo associar uma determinada forma a cada fase do material.

Estas ligas vêm motivando diversas aplicações em diferentes áreas do conhecimento, dentre as quais vale destacar a indústria aeroespacial, automotiva e biomédica (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Nas aplicações envolvendo carregamento estático ou dinâmico, as LMF podem ser utilizadas como sensores ou atuadores, sendo atualmente muito empregadas como fibras embebidas para originar compósitos ativos (ROGERS, 1990). Na indústria aeroespacial as LMF são utilizadas em diversas situações e, recentemente, desenvolveu-se um projeto para abertura de painéis solares de satélites, substituindo dispositivos de abertura por ação pirotécnica (PACHECO & SAVI, 2000). Muitas aplicações têm sido estudadas na engenharia biomédica. Na ortodontia, por exemplo, o emprego de fios ortodônticos com memória de forma trouxe resultados muito satisfatórios, difundindo bastante o uso destas ligas (AIROLDI, 1997).

A recuperação da deformação associada a um dado carregamento mecânico, nestes materiais, está diretamente relacionada a uma transformação de fase do tipo martensítica reversível ocorrendo no interior do material durante aquecimento e resfriamento (FUNAKUBO, 1987). Esta variação macroscópica da forma em função da temperatura é acompanhada da variação simultânea de uma série de propriedades físicas e mecânicas associadas à transformação de fase no material (HARRISON, 1990), dentre elas a resistividade elétrica, o calor específico, módulo de elasticidade, deformação, entre outras.

Considerando que as LMF são materiais especiais (muitas vezes chamados de ativos ou inteligentes), capazes de produzir deslocamento e/ou esforço mecânico em função da temperatura ou corrente elétrica, praticamente não existem

opções de equipamentos comerciais especialmente destinados a sua caracterização eletro-termo-mecânica. Vale ressaltar também que não existe uma normalização para a caracterização eletro-termo-mecânica destes materiais. Assim sendo, quando se deseja realizar essa caracterização em amostras de fios e lâminas, torna-se necessário conceber, montar e testar uma plataforma experimental específica.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo geral a concepção e desenvolvimento de uma máquina multifuncional para a realização de testes eletro-termo-mecânicos que permitam a caracterização de ligas com memória de forma.

2.2 Objetivos Específicos

- Conceber o projeto de uma máquina multifuncional a partir da estrutura mecânica rígida de uma prensa de bancada de 15 toneladas;
- Construir o equipamento concebido para uso contínuo em laboratório;
- Levantar curvas características do comportamento de deformação versus temperatura (ou corrente elétrica) em amostras de lâminas com memória de forma submetidas a carregamento trativo uniaxial constante (aplicado através de pesos);
- Levantar curvas características do comportamento de força gerada versus temperatura (ou corrente elétrica) em amostras de lâminas com memória de forma sujeitas à flexão 3 pontos, submetidas a deformação constante;
- Determinar as propriedades intrínsecas ao fenômeno de memória de forma a partir das curvas de deformação versus temperatura ou força gerada versus temperatura (deformação recuperável por efeito memória, temperaturas de transformação em função da carga aplicada, histereses em temperatura em função da carga aplicada, etc).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Breve Histórico Sobre as LMF

Os primeiros passos no sentido da descoberta dos efeitos de memória de forma foram dados por A. ÖLANDER em 1932. Este autor constatou a reversibilidade da transformação numa liga Au-Cd por observação metalográfica e através do registro da variação da resistividade. GRENINGER & MOORADIAN (1938) observaram, numa liga de Cu-Zn, a formação e o desaparecimento de martensita, com a redução e o aumento da temperatura, respectivamente. O EMF propriamente dito foi posto em evidência por KURDJUMOV & KHANDROS (1949) e, depois, também por CHANG E READ (1951) numa barra de AuCd. Contudo, só em 1962, quando BUEHLER e colaboradores descobriram o EMF numa liga equiatômica de Ni-Ti, é que a investigação, tanto dos aspectos metalúrgicos, como relativamente às potenciais aplicações práticas, começou a despertar interesse. No espaço de 10 anos surgiram então no mercado uma grande variedade de produtos comerciais e o estudo dos fenômenos de memória de forma foi intensificado. Neste momento assiste-se a uma intensificação deste tipo de estudo ao mesmo tempo em que novos produtos entram no mercado todos os anos.

À medida que esses fenômenos foram sendo mais bem compreendidos, uma grande diversidade de outras ligas, tais como Ag-Cd, Au-Cd, Cu-Al-Ni, Cu-Sn, Cu-Zn, Fe-Pt, Fe-Mn-Si, Ni-Ti-X (X=Cu, Fe, ...) dentre outras, manifestando este tipo de comportamento foi sendo investigada.

3.2 Efeito Memória de Forma (EMF)

Conforme mencionado anteriormente, o Efeito Memória de Forma (EMF) é a capacidade que possuem alguns materiais de recuperarem uma deformação plástica através de um aquecimento acima de uma temperatura crítica (OTSUKA e WAYMAN, 1998). Abaixo dessa temperatura crítica, uma LMF é extremamente maleável, sofrendo deformações plásticas aparentes na faixa de 4 a 10% quando submetidas a forças muito pequenas. Entretanto, toda a deformação é recuperada

quando o material é aquecido acima de uma temperatura crítica. O resfriamento a uma temperatura abaixo da crítica não causa nenhuma mudança macroscópica de forma e todo o ciclo pode ser repetido como é apresentado esquematicamente na Figura 3.1. As duas fases, que ocorrem nas LMF são denominadas *Martensita* e *Austenita*. A *Martensita* é a fase facilmente deformável que se apresenta em temperaturas mais baixas. *Austenita* é a fase mais rígida da LMF e se apresenta em altas temperaturas.

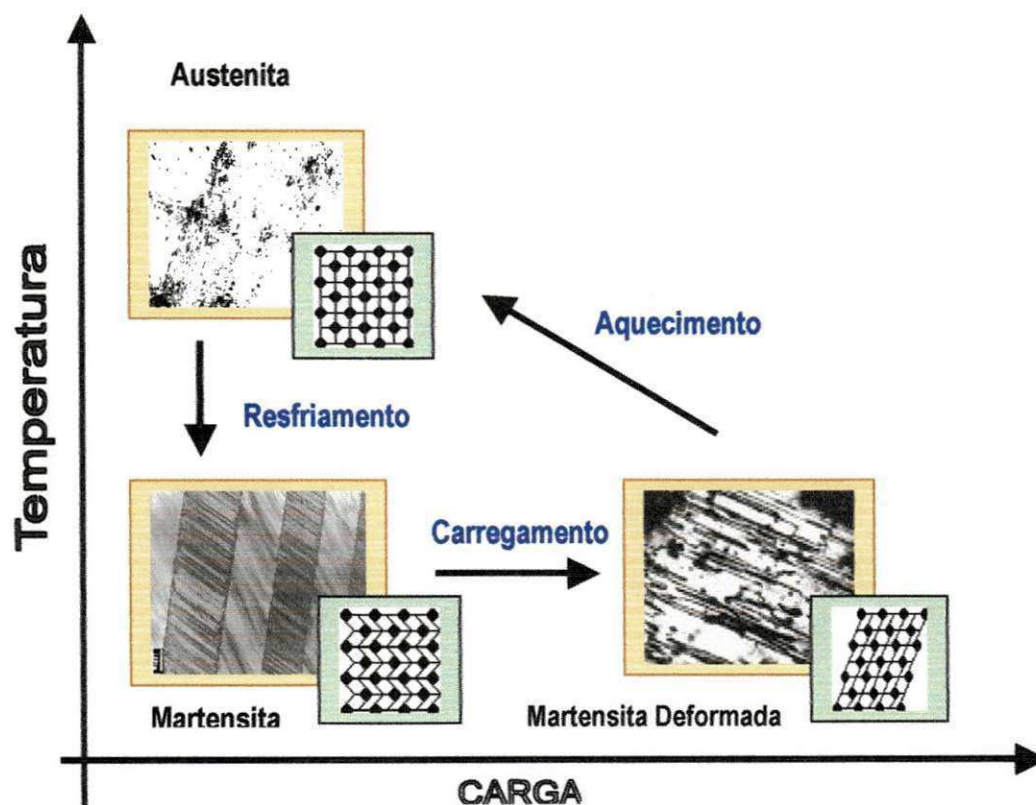


FIGURA 3.1 – Visão microscópica do EMF.

Uma esquematização do fenômeno em escala macroscópica pode ser observada na Figura 3.2

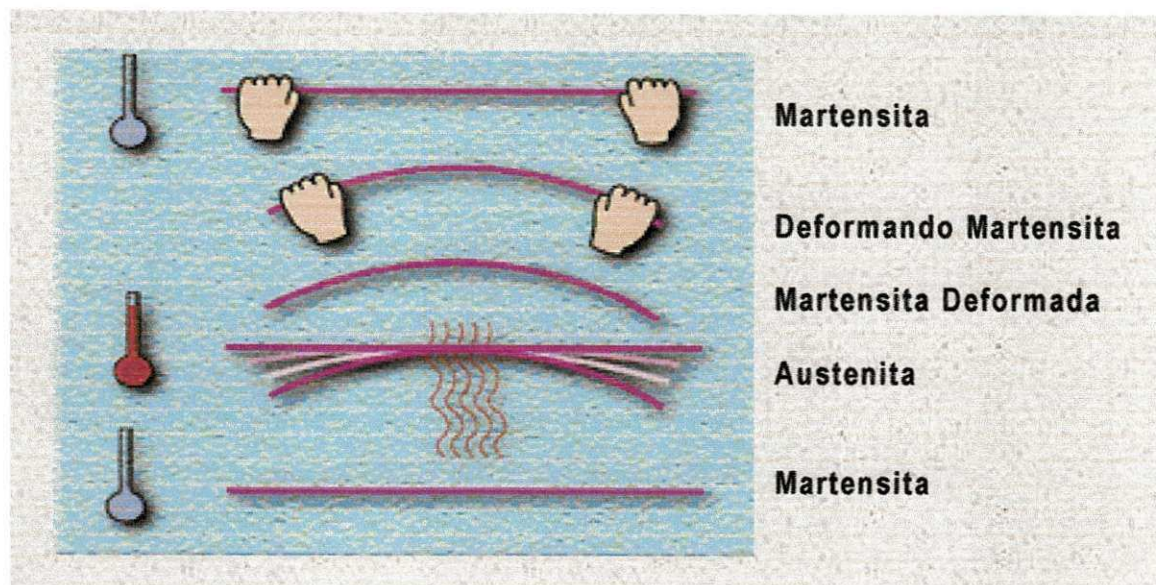


FIGURA 3.2 – Visão macroscópica do EMF.

3.3 Transformação Martensítica

Os fenômenos de memória de forma estão associados a uma transformação martensítica especial. A fase martensítica é formada por finas estruturas dispostas em forma de agulhas auto-acomodadas (AYDOGDU; AYDOGDU; ADIGUZEL, 2002) e foi inicialmente designada para dar nome a uma fase extremamente dura formada nos aços temperados com teor de carbono superior a 0,3% (CHIAVERINI, 1990).

Transformações martensíticas de fase são transformações induzidas por temperatura ou carregamento mecânico (tensão) e caracterizados pela ausência de difusão atômica. Um material susceptível a esta transformação tem uma estrutura cristalina acima de uma determinada temperatura crítica e uma outra estrutura abaixo de outra temperatura crítica de transformação. À medida que a temperatura sofre uma alteração, a mudança de uma estrutura cristalina na outra é puramente estrutural. A fase estável a alta temperatura é denominada austenita enquanto que a fase estável a baixa temperatura é chamada de martensita. Da mesma forma a transformação pode ser induzida por carregamento (martensita induzida por tensão). Com a supressão da tensão a estrutura reverte à fase matriz. Estas transformações de fase são fundamentais nos fenômenos de memória de forma.

Vale ressaltar que a martensita das LMF é formada de finas lamelas dispostas em forma de agulhas, conforme apresenta a Figura 3.3.

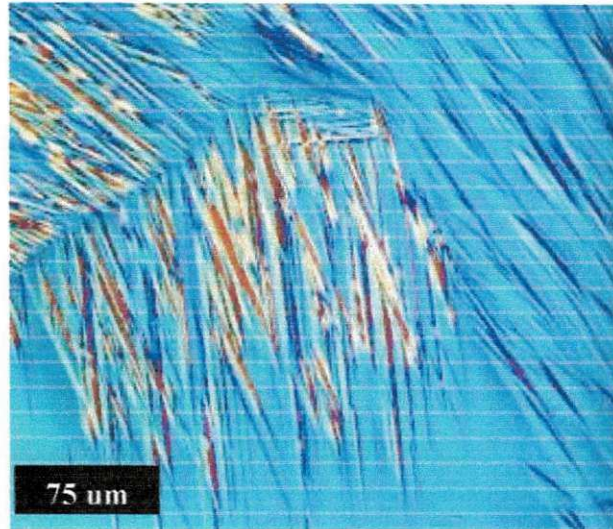


FIGURA 3.3 - Micrografia ótica mostrando uma microestrutura martensítica típica. (69Cu-26Zn-5Al, % em peso).

A maneira de caracterizar fisicamente a transformação martensítica reversível apresentada pela LMF consiste, basicamente, em determinar as temperaturas críticas de transformação de cada ciclo de resfriamento e aquecimento, conforme ilustra Figura 3.4. Pode-se observar que a transformação também apresenta uma histerese que é um deslocamento (diferença) da temperatura em que se tem o início da transformação direta ou martensítica (M_s) e o início da transformação reversa ou Austenítica (A_s). Logo, a histerese é, aproximadamente, dada por $A_s - M_s$, porém essa forma de determinação da histerese não pode ser generalizada.

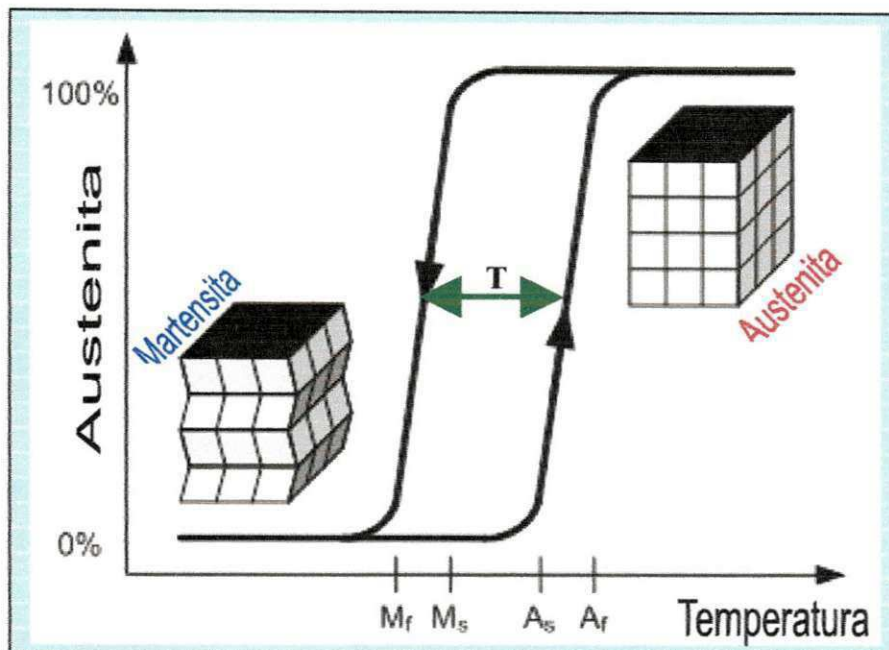


FIGURA 3.4 - Curva típica de transformação de uma LMF.

Na figura 3.4, os parâmetros mostrados são definidos como:

T → Histerese em temperatura da transformação;

M_s → Temperatura de início da transformação direta ou martensítica;

M_f → Temperatura em que se tem o final da transformação direta ou martensítica;

A_s → Temperatura de início da transformação reversa ou austenítica;

A_f → Temperatura em que se tem o final da transformação reversa ou austenítica.

3.3.1 Características Gerais das Transformações Martensíticas

A transformação martensítica termoelástica ou reversível ocorre por um mecanismo de cisalhamento entre planos gerando plaquetas de martensita. O tamanho das plaquetas é grande o bastante para serem observadas em um microscópio ou até mesmo a olho nu. Como não há energia ativa de difusão envolvida, as velocidades de transformação são muito elevadas. As interfaces matriz-produto (austenita-martensita) são deslizantes e podem mover-se sem ativação térmica e as velocidades de

transformação são frequentemente independentes da temperatura, logo a transformação é dita atérmica. A transformação reversa, de martensita em austenita, é desencadeada pelo aquecimento da martensita a temperaturas superiores a A_s . Na transformação martensítica, esquematizada na Figura 3.5, um cristal de austenita é esquematizado na Figura 3.5(a). Parte do cristal nas seções transversais $A_1B_1C_1D_1$ e $A_2B_2C_2D_2$, muda de forma por um mecanismo de cisalhamento, gerando plaquetas da fase do produto, transformando-se numa estrutura martensítica.

Um cristal de martensita parcialmente formado é mostrado na Figura 3.5(b). A transformação reversa martensita-austenita é desencadeada pelo aquecimento da martensita e é acompanhada por uma mudança de forma (ou relevo da superfície) de um valor definido.

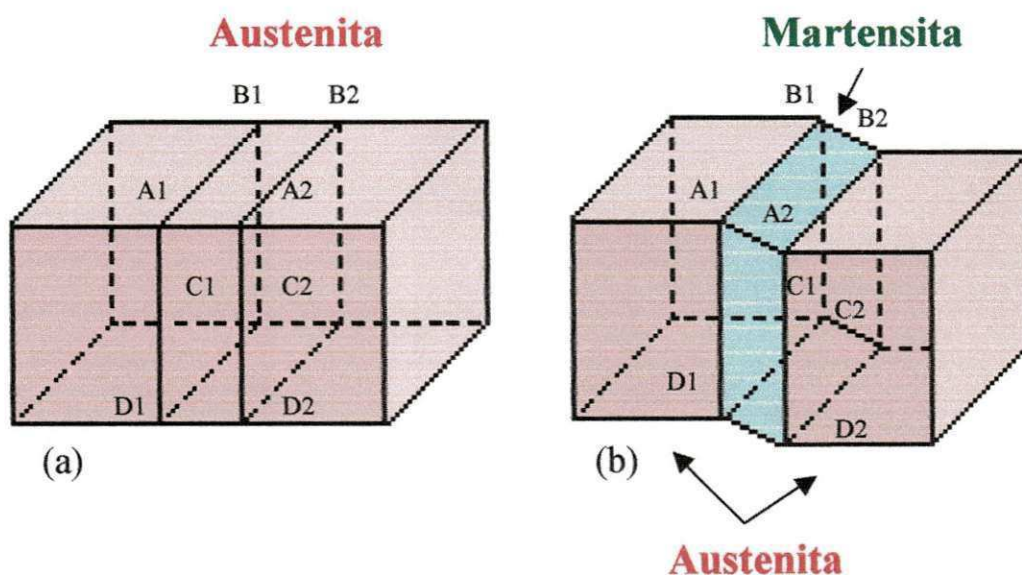


FIGURA 3.5 – Esquematização da formação de uma plaqueta de martensita dentro do cristal da fase matriz austenita.

As martensitas ocorrem tipicamente como plaquetas cisalhadas podendo ser observadas ao microscópio ótico como uma estrutura em forma de grupos de acomodação em “V” ou ziguezague conforme revela a micrografia da Figura 3.6.



FIGURA 3.6 – Plaquetas de martensitas em grupos de auto-acomodação em “V” na liga Cu-Al-Ni-0,6Mn (composição em peso).

3.3.2 Transformação Martensítica Termoelástica (TMT)

As transformações de fase martensíticas responsáveis pelos fenômenos de memória de forma são de caráter termoelástico. Durante as TMT o movimento da interface é controlado por um balanço local entre as forças químicas e não químicas (ARAUJO FILHO, 2000). A força motriz (potencial químico) é a diferença na energia livre de Gibbs das fases austenita (A) e martensita (M). As forças não químicas são as energias de deformação elástica e a dissipação da energia por atrito. Ambas as forças não químicas aparecem quando ocorrem interações entre as interfaces e os defeitos cristalinos (precipitados, discordâncias e lacunas). Alguns destes defeitos na estrutura cristalina do material podem pré-existir na fase matriz, ou podem ainda ser criados ou eliminados durante a transformação (OTSUKA & WAYMAN, 1998).

Avaliando a seqüência das diferentes contribuições de energia (dissipação irreversível de energia e armazenamento reversível de energia elástica), as curvas das transformações termoelásticas são caracterizadas por uma histerese de transformação, em temperatura ou tensão mecânica (OTSUKA & WAYMAN, 1998), conforme ilustra a figura 3.4. Então, as transformações podem ser caracterizadas por

termos térmicos e elásticos. Como consequência, a temperaturas abaixo do M_s , os cristais de martensita crescem à medida que a amostra é resfriada. Entretanto, após alcançar certo tamanho, quando a soma do crescimento na energia livre termoquímica e o aumento na energia livre não química (elástica e resistências passivas) se aproximam de certo valor mínimo, o crescimento é interrompido. O equilíbrio entre os efeitos térmicos e elásticos nos fornece o termo “termoelasticidade” e a denominação de transformação martensítica termoelástica. Uma vez que esse equilíbrio térmico é quebrado, os cristais de martensita irão crescer ou contrair-se. Por conseguinte, a estabilidade das fases apresenta uma forte dependência da temperatura. Se for tomada em consideração a energia química livre da fase matriz austenítica (G_A) e a da fase martensita (G_M), existe uma temperatura ideal de equilíbrio T_0 , de forma que as forças se equilibram conforme ilustra a Figura 3.7. A fase estável é a que possui menor energia livre. As transformações martensíticas termoelásticas são cristalograficamente reversíveis, ao contrário das transformações verificadas nos aços comerciais, nos quais um aquecimento à temperatura logo acima de M_f não reverte na formação de austenita e sim causa a decomposição da martensita em uma microestrutura que basicamente se divide em ferrita e cementita (CHIAVERINI, 1990).

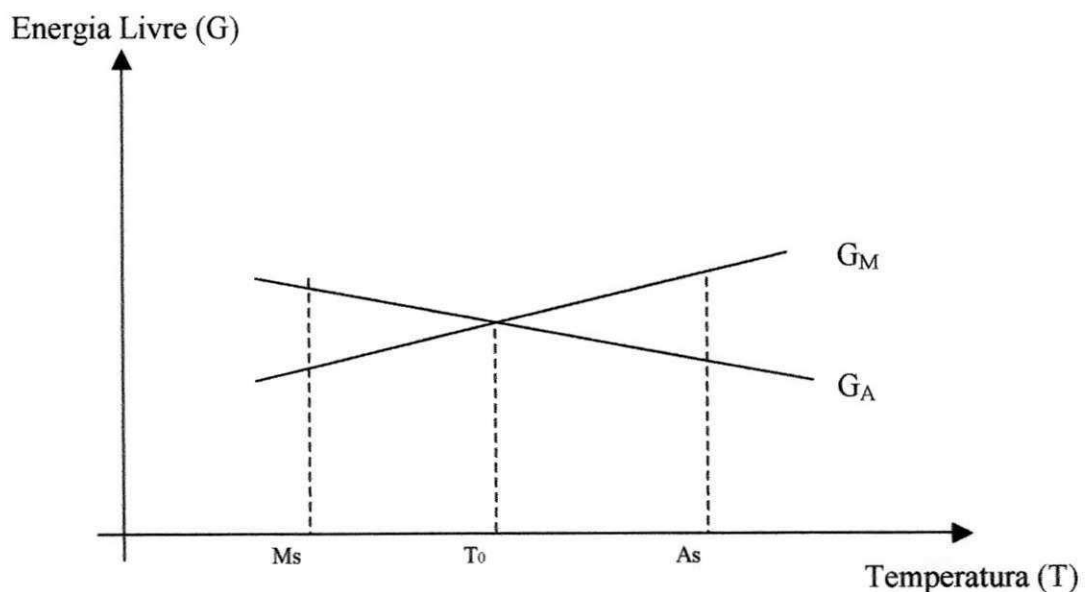


FIGURA 3.7 - Esquemática do equilíbrio entre as fases austenita e martensita.

A aplicação de uma tensão (carregamento mecânico) provoca um deslocamento da curva livre ($\Delta G^{A \rightarrow M}$) para baixo elevando a temperatura de equilíbrio entre as fases o que faz com que a temperatura M_s sob carga $(M_s)_\sigma$ seja maior. Assim a transformação martensítica pode ser induzida mesmo a temperaturas maiores que A_f , pois a fase estável (de menor energia) será a martensita, a retirada da carga provoca a transformação inversa, porque sem o carregamento o M_s diminui e a fase estável será novamente austenita. Esse comportamento termomecânico apresentado pelas LMF é conhecido como efeito superelástico.

É importante salientar que a transformação martensítica termoelástica das LMF, conforme ilustra a Figura 3.4, pode ser fisicamente detectada por várias técnicas de caracterização como a calorimetria diferencial de varredura (DSC), dilatométrica, análise termomecânica (TMA), variação de resistência elétrica em função da temperatura, dentre outras.

3.4 Outros Comportamentos Termomecânicos das LMF

3.4.1 Efeito Memória de Forma Reversível (EMFR)

O EMFR aparece devido a um processo de treinamento do material através de métodos baseados em ciclagens termomecânicas e envolve deformação pseudoplástica da martensita.

Após um ciclo completo de carga e descarga pode-se observar que o comportamento termomecânico das LMF sofre uma recuperação incompleta da deformação máxima introduzida durante o carregamento, havendo uma deformação residual no final do ciclo (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Se forem efetuados vários ciclos termomecânicos consecutivos de carga e descarga constata-se que a deformação residual acumulada vai aumentando, tendendo a estabilizar-se ao fim de certo número de ciclos.

A deformação residual não reversível está associada a alterações da estrutura interna do material (martensita residual, aumento da densidade de discordâncias, reconfiguração das discordâncias em planos de escorregamento específicos). A este estado interno do material, fora do equilíbrio termodinâmico, está

associado um campo de tensões internas específico do treinamento que foi aplicado. Este campo de tensões internas tem por efeito orientar as variantes que se formam durante o resfriamento, na ausência de tensões aplicadas, dando origem ao efeito memória de forma reversível (EMFR), ilustrado na Figura 3.8. Esse efeito corresponde a uma mudança espontânea da forma em função da temperatura e sem aplicação de carga ou deformação externa (A→B→C).

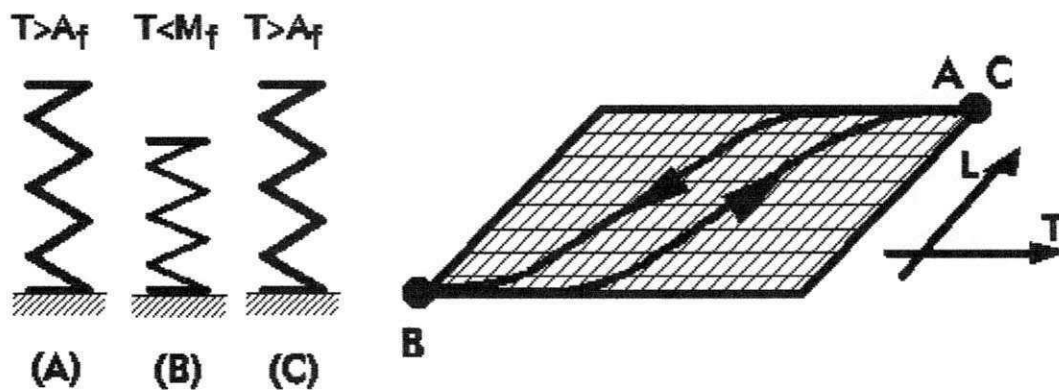


FIGURA 3.8 - Ilustração esquemática da mudança de forma por EMFR. L – comprimento; T – temperatura.

3.4.2 Efeito Superelástico

Quando uma LMF é submetida a esforço mecânico a uma temperatura superior a A_f , definida na Figura 3.4, observa-se um comportamento interessante na curva tensão-deformação. Aplicando-se um carregamento mecânico crescente ao material constata-se logo após a região elástica um aumento da deformação a um nível de tensão praticamente constante. Este comportamento está relacionado ao fato de que nessa temperatura a martensita pode ser induzida por tensão.

A Figura 3.9 apresenta o comportamento de uma LMF testada a duas temperaturas diferentes. Na temperatura T_1 ($T_1 > A_f$), verifica-se o efeito superelástico e depois de removida a carga o material volta para o estado inicial apresentando uma histerese em tensão. O mesmo material ensaiado a temperatura T_2 , com $T_2 < M_f$,

apresenta o efeito memória de forma simples (EMFS), pois no descarregamento o material apresenta uma deformação plástica aparente residual que pode ser recuperada com aquecimento acima de A_f . Na mesma Figura 3.9 está apresentado o resultado de um ensaio de DSC durante o aquecimento do material, onde ocorre a mudança de fase com absorção de energia (endotérmico).

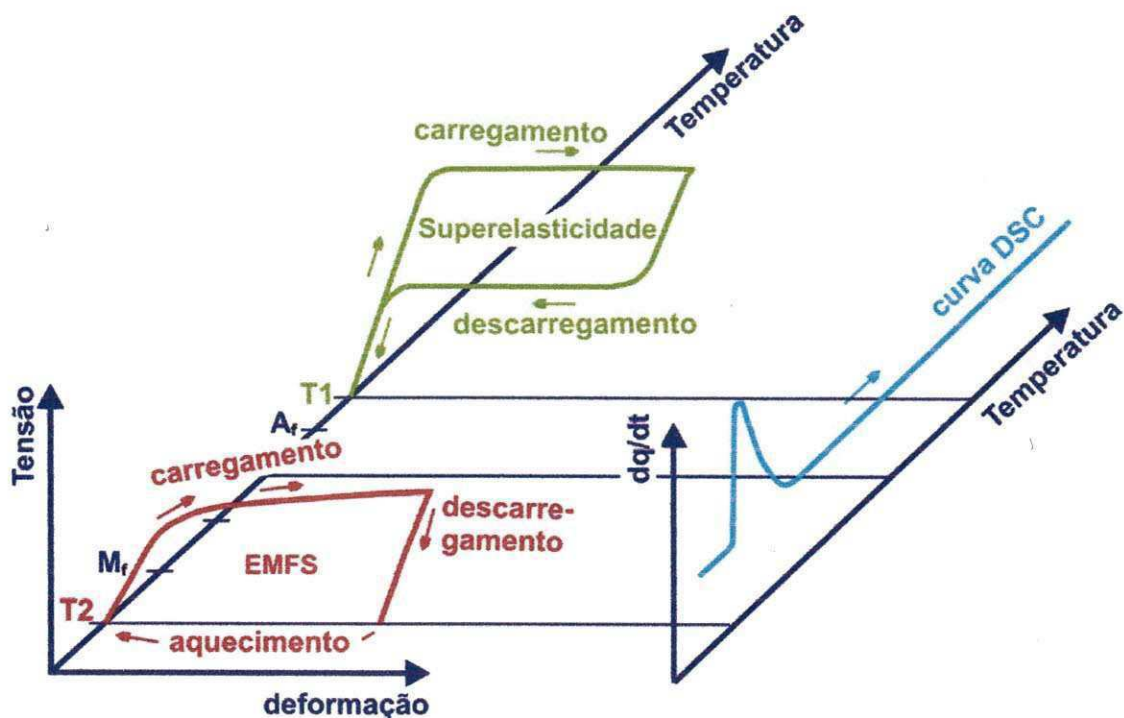


FIGURA 3.9 - Comportamento termomecânico das LMF. T1: carregamento em estado austenítico, T2: carregamento em estado martensítico. Fonte: <http://www.furukawa.co.uk/nt.html>.

3.5 Degradação do Efeito de Memória de Forma

A degradação é considerada como a perda progressiva do EMF, irregularidades, transições ordem-desordem incompletas, modificações configuracionais das martensitas e de austenita, etc. O EMF é expresso como sendo a diferença na forma antes e após a transformação martensítica.

A degradação do EMFR tem sido atribuída a redistribuição de tensões internas e ao fenômeno de precipitação. No caso de ligas Cu-Zn-Al a redução do EMFR está relacionada a ciclagem e a formação de tensões induzidas na fase martensítica (DATTA; BHUNYA; BANERJEE, 2001).

A experiência mostra que o comportamento global da degradação do EMF é influenciado por uma combinação complexa de parâmetros internos e externos (ARAUJO FILHO, 2000).

Alguns dos parâmetros internos são:

- Sistema de liga (os sistemas de ligas a base de cobre são mais susceptíveis a degradação do efeito de memória de forma, do que as ligas Ti-Ni);
- A composição da liga;
- O tipo de transformação e a estrutura cristalina, incluindo defeitos.

Semelhantemente, como parâmetros externos podem-se enumerar:

- O tratamento termomecânico;
- O treinamento;
- A tensão aplicada;
- A deformação imposta pela própria memória de forma.

3.6 Ligas Comerciais com EMF

Os sistemas de ligas a base de cobre (Cu-Al-Ni e Cu-Zn-Al) e Ni-Ti são neste momento objeto de exploração tecnológica e comercial em todo o mundo. As suas propriedades termomecânicas são muito distintas, de forma que as ligas Ni-Ti podem

apresentar recuperação de forma após deformações mais significativas (até cerca de 8%) do que as ligas de cobre (até 4%) para materiais policristalinos. Muitas propriedades das ligas Cu-Al-Ni são inferiores as das Ni-Ti (LOGEN, et al., 2005). As ligas Ni-Ti têm maior ductilidade do que as ligas de cobre e possuem excelente resistência à corrosão, enquanto que as ligas de cobre têm uma resistência à corrosão apenas satisfatória, além de serem susceptíveis à corrosão sob tensão. Porém, as ligas à base de cobre são de baixo custo (ZENGIN; OZGEN; CEYLAN, 2004), possuem uma relativa facilidade de obtenção podendo ser fundidas, extrudadas ou laminadas a frio ou a quente, apresentando também um leque mais abrangente de potenciais temperaturas de transformação.

Todos estes sistemas de LMF podem ser ativados termicamente de diferentes formas: por efeito Joule, por meio de convecção natural ou forçada, por radiação solar, à distância por laser. Uma grande preocupação para aplicações modernas está relacionada ao tempo de resposta deste material em comparação com outros materiais ativos, fato que limita sua utilização a aplicações de baixas frequências. Essa limitação em frequência está mais diretamente relacionada ao processo de resfriamento do material.

3.7 Aplicação das LMF

O uso mais comum de LMF da família Ni-Ti encontra-se em aplicações biomédicas, para as quais uma combinação de resistência, flexibilidade e biocompatibilidade são desejáveis. Na área biomédica estes materiais são empregados na odontologia, em próteses de órgãos, na fabricação de “stents” como uma endoprótese e na desobstrução de coágulos sanguíneos (DUERIG; PELTON; STOCKEL, 1999).

A maior parte dos dispositivos criados inicialmente funcionava como conectores, e retiravam proveito apenas do EMFS. Com o passar dos anos inúmeros dispositivos mais complexos foram sendo desenvolvidos nas áreas aeroespacial, biomédica, mecatrônica, eletroeletrônica, dentre outras (VAN HUMBEECK, 1999).

3.7.1 Aplicação em Aparelhos Ortodônticos

Os arcos ortodônticos produzidos com material que apresenta o efeito superelástico (ligas Ti-Ni) são altamente eficientes, podendo ser fixados mais fortemente do que os outros tipos de fios, não apresentando folga tão rapidamente e dispensando inúmeras visitas ao dentista reduzindo significativamente os traumas decorrentes destes tratamentos. A Figura 3.10 ilustra esse tipo de aplicação.

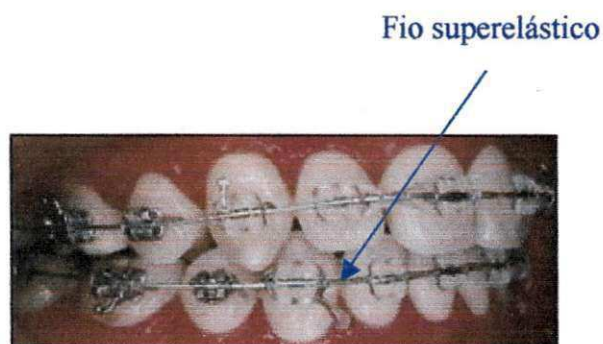


FIGURA 3.10 - Aplicação na odontologia do efeito superelástico

3.7.2 Aplicação em Conectores

As aplicações de LMF em dispositivos de conexão são de grande relevância quando se necessita de uniões mais específicas sem a utilização de soldas que ocasionam concentrações de tensão nas proximidades da união, fragilizando o material. No campo automobilístico, a ativação pode ser realizada através do calor gerado pelo motor do veículo. Quando o conector receptor é esfriado o EMF é relaxado permitindo a remoção com uma força de baixo nível de intensidade devido à temperatura de transformação da LMF. Desta maneira, a pressão provocada pelo material com EMF será alta durante a maioria da operação normal do conector e será baixa quando for requerida a separação do mesmo. Os conectores elétricos ou térmicos são aplicações típicas do EMF e foram primeiramente utilizados no caça Norte-Americano Grumman F-14. Neste avião utilizou-se uma espécie de luva para acoplamentos hidráulicos feita de material com memória de forma, para conexão de dois tubos diferentes. A LMF Ni-Ti empregada apresenta elemento de liga ternário que consegue reduzir as temperaturas

de transformação martensítica a níveis criogênicos. Nessa temperatura a luva na fase martensítica é deformada e seu diâmetro passa a ser cerca 4% maior que o diâmetro dos tubos hidráulicos. Conserva-se a luva em nitrogênio líquido, para que a mesma seja inserida em torno da conexão. Durante o aumento da temperatura até a da fase austenítica, a luva volta a sua forma original comprimindo as duas tubulações e vedando a conexão de forma eficiente. A Figura 3.11 mostra essa aplicação.

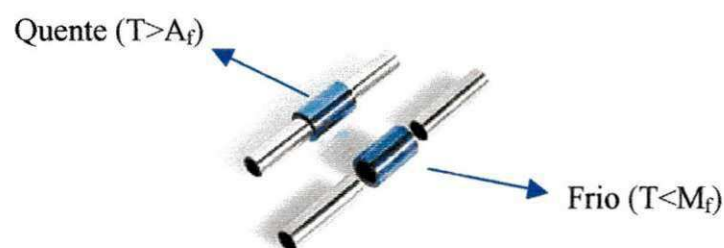


FIGURA 3.11 – Luva de LMF para conexão de tubos. Fonte: <http://www.furukawa.co.uk/nt.html>.

3.7.3 Aplicação em Atuadores Térmicos

Um atuador térmico com memória de forma tem a capacidade de converter energia térmica em energia mecânica, gerando força e deslocamento (OTSUKA e WAYMAN, 1998). A Figura 3.12 ilustra um atuador térmico, constituído de um controlador de temperatura, uma mola com EMFR, uma mola clássica de apoio, entrada de água quente e entrada de água fria.

Uma mola com EMFR é posicionada em oposição à uma mola de apoio clássica sem EMFR. Quando regulada para que a água misturada atinja uma temperatura mais alta, a mola de apoio desloca o carretel (êmbolo) para a esquerda permitindo que maior quantidade de água quente escoe, a mola com EMFR sofre mudança no tamanho permitindo escoamento da água quente. O movimento contrário ocorre com a água fria.

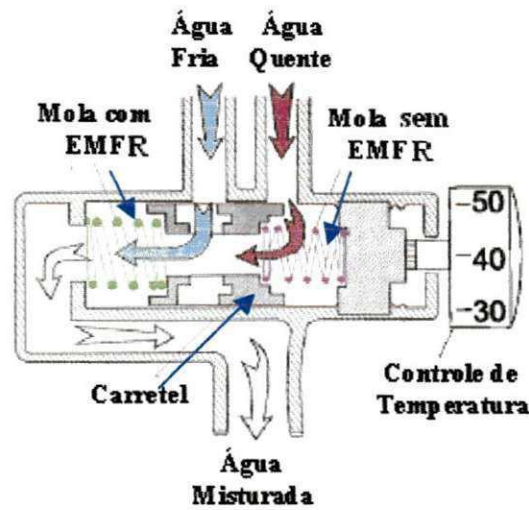


FIGURA 3.12 - Aplicação de um atuador térmico do tipo mola com memória de forma.
 Fonte: <http://www.furukawa.co.uk/nt.html>.

3.7.4 Aplicações no Setor Elétrico

Os materiais com EMF são sensíveis ao aumento de temperatura, tornando-se naturalmente interessantes para o desenvolvimento de aplicações no setor elétrico onde o aquecimento pode ser provocado pela passagem de corrente elétrica que origina uma mudança espontânea de forma, conforme indica a Figura 3.13.

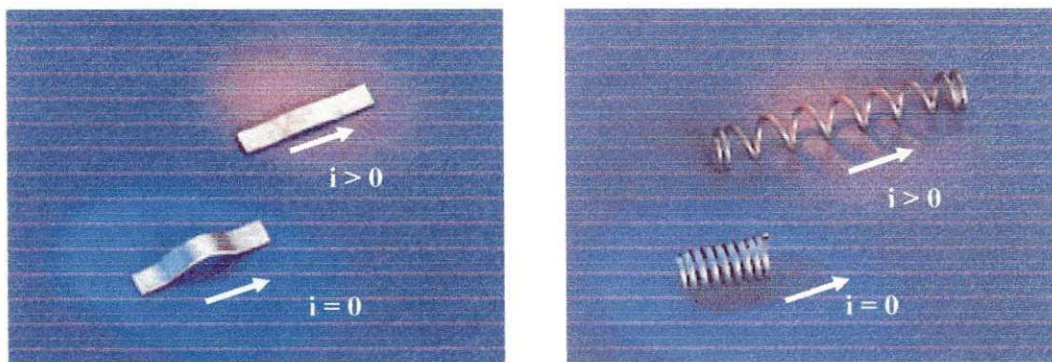


FIGURA 3.13 - Exemplos de elementos ativos em ligas de cobre com EMF reagindo à passagem de corrente elétrica ($i > 0$).

Os condutores vivos (que transportam corrente elétrica) e os elementos do circuito devem ser protegidos por um dispositivo de seccionamento automático contra sobrecarga e contra curto-circuito.

A característica de funcionamento de um dispositivo protegendo um circuito contra sobrecargas elétricas deve ser:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z;$$

$$I_Z \leq 1,45 I_2.$$

Em que: I_n : Corrente nominal do dispositivo de seccionamento;

I_Z : Capacidade de condução de corrente dos condutores;

I_B : Corrente de projeto;

I_2 : Corrente convencional de atuação, para disjuntores, ou corrente convencional de fusão, para fusíveis.

Deve ser previsto um dispositivo para interromper toda corrente de curto-circuito de modo a evitar que os efeitos térmicos e dinâmicos danifiquem os condutores e elementos do circuito.

A integral de Joule que o dispositivo deixa passar deve ser inferior ou igual a integral de Joule necessária para aquecer o condutor desde a temperatura máxima para serviço contínuo até a temperatura limite de curto-circuito. Pode ser escrito da seguinte forma:

$$\int_0^t I^2 dt \leq K^2 S^2 \quad (1)$$

Onde :

I : corrente de curto-circuito em A;

t : duração do curto-circuito em s;

S : seção do condutor em mm²;

K : constante que depende do condutor.

Atualmente existem no mercado dispositivos que atendem os pré-requisitos acima pela norma NBR 5410 da ABNT (NBR 5410), entre eles fusíveis, que

quando percorridos por uma corrente elétrica superior a nominal, da ordem de 10 a 15 vezes, gera calor por efeito Joule e o filamento se rompe. Outros tipos de protetores de circuitos elétricos são os disjuntores, que protegem o circuito e seus elementos contra curto-circuito. A proteção contra sobrecarga elétrica é realizada por relé de sobrecarga, estes podem ser bimetálicos ou eletrônicos. Este dispositivo elétrico seja de que tipo for não interrompe o circuito principal, mas sim faz atuar o dispositivo de manobra desse circuito principal que pode ser o contactor. Os relés bimetálicos atuam em função do deslocamento de uma lâmina provocada por aquecimento devido ao efeito Joule da corrente.

Uma lâmina de LMF percorrida por uma corrente elétrica maior que sua corrente nominal, gera calor por efeito Joule, elevando a temperatura acima da temperatura A_f , fazendo com que o material recupere uma forma pré-estabelecida podendo, portanto fazer a mesma função de uma lâmina bimetálica.

Ligas Cu-Al-Ni com teores de alumínio variando entre 13 e 13,5% e teor níquel de 4% fornecem temperaturas A_s e A_f na faixa de 70 a 180 °C (ZENGIN; OZGEN; CEYLAN, 2004) e estabilidade térmica a altas temperaturas, tornando esse material interessante para aplicação no setor elétrico.

O tempo de resposta de um atuador com EMF é uma característica crítica e deve ser analisada cuidadosamente para ter condições de competir com os atuadores convencionais (BRAILOVSKI; TROCHU; DAIGNEAULT, 1996).

3.7.5 Armações para óculos

Os óculos cujas armações são confeccionadas de ligas Ni-Ti superelásticas oferecem ao usuário conforto e durabilidade, tendo em vista que vários danos causados as armações dos óculos convencionais são devido a esforços demasiados e como o limite de elasticidade dos metais usados em armações clássicas é baixo em comparação com o do Ni-Ti superelástico, o mesmo deforma-se plasticamente e pode até chegar a se romper. A figura 3.14 mostra a capacidade de uma armação e LMF Ni-Ti em resistir a esforços quando em regime superelástico.



FIGURA 3.14 – Óculos com características superelásticas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia experimental adotada incluiu basicamente as etapas de concepção e montagem da máquina multifuncional de ensaios e a sua validação utilizando amostras de LMF especialmente selecionadas para esse fim. As amostras de validação foram caracterizadas previamente utilizando técnicas clássicas como a microscopia ótica e ensaios de microdureza, assim como medidas de resistência elétrica em função da temperatura.

4.1 Concepção e Montagem da Máquina de Testes

A fase de concepção da máquina de testes consistiu da elaboração de um projeto modular, em que uma estrutura mecânica rígida (prensa hidráulica) seria acoplada a outros módulos pré-existentis como um sistema de aquisição de dados, um banho termoregulável, uma fonte de tensão e corrente, além dos diversos sensores (termopar, sensor de deslocamento e célula de carga). Algumas adaptações mecânicas deveriam ser desenvolvidas para posicionamento na estrutura rígida e suporte das amostras de testes.

A princípio foram estabelecidas as especificações e dimensões da máquina multifuncional como também dos acessórios necessários à adaptação da estrutura mecânica rígida. Posteriormente foi desenvolvido o projeto conceitual utilizando o programa Auto-CAD, conforme pode ser observado na Figura 4.1, tendo por base a estrutura rígida da prensa de bancada de pequeno porte adquirida especialmente para esse fim.

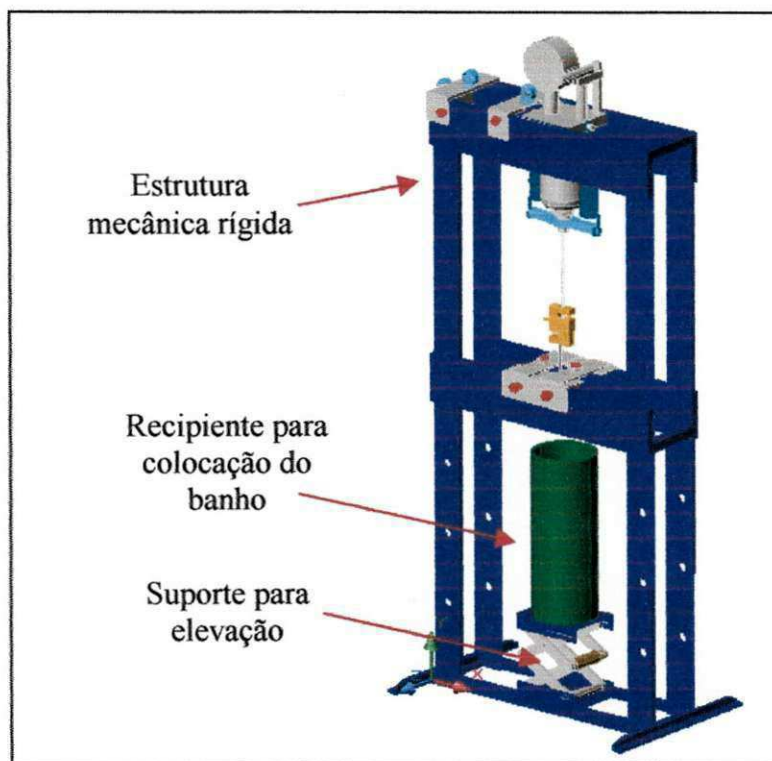


FIGURA 4.1- Projeto conceitual da estrutura mecânica rígida da máquina de testes utilizando o programa Auto-CAD.

Importante mencionar que entre a concepção e montagem da máquina foram feitos alguns ajustes no projeto conceitual a fim de que a mesma atingisse uma melhor performance, tais como: eliminação da haste entre o êmbolo do pistão e a célula de carga, modificações dos apoios (cilindros de aço inoxidável) para sustentação das amostras e troca do recipiente para o banho por um banho termoregulável. A Figura 4.2 apresenta alguns acessórios e componentes da máquina de testes (para operação em modo de tração) utilizando o programa Auto-CAD.

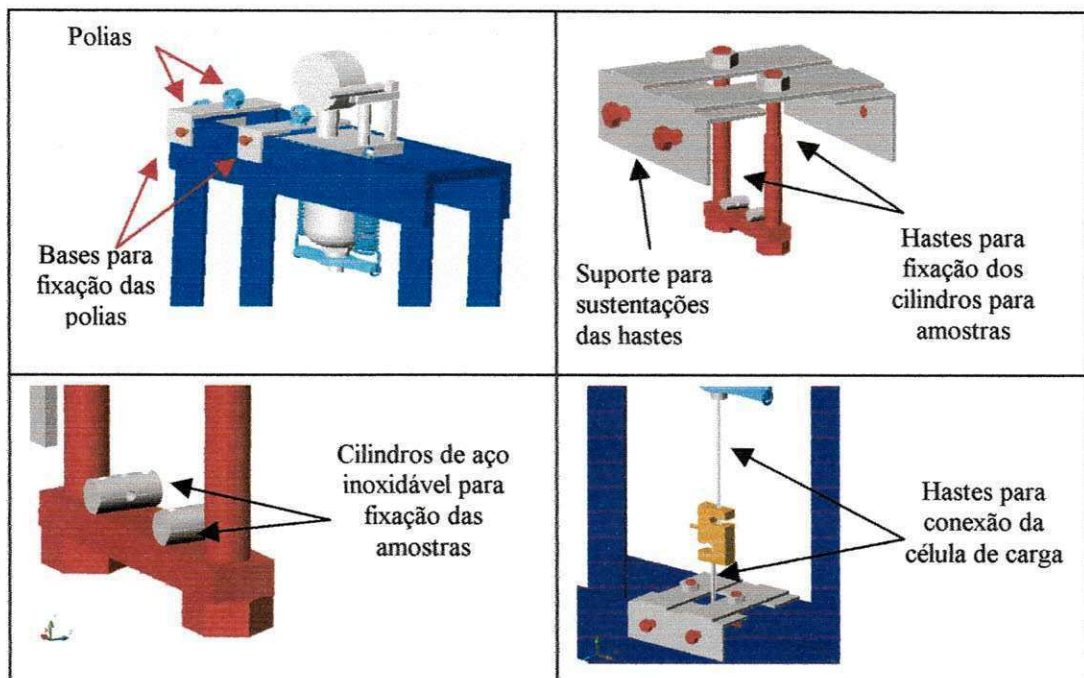


FIGURA 4.2- Projeto conceitual de acessórios e componentes da máquina de testes (para operação em modo de tração) utilizando o programa Auto-CAD

Para a caracterização termomecânica de amostras de LMF se faz necessária a aplicação de carregamento mecânico e/ou a imposição de deformação com subsequente variação controlada de sua temperatura. Partindo dessa premissa, o equipamento mostrado na foto da figura 4.3 foi concebido e montado no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UFCG a qual revela a máquina multifuncional de ensaios com os seus principais acessórios e componentes.

A Tabela 4.1 resume os principais componentes do sistema ilustrado na Figura 4.3.

MODO DE TRAÇÃO



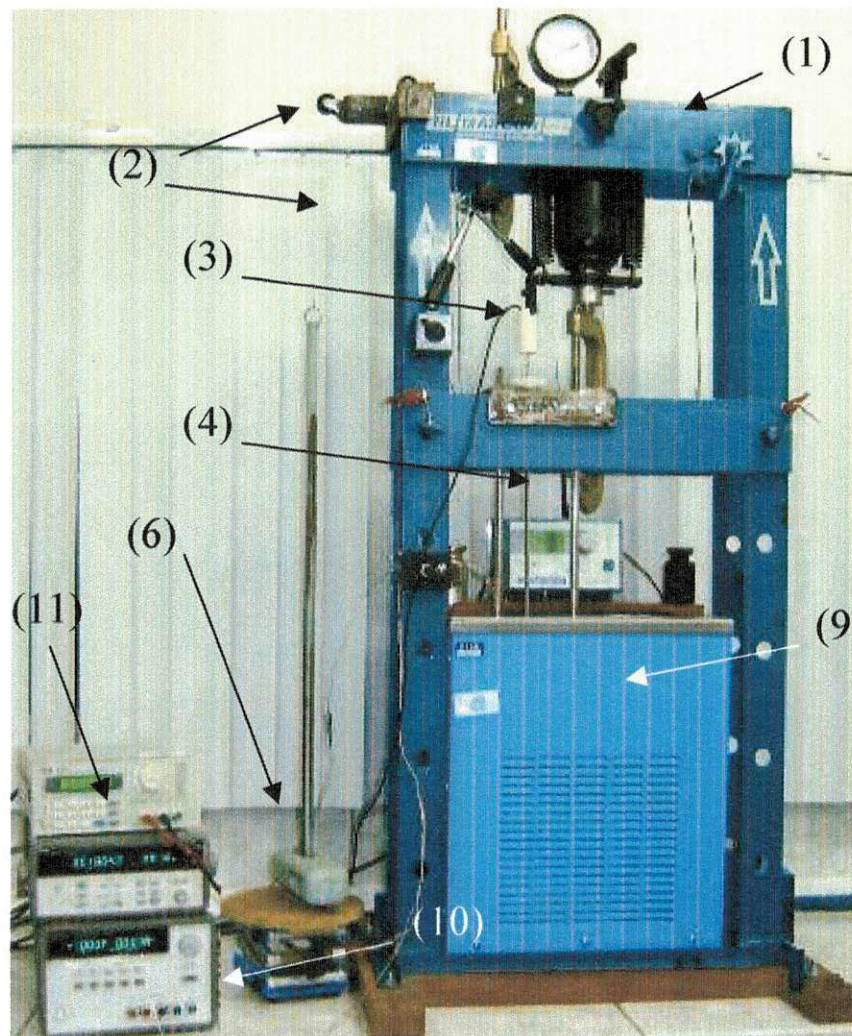
(2) – Polias para sustentação do cabo de tração



(3) – Sensor de deslocamento



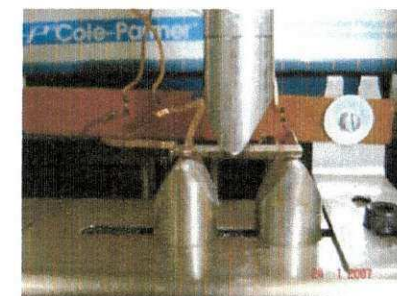
(5) – Garra de tração



MODO DE FLEXÃO



(7) – Célula de carga



(8) – Porta amostra de flexão

FIGURA 4.3 - Máquina de testes com acessórios e componentes. (1) Estrutura rígida; (2) Cabo de tração; (3) Sensor de deslocamento LVDT; (4) Haste móvel; (5) Garra de tração; (6) Carga de tração; (7) Célula de carga; (8) Porta amostra de flexão; (9) Banho termoregulável; (10) Fonte de tensão e corrente; (11) Sistema de aquisição de dados.

TABELA 4.1– Principais componentes da máquina de ensaios

Componente	Marca	Modelo
Prensa de 15 toneladas	Marcon	MPH - 15
Banho termoregulável	Cole - Parmer	12101-56 CE
Sistema de aquisição de dados	Agilent	34970A
Sensor de deslocamento LVDT	Solartron	DG/5.0 e DF/5.0
Célula de carga	Alfa	A250
Fonte de tensão / corrente *	Agilent	E3633A

* Utilizada quando se deseja também medir a variação de resistência elétrica em função a temperatura.

Conforme pode ser observado na Figura 4.3, a máquina concebida pode funcionar em dois modos:

- A) tração sob carga constante (adição de pesos): permite a obtenção de curvas características de deformação (ϵ) em função da temperatura (T). Esse modo de operação corresponde a máquina desenvolvida por DE ARAUJO *et al* (1997) e depois melhorada por LOPEZ-CUELLAR *et al* (2002);
- B) geração de força em flexão 3 pontos: permite a obtenção de curvas características de força (F) em função da temperatura (T).

Em ambos os modos de operação é possível também medir a resistência elétrica (R) da amostra em função da temperatura (T). O funcionamento de cada modo de teste ocorre como segue:

Modo A): uma amostra de lâmina ou fio LMF de comprimento situado entre 20 e 50 mm é fixado na garra de tração (5) conectada a haste móvel (4) em que é aplicada um carregamento constante por intermédio do cabo de tração (2) e dos pesos (6). Esse carregamento é responsável por impor uma deformação inicial na amostra, medida pelo sensor de deslocamento LVDT (3). A amostra LMF sob carga é imersa no banho termoregulável (9) juntamente com um termopar tipo K. O sensor de deslocamento e o termopar são ligados a dois canais do sistema de aquisição de dados (11), e os dados de

deslocamento e temperatura são armazenados em um computador. A Figura 4.4 ilustra o modo A esquematicamente.

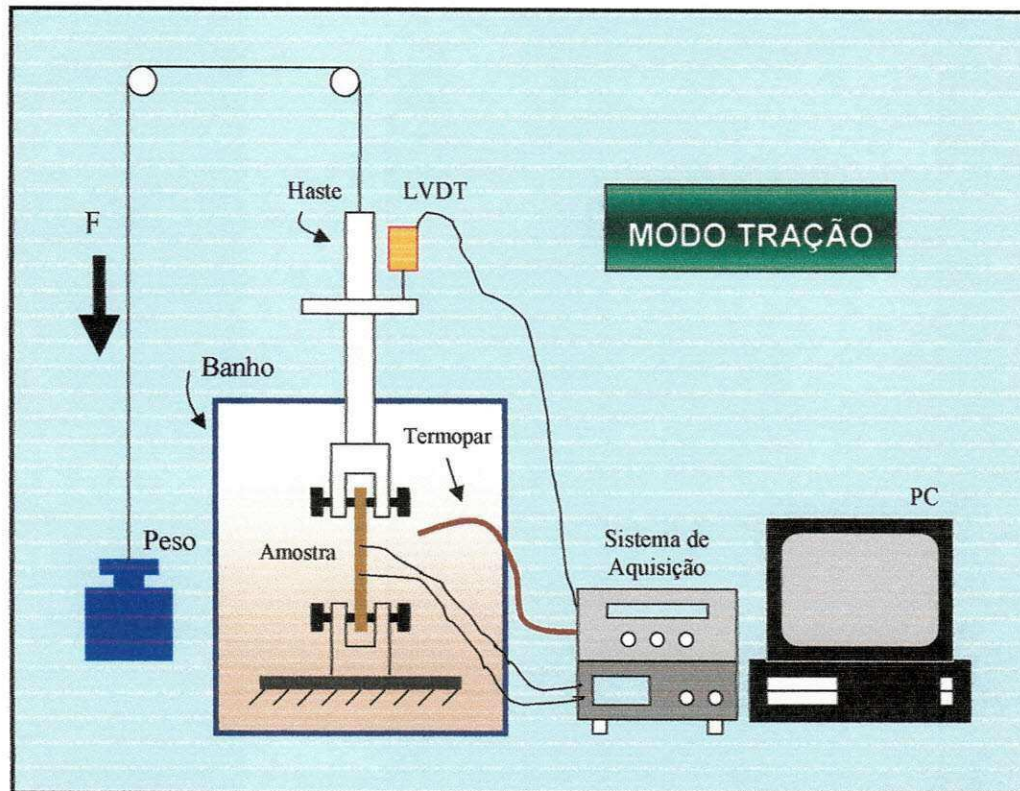


FIGURA 4.4 – Ilustração do funcionamento da máquina multifuncional operando no modo A.

Modo B): uma amostra de lâmina LMF e comprimento situado entre 20 e 50 mm é bi-apoiada em um porta amostra de flexão (8) enquanto um eixo móvel mecanicamente ligado a célula de carga (7) permite impor uma flecha central qualquer à amostra. A variação controlada da temperatura da amostra com o banho termoregulável (9) é medida com um termopar tipo K. A célula de carga e o termopar são ligados a dois canais do sistema de aquisição de dados (11), e os dados de força e temperatura são armazenados em um computador. A Figura 4.5 ilustra a máquina multifuncional operando no modo B.

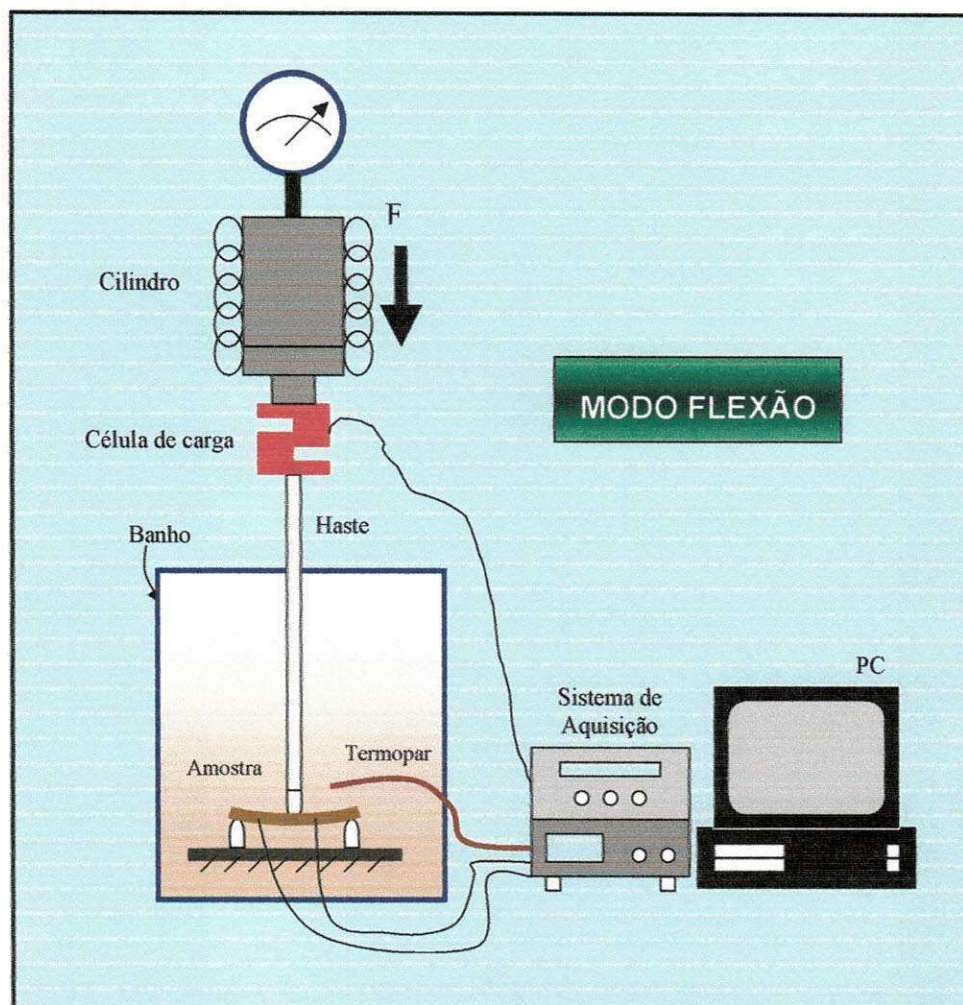


FIGURA 4.5 – Ilustração da operação da máquina multifuncional no modo B.

Os principais componentes da máquina da Figura 4.3 são descritos brevemente a seguir.

4.1.1 Banho Termoregulável

O banho termoregulável permite trabalhar na faixa de -30 a 200 °C, com um reservatório de 13 litros onde fica o fluido que recebe a amostra de teste. Na Figura 4.6 pode ser observado o equipamento usado (Tabela 4.1). O fluido onde a amostra fica completamente imersa é o óleo de silicone Rhodorsil 47V 50 da Rhodia Silicones.



FIGURA 4.6 – Reservatório onde fica o fluido que recebe a amostra de testes.

Após a preparação da amostra, ela deve ser montada mecanicamente e colocada dentro do reservatório do banho junto com o termopar, submergindo-os no fluido de circulação.

4.1.2 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados, mostrado na Figura 4.7 é equipado com um módulo multiplexador de 20 canais com precisão de leitura de até 6 ½ dígitos. Esse sistema de aquisição permite fazer a medição de resistência elétrica, tensão, corrente, temperatura (termopar, sonda de platina,...) e outras. Esse sistema permite também calibrar qualquer um de seus canais para leitura de sensores que obedecem a uma relação linear do tipo $y = ax + b$, como é o caso de células de carga e sensores de deslocamento LVDT. O sistema da Figura 4.7 utiliza o programa *Agilent BenchLink Date Logger Utilities* para gerenciar os ensaios realizados.



FIGURA 4.7 – Sistema de aquisição de dados com módulo multiplexador de 20 canais.

4.1.3 Sensor de Deslocamento LVDT

Para quantificar o deslocamento realizado pelo movimento de uma amostra de LMF, durante a mudança de sua forma por ação da temperatura, é necessária a utilização de sensores de deslocamento bem como de circuitos de condicionamento de seus sinais. Nos experimentos de caracterização dos sensores de deslocamento tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), foi utilizado o circuito condicionador do sistema de aquisição de dados apresentado na Figura 4.8. Em uma das etapas deste trabalho foi realizado o levantamento das curvas características de dois LVDT (tipo particular de sensor de relutância variável, amplamente utilizado na indústria). A medição de deslocamento foi efetuada através de uma variação de tensão, resultado da mudança na relutância entre duas ou mais bobinas. Nos sensores LVDT três enrolamentos simetricamente espaçados e um núcleo magnético móvel (haste) formam o sistema de acoplamento magnético. A mudança da posição do núcleo é detectada eletronicamente e processada adequadamente para geração de uma leitura precisa do deslocamento aplicado. A Figura 4.8 apresenta os dois LVDT que foram utilizados, ambos da marca Solartron. Na Figura 4.8(a) mostra-se o LVDT modelo DG/5.0 e na Figura 4.8(b) outro do tipo DF/5.0. O tipo DF/5.0 possui haste livre enquanto o DG/5.0 tem haste fixa com mola de retorno. O método de caracterização consiste em alimentar o LVDT e deslocar a sua haste com o auxílio de um parafuso micrométrico de precisão,

efetuando passos de 0,5 em 0,5mm e ao mesmo tempo anotar a leitura da queda de tensão elétrica produzida.

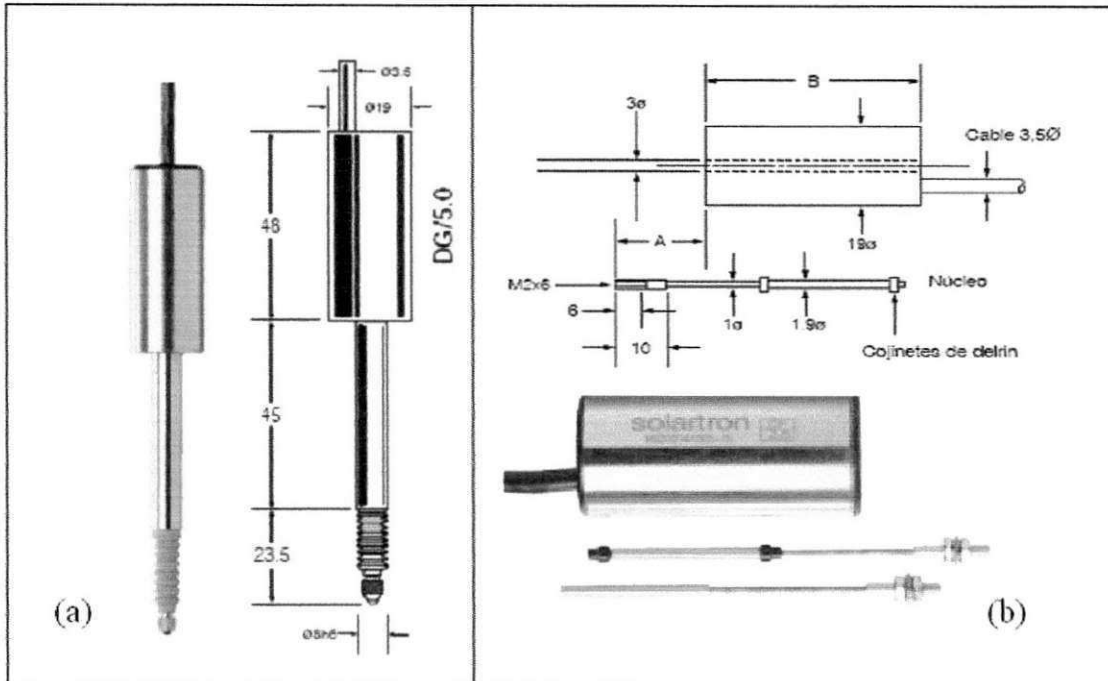


FIGURA 4.8 – Sensores LVDT. (a) LVDT tipo DG/5.0; (b) LVDT tipo DF/5.0.

4.1.3.1 Montagem e Caracterização

Como pode ser observado na Figura 4.9, para o LVDT de haste livre a montagem para determinação de sua curva característica é vertical e para o LVDT de haste com mola de retorno, a montagem é horizontal. O parafuso micrométrico utilizado é da marca Starret (0 - 25mm) com resolução de 0,01mm. O multímetro utilizado para leitura do sinal de tensão gerado pelos LVDT é da Minipa, modelo MDM-8146 e foi utilizado na escala 20VDC, enquanto a fonte utilizada na alimentação dos LVDT é da ICEL, modelo PS-7000, regulada para 10VDC.

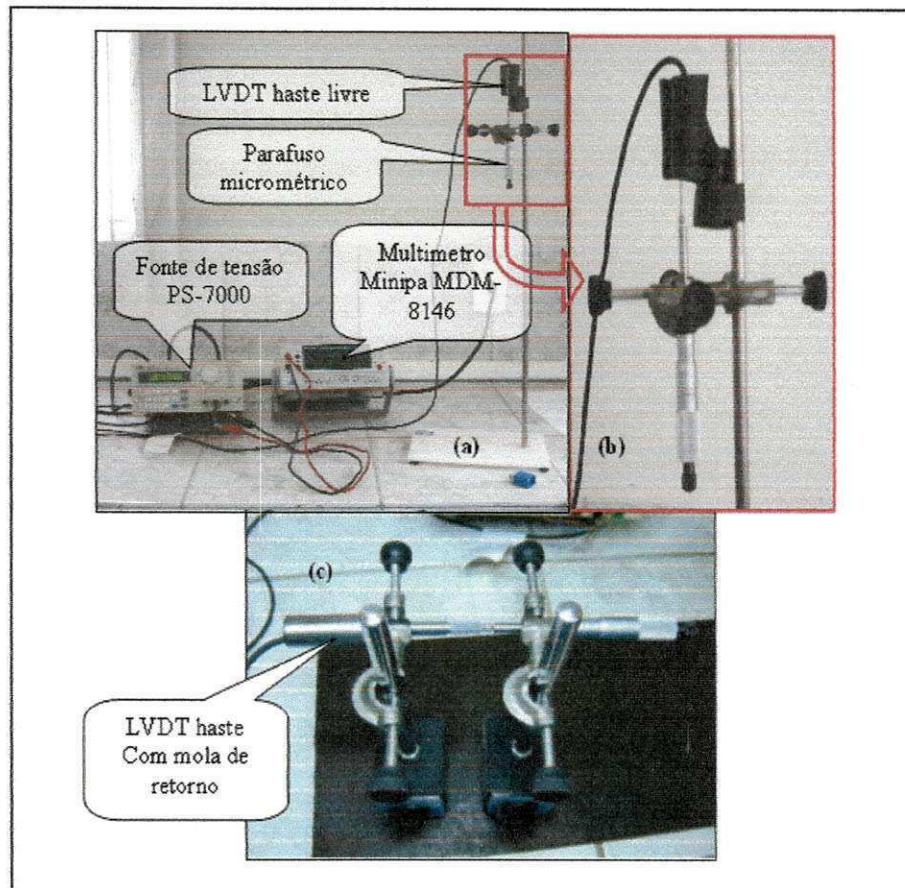


FIGURA 4.9 - Sensores de deslocamento LVDT da Solartron montados para levantamento das curvas características. (a) Foto do LVDT – tipo DG/5.0. (b) Detalhe da montagem. (c) Foto do LVDT – tipo DF/5.0.

Como mencionado anteriormente, para que se possam utilizar os transdutores para medição de deslocamento e força, com o sistema de aquisição de dados da Agilent, modelo 34970A, se faz necessário obter as curvas características de cada transdutor. Após a montagem da estrutura de caracterização ilustrada na Figura 4.9, o gráfico de deslocamento em função da tensão elétrica ($Y - V$) foi construído para os dois LVDT. As Figuras 4.10 e 4.11 revelam os comportamentos lineares obtidos.

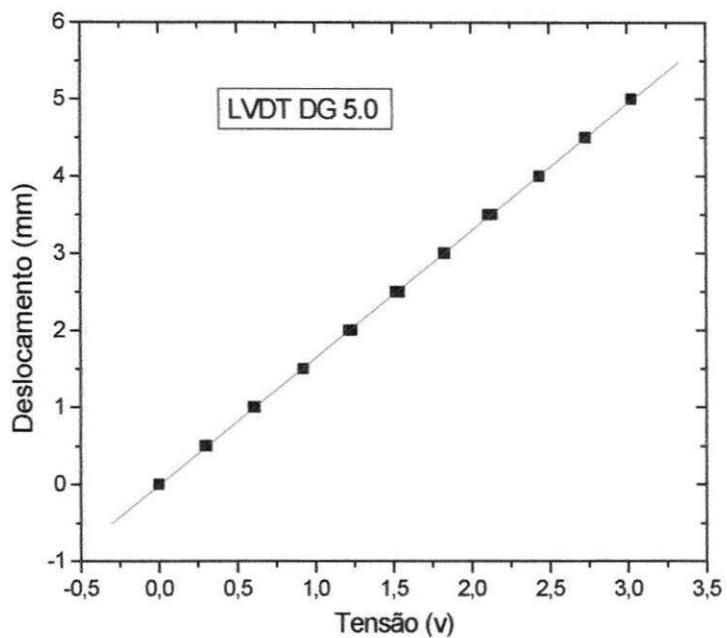


FIGURA 4.10 - Curva característica do LVDT tipo DG/5.0.

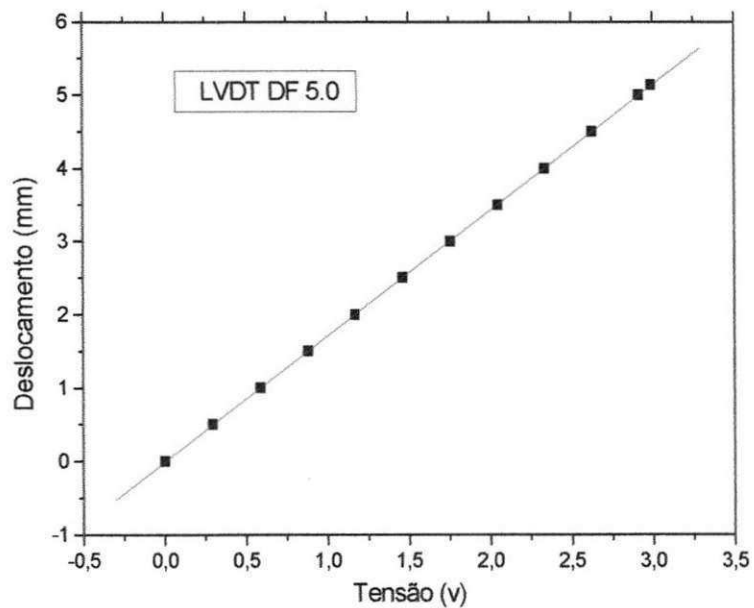


FIGURA 4.11 - Curva característica do LVDT tipo DF/5.0.

4.1.4 Célula de Carga

Ao se restringir o movimento de uma amostra de LMF durante aquecimento, origina-se uma força de recuperação que é um parâmetro importante para sua caracterização. Então, para que se possa quantificar tal força, se faz necessário à utilização de um transdutor específico, do tipo célula de carga que possibilita levantar curvas experimentais *Força versus Temperatura* ($F - T$).

Em geral uma célula de carga é um elemento mecânico estrutural em aço inoxidável ou alumínio que incorpora extensômetros de resistência elétrica, conhecidos como strain-gages, colados em seu corpo. Quando tensionados esse elementos sofrem uma variação na resistência elétrica proporcional à força aplicada. Essa variação na resistência é medida usando um circuito adequado, que neste caso, será um canal de entrada do sistema de aquisição de dados da Figura 4.7. A célula de carga utilizada neste trabalho foi a A250 de marca Alfa, conforme indicado na Tabela 4.1.

4.1.4.1 Montagem e Caracterização

A caracterização da célula de carga foi realizada na máquina universal de ensaios INSTRON 8852, com tensão de alimentação de 10 V. A Figura 4.12 mostra a montagem da mesma e a Figura 4.13 apresenta a curva característica obtida, em que: $F = (122249,38125).V - 10,15586$, em que V é a tensão de saída em Volts e F a força em Newtons.

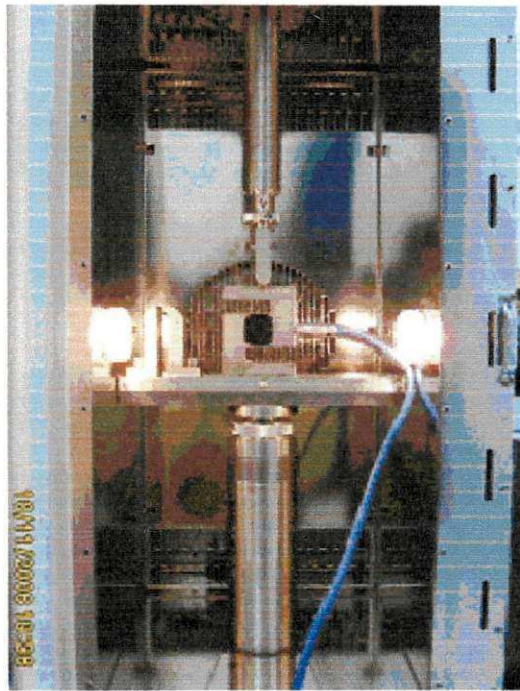


FIGURA 4.12 – Montagem da célula de carga na máquina de ensaios.

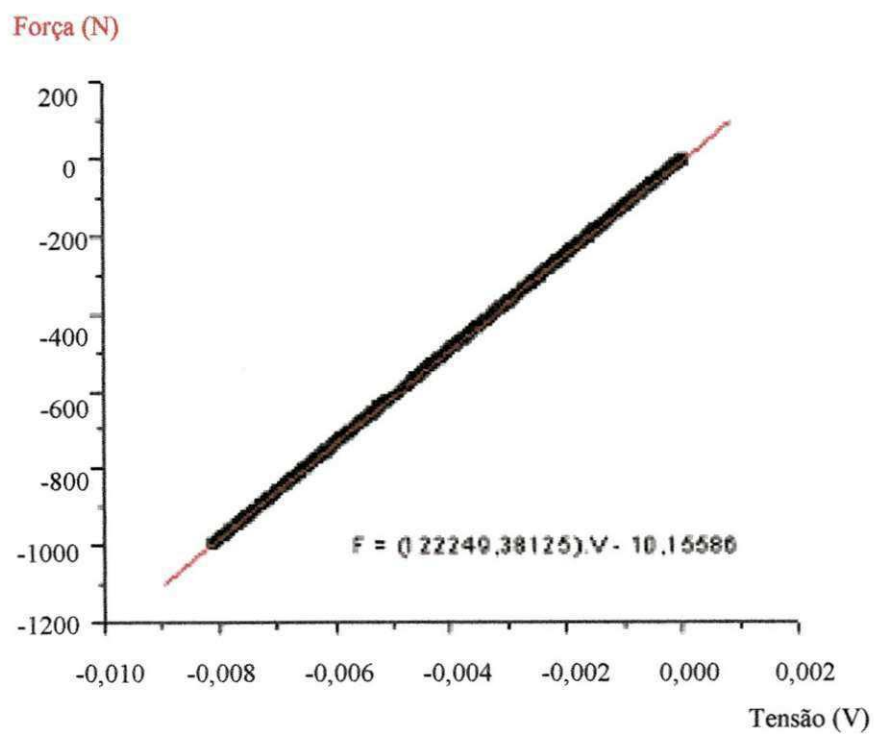


FIGURA 4.13- Curva característica da célula de carga.

4.2 Validação da Máquina

Para validação da máquina apresentada na Figura 4.3 foram utilizadas duas amostras de LMF. Para os ensaios de geração de força em flexão 3 pontos foi utilizada uma amostra da liga Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso) obtida através do processo Plasma Skull push pull (PSPP) realizado em uma máquina de fusão a plasma Discovery All da EDG Equipamentos e Controles. Para os ensaios de tração sob carga constante foi utilizada uma amostra bruta da liga industrial Cu-14,0Al-4,0Ni (% em peso) fornecida pela empresa Tréfimetaux (França) através de uma cooperação com o Groupe d'Études de Métallurgie Physique et de Physique des Matériaux (GEMPPM) do INSA de Lyon. Após a obtenção da liga Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso) foi realizado um tratamento térmico de betatização a 900°C durante 15 minutos, seguido de têmpera em água à temperatura ambiente. Para os ensaios de validação da máquina as amostras Ni-Ti-Cu e Cu-Al-Ni corresponderam a lâminas de dimensões 24,2 x 5,2 x 1,3 mm e 40 x 3 x 1 mm, respectivamente.

4.2.1 Obtenção da Amostra de Teste para os Ensaios de Flexão (Modo B)

O processo de fusão e conformação pelo método *Plasma Skull Push-Pull* (PSPP) para a fabricação de ligas com memória de forma (DE ARAÚJO *et al*, 2006) foi utilizado neste trabalho usando o equipamento mostrado na Figura 4.14. A Figura 4.15 mostra a seqüência de processamento.



FIGURA 4.14 - Máquina de fusão a plasma Discovery All, da EDG Equipamentos e Controles, com detalhes das câmaras (A - Câmara Superior – Fusão / B- Câmara Inferior – Conformação).

O processo de fusão iniciou-se com o empilhamento dos elementos sobre um cadinho de cobre, de forma que os elementos com maior ponto de fusão foram colocados na parte inferior do cadinho, conforme mostrado na Figura 4.15(a). Um eletrodo rotativo de tungstênio origina uma tocha rotativa de plasma em atmosfera de argônio responsável pela fusão dos elementos conforme ilustrado na Figura 4.15(b). Para acionamento da tocha de plasma os materiais a serem fundidos ficaram a uma distância de 3,5 a 5,0 mm do eletrodo de tungstênio. A tocha de plasma provocou a fusão dos elementos, formando desse modo um botão de LMF, como ilustrado na Figura 4.15(c). A liga fundida foi injetada em um molde de alumínio, levando a obtenção de uma pastilha cilíndrica, conforme ilustrado na Figura 4.15(d). Antes de se injetar o botão de LMF para a formação da pastilha, a liga foi fundida 5 vezes para garantir uma melhor homogeneidade do produto final.

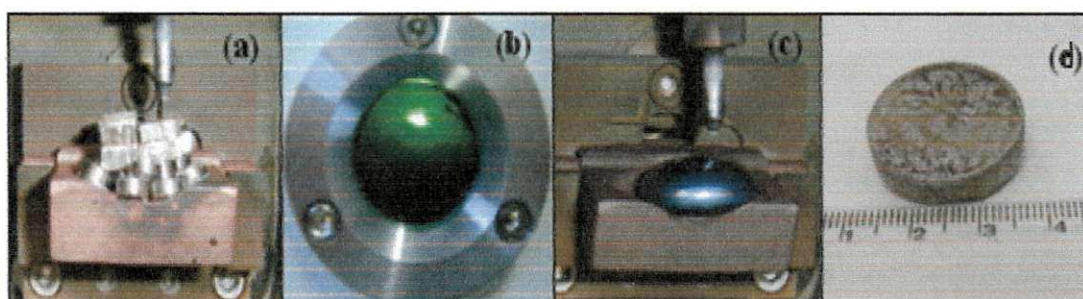


FIGURA 4.15 – Processo de fusão a plasma pelo método PSPP. (a) Elementos puros empilhados no cadinho de cobre. (b) Tocha de plasma. (c) Botão de LMF após fusão. (d) Pastilha obtida pela injeção do botão fundido em molde metálico.

As amostras obtidas passaram por um tratamento térmico de betatização a 900°C por 15 minutos, seguido de têmpera em água a temperatura ambiente, para obter a transformação martensítica reversível, que origina os fenômenos de memória de forma. A metalografia da liga obtida iniciou-se a partir do corte das pastilhas que foram injetadas durante a fusão utilizando uma cortadeira metalográfica de precisão marca Buehler, modelo Isomet Low Speed, apresentada na Figura 4.16.



FIGURA 4.16 – Cortadeira metalográfica para a obtenção de lâminas LMF.

Após o corte das amostras, as mesmas foram embutidas em resina acrílica, para na seqüência passarem pelo processo de lixamento e polimento.

4.2.2 Caracterização Prévia das Amostras de Validação

A caracterização prévia das amostras Cu-Al-Ni e Ni-Ti-Cu foi feita através de microscopia ótica, microdureza e resistência elétrica em função da temperatura.

4.2.2.1 Microscopia Ótica

A análise microestrutural das amostras foi realizada utilizando um analisador de imagens da marca Olympus, modelo BX51M que utiliza o programa de análises de imagens MSQTM Express versão 6.51, conforme mostrado na Figura 4.17.

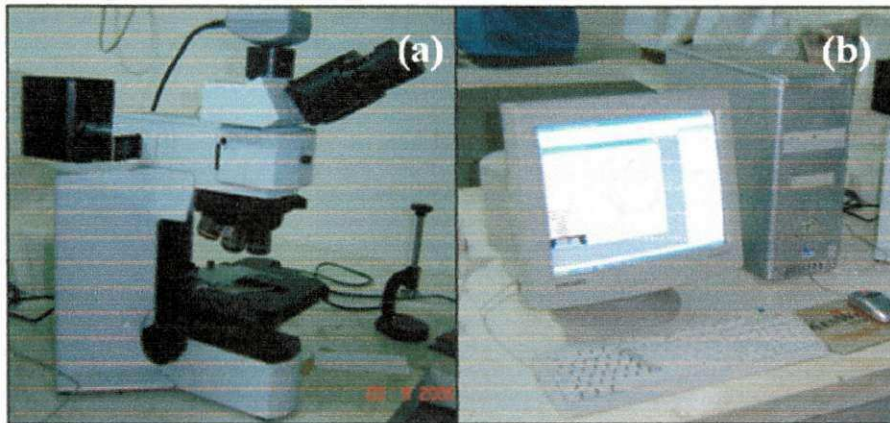


Figura 4.17 – Ensaio de microscopia ótica. (a) Analisador de imagens Olympus BX51M. (b) Computador equipado com Software para análise de imagens MSQTM Express 6.51.

4.2.2.2 Microdureza

Os ensaios de dureza Vickers (HV) foram realizados em um microdurômetro Future Tech, modelo FM 700, mostrado na Figura 4.18. Em todos os ensaios de microdureza foi utilizada uma carga de 300 gf com um tempo de aplicação de 15 segundos.



FIGURA 4.18 – Microdurômetro Future Tech FM 700.

A microdureza média de cada amostra de LMF utilizada para validar a máquina multifuncional foi obtida a partir de uma série de medidas coletadas sobre toda a superfície da amostra. Foram realizadas 10 medições com posterior cálculo da média e desvio padrão.

A Figura 4.19 apresenta a impressão deixada pelo penetrador do microdurômetro sobre uma amostra de LMF Cu-Al-Ni. A partir desta impressão fez-se à medição das diagonais, e assim determinou-se a microdureza Vickers do material.

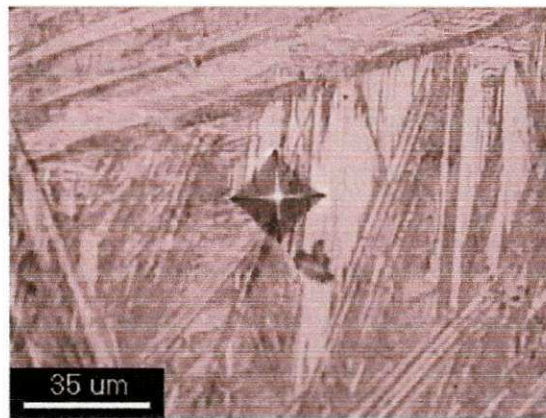


FIGURA 4.19 – Impressão deixada durante o ensaio de microdureza Vickers.

4.2.2.3 Resistência Elétrica em Função da Temperatura

As LMF apresentam variações nas suas propriedades físicas e mecânicas com a temperatura. Uma dessas propriedades físicas é a resistividade elétrica e através das curvas experimentais *Resistência Elétrica versus Temperatura (R – T)*, é possível determinar as temperaturas de transformação de fase e a histerese em temperatura destes materiais. Para que essa medição possa ser realizada se faz necessário variar de forma controlada a temperatura do meio, onde a amostra de LMF está inserida, e monitorar simultaneamente a temperatura e a resistência elétrica, ou a variação de tensão da amostra (REIS *et al*, 2006).

Após a preparação da amostra, a mesma foi montada mecanicamente e colocada dentro do reservatório do banho junto com o termopar ficando totalmente submersa no fluido de circulação com o termopar o mais próximo possível, conforme ilustra a Figura 4.20. Os fios externos da amostra foram ligados na fonte de corrente (7)

e os internos conectados em um dos canais do sistema de aquisição de dados (8) previamente programado como voltímetro. Após esta montagem, o sistema de aquisição foi então ligado para realizar um ajuste na fonte de corrente. Nesse ajuste se fez um monitorando da queda de tensão na amostra ao mesmo tempo em que se ajustou a corrente da fonte. O termopar (do tipo K) foi ligado a um outro canal do sistema de aquisição de dados (8) previamente programado para recebê-lo. Após o ajuste da fonte de corrente, iniciou-se o experimento da seguinte forma: primeiro programou-se o banho termo regulável (1), através do painel de controle (6). Depois se iniciou a aquisição dos dados no software de aquisição instalado no microcomputador (9).

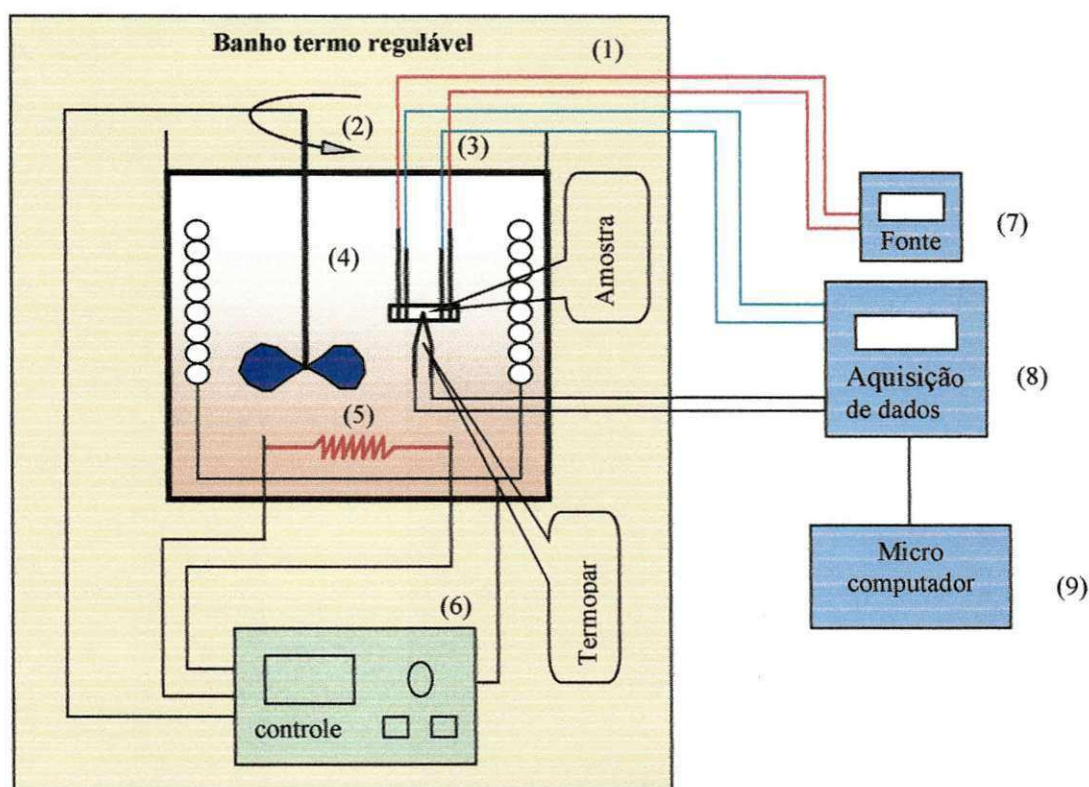


FIGURA 4.20 - Ilustração esquemática do sistema de medição da resistência elétrica em função da temperatura. (1) Banho termo regulável; (2) reservatório; (3) misturador; (4) serpentina; (5) resistência elétrica e (6) controle; (7) Fonte de corrente; (8) Sistema de aquisição de dados; (9) Microcomputador.

A Figura 4.21 apresenta uma foto da plataforma experimental ilustrada na Figura 4.18 que, conforme já mencionado, é composta de um banho termoregulável (1), uma fonte de alimentação CC (2), um sistema de aquisição de dados (3) e um microcomputador (4).

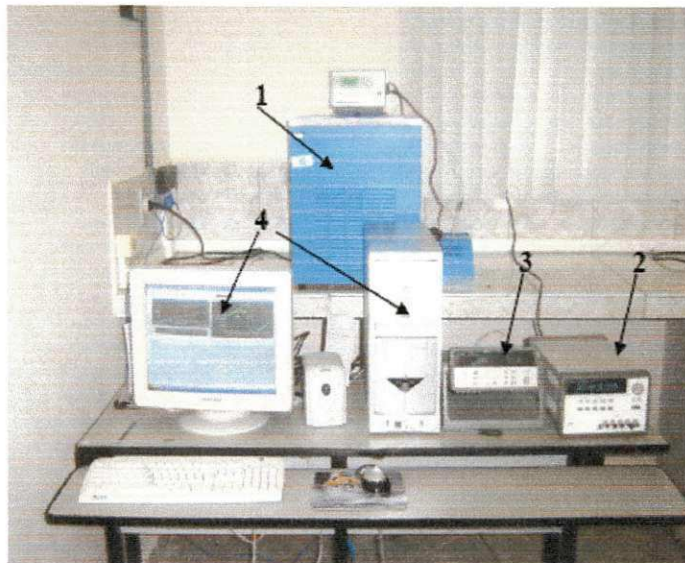


FIGURA 4.21 – Plataforma experimental de medição da resistência elétrica em função da temperatura em amostras de LMF.

No ensaio de resistência elétrica em função da temperatura utilizamos uma amostra de lâmina da LMF de validação. Neste ensaio utilizamos o método dos quatro fios em que pelos fios das extremidades fez-se passar corrente elétrica, e nos dois fios centrais mediu-se a queda de tensão da amostra. Na Figura 4.22 pode ser observado uma amostra de lâmina obtida de uma pastilha semelhante a da Figura 4.15(d).

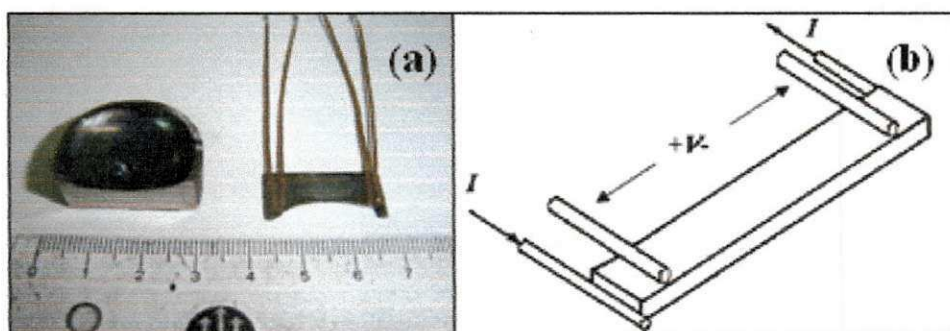


FIGURA 4.22 – Método dos quatro fios. (a) Lâmina obtida da pastilha injetada. (b) Esquematização do método dos quatro fios (I – corrente elétrica; $+V-$ - queda de tensão).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Preliminar das Amostras de Testes

A microestrutura da amostra de validação da liga Ni-Ti-Cu obtida pela técnica PSPP e utilizada nos ensaios de geração de força em modo de flexão três pontos (Modo B) é apresentada na Figura 5.1. Observa-se que os grãos são extremamente pequenos e a ausência de microestrutura martensítica. A microdureza média dessa LMF foi de $199,46 \pm 12,53$ HV.

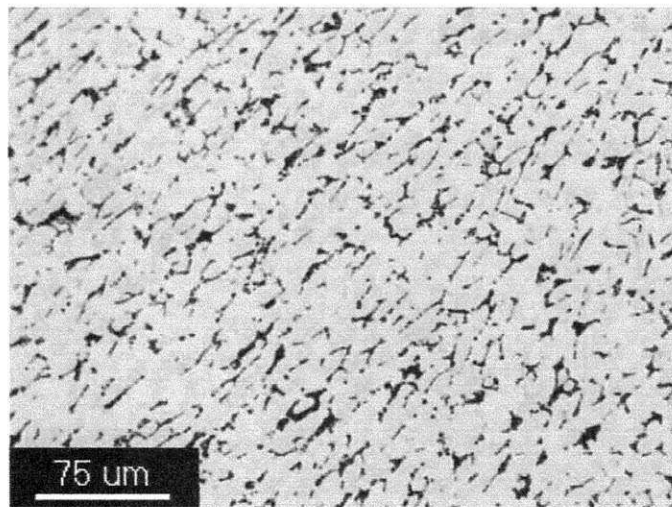


FIGURA 5.1 – Microestrutura da liga Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso).
Aumento: 200x

A curva de resistência elétrica em função da temperatura para a LMF Ni-Ti-Cu com as temperaturas de transformação obtidas pelo método das tangentes é apresentada na Figura 5.2. Verifica-se que as temperaturas de transformação, principalmente M_f , M_s e A_s , são ligeiramente inferiores a temperatura ambiente e que a histerese em temperatura é da ordem de 17°C ($\sim A_f - M_s$).

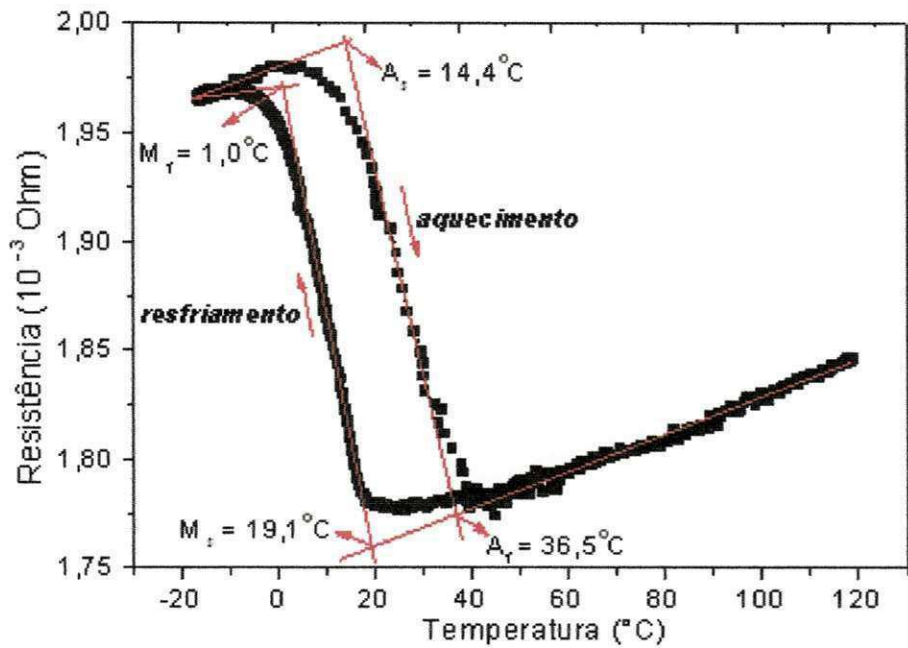


FIGURA 5.2 – Variação de resistência elétrica em função da temperatura para a liga Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso).

A taxa de resfriamento, entre 150 °C e 10 °C, foi de aproximadamente 2,1 °C/min, enquanto que para o aquecimento na mesma faixa de temperatura essa taxa foi da ordem de 5,3 °C/min para as duas amostras utilizadas.

A microestrutura da amostra de validação da liga Cu-Al-Ni é apresentada na Figura 5.3. Verifica-se a presença clara da estrutura granular contendo plaquetas de martensita típicas das LMF (OTSUKA & WAYMAN, 1998). A microdureza média obtida para essa amostra foi de $242,5 \pm 20,9$ HV.

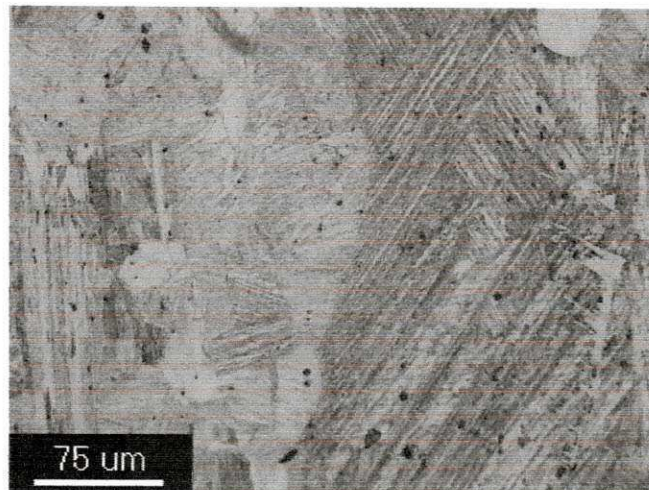


FIGURA 5.3 – Microestrutura da liga Cu-Al-Ni. Aumento: 200x

A curva de resistência elétrica em função da temperatura para a amostra Cu-Al-Ni com temperaturas de transformação obtidas pelo método das tangentes é apresentada na Figura 5.4 e revela o comportamento da transformação de fase.

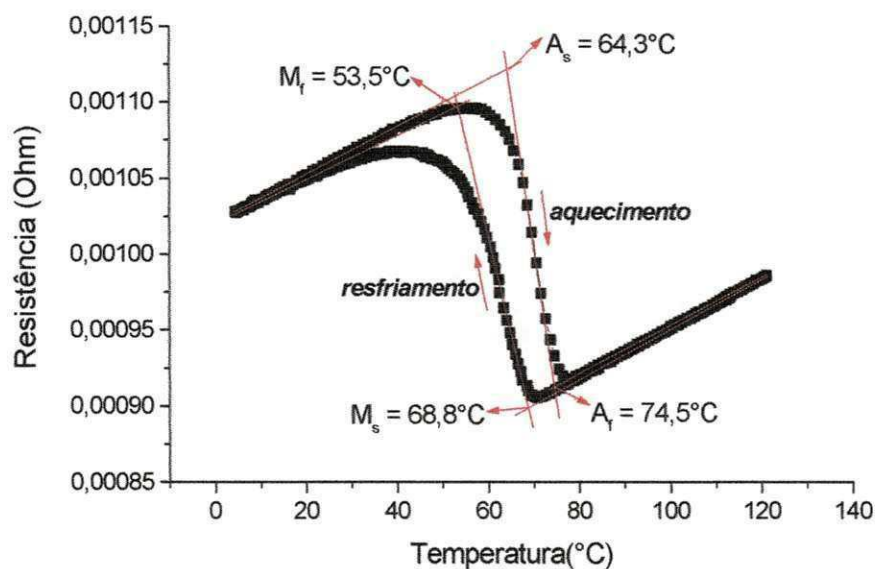


FIGURA 5.4 – Variação de resistência elétrica em função da temperatura para a liga Cu-14,0Al-4,0Ni (% em peso).

5.2 Validação da Máquina Multifuncional

Os resultados obtidos com a máquina operando nos dois modos propostos e com medidas de resistência elétrica acopladas são mostrados e discutidos.

5.2.1 Máquina Operando no Modo de Tração Sob Carga Constante (Modo A)

A Figura 5.5 apresenta a tela típica visualizada durante um ensaio com a máquina multifuncional da Figura 4.1 operando no modo de tração com a amostra Cu-Al-Ni. Conforme indica a Figura 5.5(a), a evolução de todos os parâmetros monitorados pode ser acompanhada em tempo real, de modo que o ensaio pode ser abortado instantaneamente caso alguma anomalia ocorra. Concomitantemente, é possível visualizar também a evolução das propriedades monitoradas em função do parâmetro temperatura, como mostra as Figuras 5.5(b) e 5.5(c).

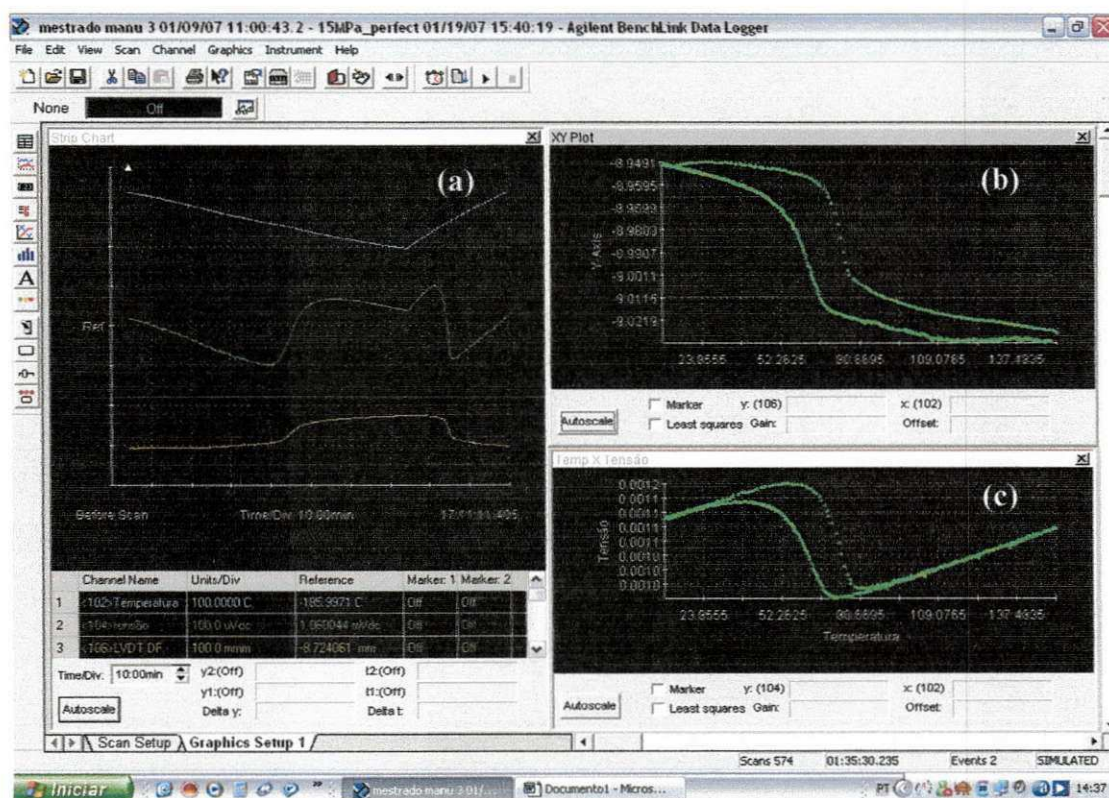


FIGURA 5.5 – Tela do computador da máquina multifuncional durante um ensaio em modo A. (a) Temperatura, resistência elétrica e deslocamento acompanhados em função do tempo. (b) Cruzamento deslocamento x temperatura. (c) Cruzamento resistência x temperatura.

Os dados obtidos do ensaio são transferidos para o programa Origin 5.0 e tratados para a obtenção de propriedades termomecânicas importantes para a caracterização das LMF, como as temperaturas de transformação, deformação de transformação, EMF e outras.

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram o comportamento da temperatura, deformação e resistência elétrica em função do tempo para a amostra Cu-Al-Ni submetida a uma carga constante correspondente a 25 MPa (~5 kg).

A Figura 5.6 revela que a taxa de resfriamento entre 150 °C e 10 °C é de aproximadamente 2,1 °C/min, enquanto que para o aquecimento na mesma faixa de temperatura essa taxa é da ordem de 5,3 °C/min, conforme já citado anteriormente. A expansão e contração da amostra é verificada respectivamente nas regiões de resfriamento e aquecimento da Figura 5.6. Importante lembrar que a amostra tracionada, na fase martensítica, é submetida ao aquecimento até que ocorra a mudança de fase para austenita ocasionando uma contração devido ao EMF. A expansão se dá no resfriamento devido ao retorno para a fase martensita.

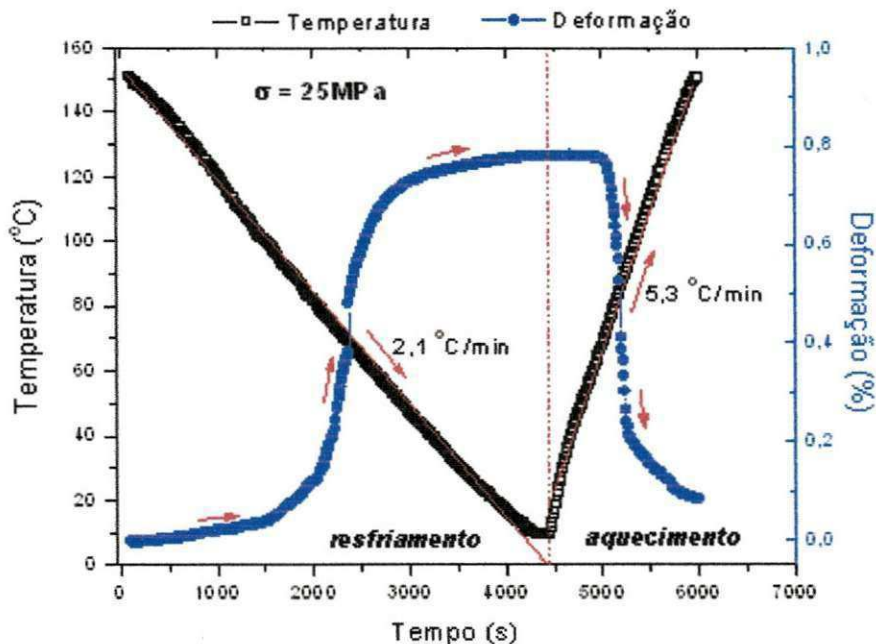


FIGURA 5.6 – Evolução da temperatura e da deformação durante um ensaio no modo de tração sob tensão constante de 25MPa.

A Figura 5.7 mostra o comportamento da resistência elétrica com o tempo. Como esperado, observa-se inicialmente uma diminuição linear da resistência durante o resfriamento em fase austenítica, seguida de um aumento importante associado à transformação de fase e a expansão da amostra. Uma vez a transformação concluída e a expansão estabilizada, a resistência volta a diminuir com o aumento da temperatura, agora na fase martensítica. Durante o aquecimento observa-se o fenômeno inverso devido à transformação reversa martensita – austenita.

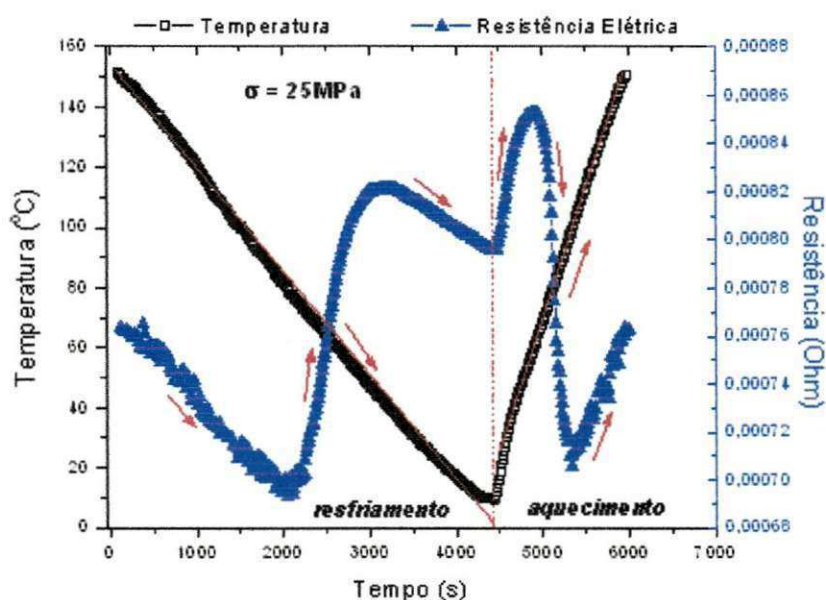


FIGURA 5.7 – Evolução da temperatura e da resistência elétrica durante um ensaio no modo de tração sob tensão constante de 25MPa.

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram o comportamento do cruzamento da deformação (ϵ) e da resistência elétrica (R) com a temperatura (T), eliminando-se o tempo como parâmetro. Esse cruzamento leva a obtenção das curvas de histerese típicas das LMF (OTSUKA & WAYMAN, 1998).

A Figura 5.8 mostra a expansão da amostra durante o resfriamento, correspondente a uma deformação de transformação (ϵ_{trans}) de 0,78 %. A reversão durante o aquecimento é traduzida por uma contração correspondente a um EMF de

0,70 %. Constata-se também uma deformação residual sob carga ($\epsilon_{trans} - EMF$) da ordem de 0,08 %.

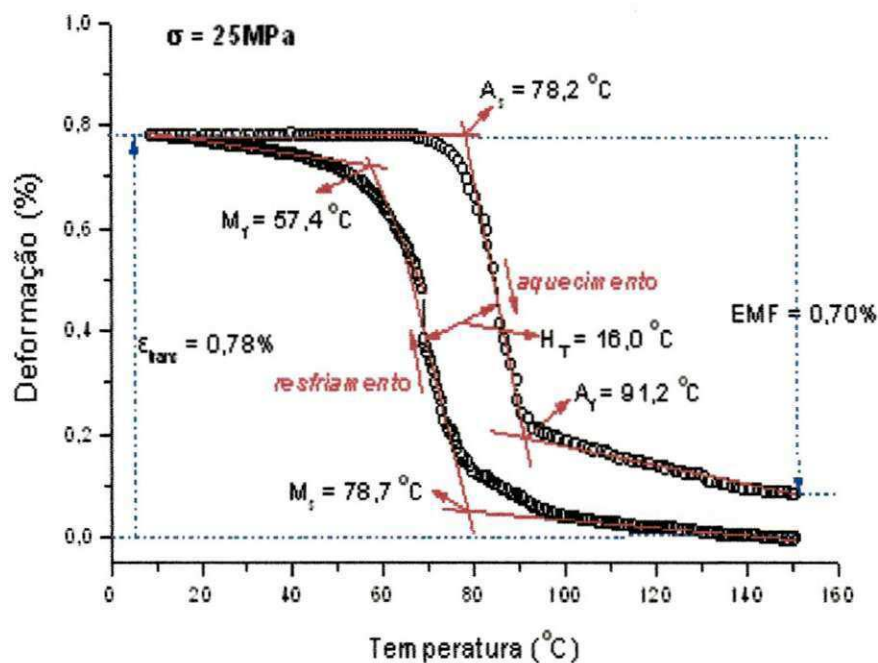


FIGURA 5.8 – Comportamento da histerese $\epsilon - T$ obtido com a máquina multifuncional operando no modo de tração sob tensão constante de 25MPa.

A Figura 5.9 mostra que o laço de histerese $R - T$ obtido é qualitativamente bastante semelhante aquele da amostra livre de carregamento mecânico (Figura 5.4). Verifica-se claramente que a aplicação do carregamento mecânico constante leva a um aumento das temperaturas de transformação de fase da LMF, conforme previsto pela lei de Clausius-Clayperon aplicada a esses materiais (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Observa-se também que a histerese em temperatura (H_T) praticamente duplica com a aplicação da carga de 25 MPa. Aumentos expressivos de H_T com a aplicação de carga constante durante ciclagem térmica foram também observados por DE ARAUJO *et al* (2001) em uma LMF Ti-Ni-Cu.

Uma comparação entre as Figuras 5.8 e 5.9 permite constatar que as temperaturas de transformação obtidas pelo método das tangentes a partir dos laços $\epsilon - T$

e $R - T$ são ligeiramente diferentes. A maior diferença, da ordem de $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, ocorre para a temperatura A_s . No aquecimento as temperaturas A_s e A_f são maiores quando determinadas a partir da deformação da amostra, indicando que existe uma inércia de resposta em comparação com uma medida mais microscópica como a resistência elétrica. O fenômeno inverso ocorre durante o resfriamento com as temperaturas M_s e M_f .

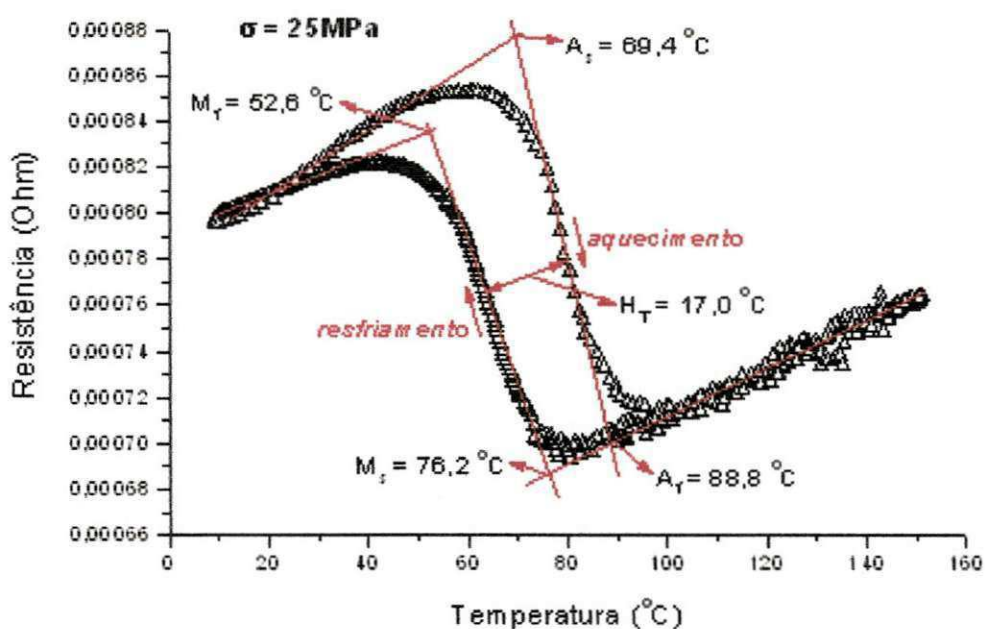


FIGURA 5.9 - Comportamento da histerese $R - T$ obtido com a máquina multifuncional operando no modo de tração sob tensão constante de 25MPa.

Os resultados obtidos para cargas diferentes, como 15 MPa, 35 MPa e 45 MPa, foram qualitativamente semelhantes aqueles das Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9. Constatou-se fundamentalmente o aumento das temperaturas de transformação e de ϵ_{trans} , e uma saturação do EMF em um valor máximo de aproximadamente 0,8 %. Esse comportamento é qualitativamente semelhante ao observado em outras LMF (DE ARAUJO *et al*, 2001).

5.2.2 - Máquina Operando no Modo de Geração de Força em Flexão 3 Pontos a Deflexão Constante (Modo B)

A Figura 5.10 mostra a tela típica visualizada durante um ensaio com a máquina multifuncional da Figura 4.1 operando no modo B com a amostra Ni-Ti-Cu. Semelhantemente ao ensaio em modo A e conforme indica a Figura 5.10(a), a evolução de todos os parâmetros monitorados pode ser acompanhada em tempo real. Ao mesmo tempo, é possível visualizar também a evolução de todas as propriedades monitoradas em função do parâmetro temperatura, como mostra as Figuras 5.10(b), 5.10(c) e 5.10(d).

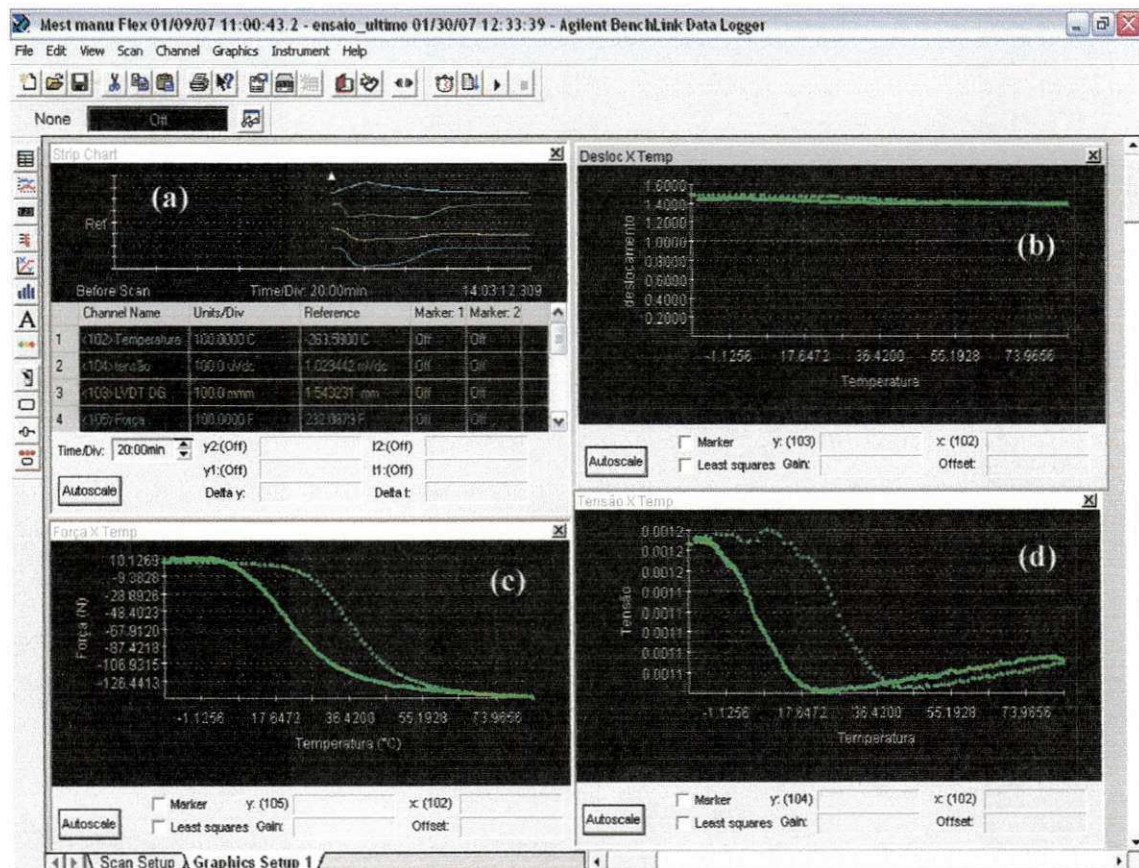


FIGURA 5.10 – Tela do computador da máquina multifuncional durante um ensaio em modo B. (a) Temperatura, deslocamento, força e resistência elétrica acompanhados em função do tempo. (b) Cruzamento deslocamento x temperatura. (c) Cruzamento força x temperatura. (d) Cruzamento resistência x temperatura.

Vale lembrar que neste ensaio uma flecha central (deflexão, y) é imposta, por intermédio de uma força, à amostra em modo de flexão três pontos a uma temperatura inferior a M_f (~ -10 °C) e mantida constante durante a operação de ciclagem térmica entre -10 e 100 °C, originando uma força de recuperação associada a tendência de EMF. O carregamento da amostra nesse modo de operação é ilustrado na Figura 5.11 e a ciclagem térmica se inicia com o aquecimento, contrariamente a operação no modo tração.

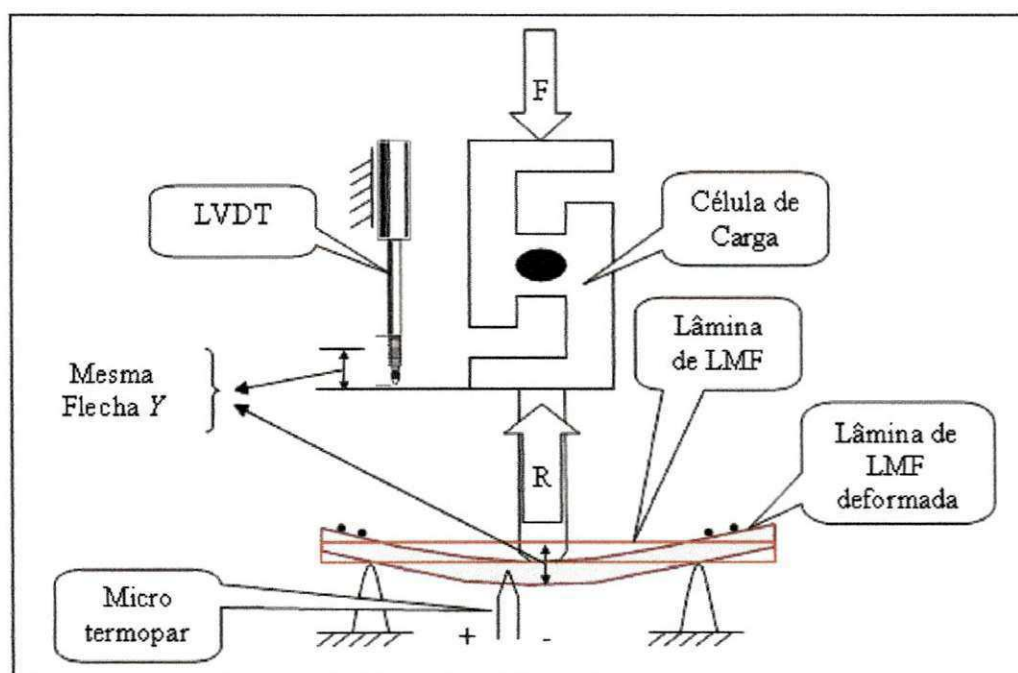


FIGURA 5.11 – Ilustração da amostra de lâmina deformada para ensaio de geração de força no modo de flexão.

A evolução dos parâmetros (temperatura, força, resistência elétrica,...) no tempo é qualitativamente semelhante aquele mostrado para a operação no modo A, com aproximadamente as mesmas taxas de aquecimento e resfriamento.

As Figuras 5.12 e 5.13 mostram o comportamento da temperatura, força gerada e resistência elétrica em função do tempo para a amostra de lâmina Ni-Ti-Cu submetida a uma flecha central constante correspondente a 1 mm.

Na Figura 5.12 verifica-se o crescimento rápido da força gerada durante o aquecimento até atingir um valor máximo de aproximadamente 150 N. O resfriamento faz com que toda força gerada seja completamente relaxada.

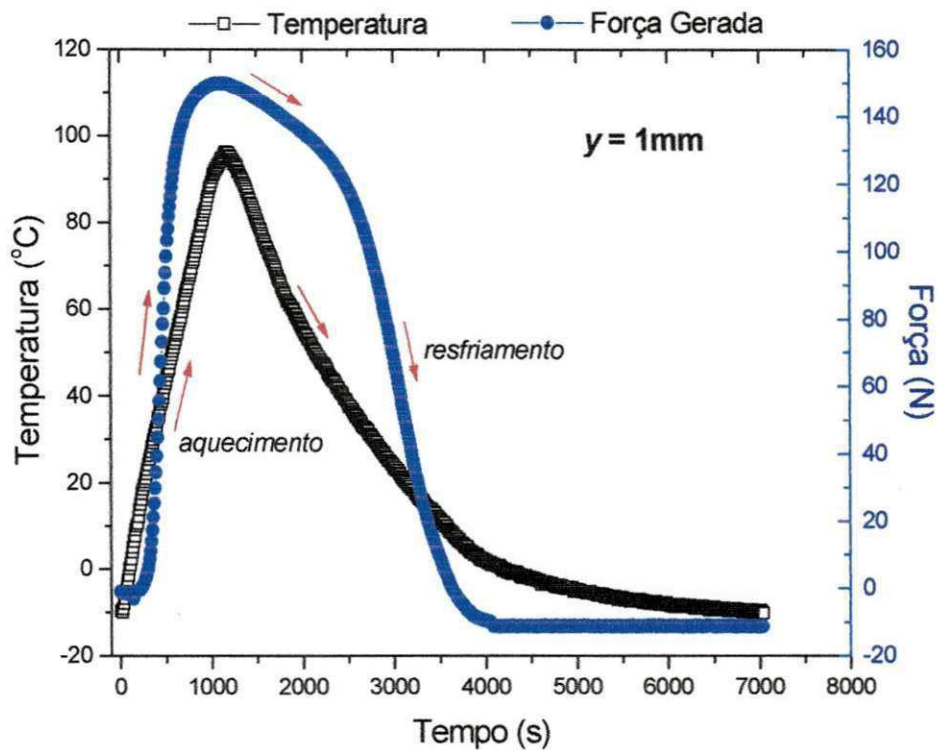


FIGURA 5.12 – Evolução da temperatura e da força gerada durante um ensaio no modo B.

A Figura 5.13 mostra inicialmente um pequeno aumento linear da resistência elétrica durante o aquecimento em fase martensítica, seguido de uma redução importante associado à transformação de fase ocorrendo no interior da amostra. Uma vez a transformação martensita – austenita concluída, a resistência volta a aumentar com a temperatura em fase austenítica. Durante o resfriamento observa-se o fenômeno inverso devido à transformação reversa austenita – martensita.

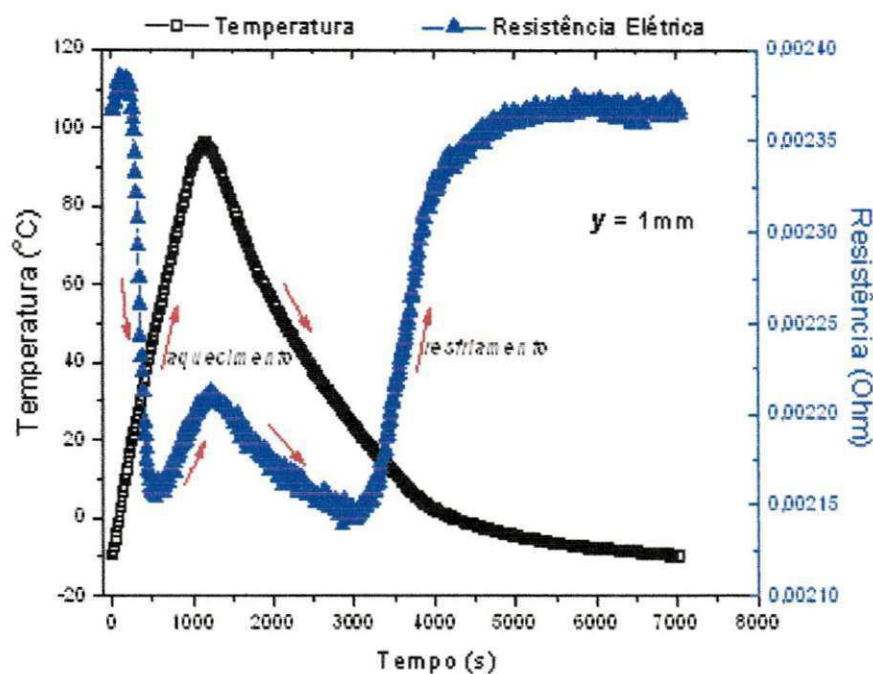


FIGURA 5.13 – Evolução da temperatura e da resistência elétrica durante um ensaio no modo B.

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram o comportamento do cruzamento da força gerada (F) e da resistência elétrica (R) com a temperatura (T), eliminando-se o tempo como parâmetro. Semelhantemente ao caso da operação no modo A, esse cruzamento leva a obtenção das curvas de histerese típicas das LMF (OTSUKA & WAYMAN, 1998).

A Figura 5.14 revela a geração de força reversível da amostra com uma flecha central imposta de 1 mm durante o aquecimento e resfriamento. A força máxima gerada no ensaio é de aproximadamente 150 N.

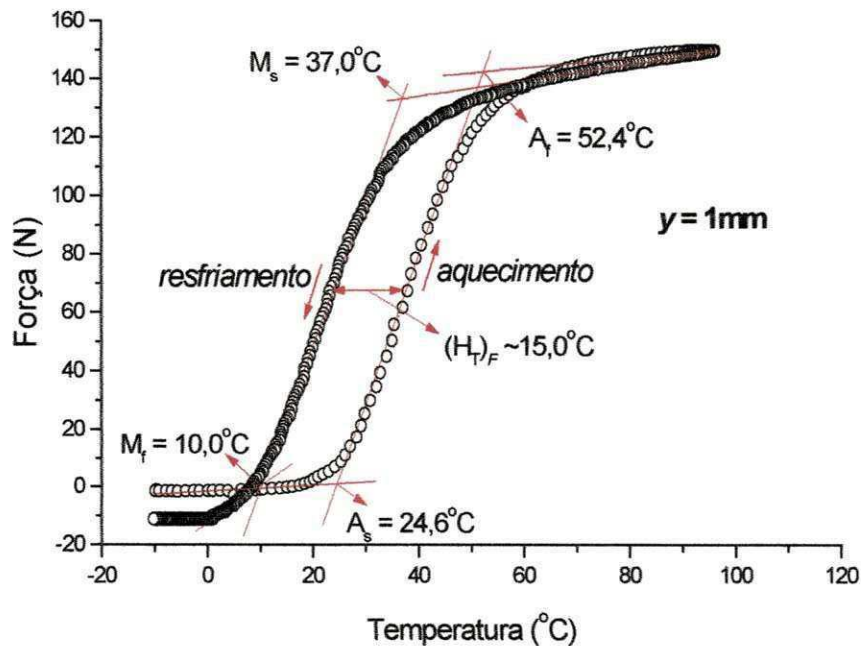


FIGURA 5.14 – Comportamento da histerese $F - T$ obtido com a máquina multifuncional operando no modo B.

A Figura 5.15 mostra que o laço de histerese $R - T$ obtido é bastante semelhante aquele da amostra Ni-Ti-Cu livre de carregamento mecânico (Figura 5.2), inclusive em termos dos valores de temperaturas de transformação e histerese, diferentemente dos resultados dos testes no modo A onde observou-se um aumento dessas temperaturas conforme previsto pela lei de Clausius-Clayperon aplicada as LMF (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Esse aumento das temperaturas de transformação também foi constatado no modo B através das curvas $F - T$ conforme revela a Figura 5.14.

A quase insensibilidade das medidas $R - T$ durante a geração de força em modo de flexão 3 pontos (comparando as figuras 5.15 e 5.2) pode ser atribuída ao fato de que a corrente elétrica de ensaio atua na superfície da amostra (PAUL TIPLER & GENE MOSCA, 2006) onde existem tensões trativas e compressivas de mesmo módulo devido ao momento fletor provocado pela força gerada (ver ilustração da Figura 5.11) (HIBBELER, 2004). Nossa hipótese é de que essas tensões se auto-anulam de modo que o comportamento interno da transformação de fase monitorado pelas medidas $R - T$

praticamente não é afetado. Vale ressaltar que não foi encontrado na literatura das LMF ensaios semelhantes a esses em modo B com resistência elétrica acoplada, indicando a originalidade dos resultados aqui apresentados.

Os resultados obtidos para flechas diferentes, como $y = 0,7$ mm, foram qualitativamente semelhantes aqueles das Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15.

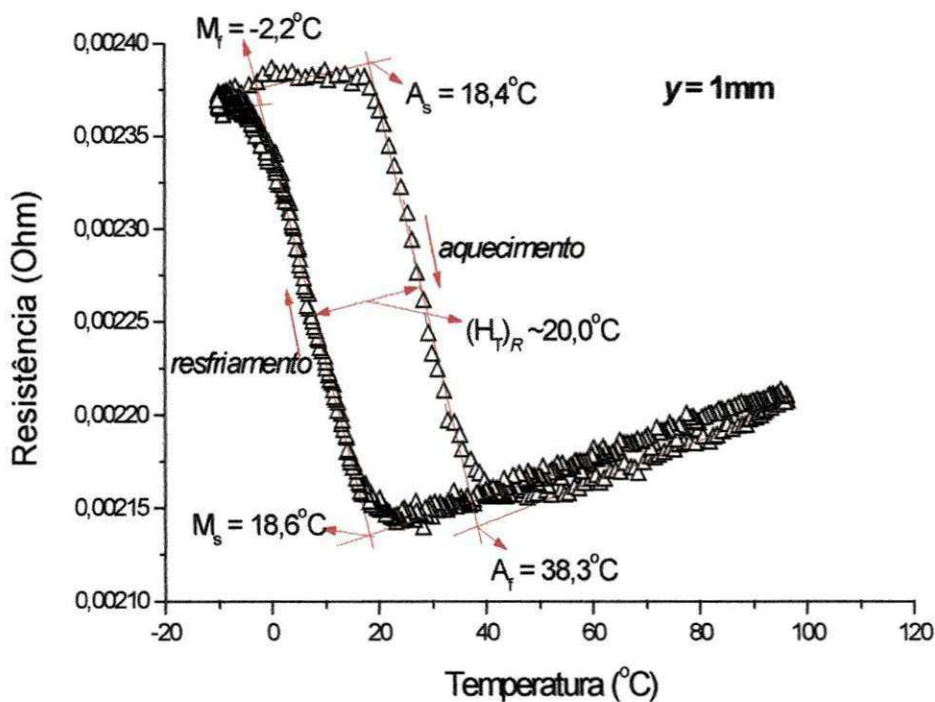


FIGURA 5.15 - Comportamento da histerese $R - T$ obtido com a máquina multifuncional operando no modo flexão.

A Figura 5.16 mostra o comportamento da flecha imposta (y) durante o ensaio em modo B, correspondente a geração de força da Figura 5.14. De acordo com o projeto da máquina, essa flecha deveria permanecer constante durante o ensaio, porém uma variação histerética máxima da ordem de 15 % foi observada durante a geração de força. Essa variação pode ser atribuída a folgas e/ou desalinhamento das peças situadas entre a amostra e o cilindro hidráulico da máquina.

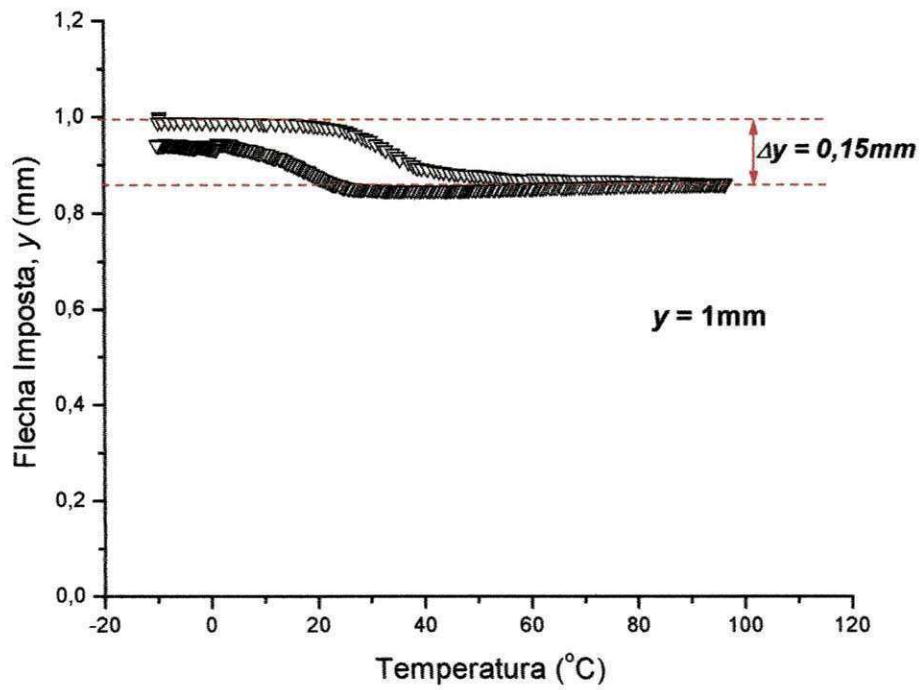


FIGURA 16 – Comportamento da flecha imposta a amostra durante um ensaio em modo B.

6 CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho podem ser resumidas nos seguintes tópicos:

- Um equipamento multifuncional para ensaio de LMF com dois modos de operação foi desenvolvido e testado com sucesso. Os dois modos são: A – ciclagem térmica com a amostra submetida à tração uniaxial constante (peso) e B – ciclagem térmica com a amostra submetida a uma flecha central constante em flexão três pontos;
- Um diferencial da máquina proposta é a possibilidade de acompanhar a transformação de fase das LMF através de medidas de resistência elétrica concomitantemente com a evolução das propriedades funcionais macroscópicas, como a deformação por efeito memória e a geração de força;
- Os comportamentos característicos de deformação, força gerada e resistência elétrica obtidos em função da temperatura apresentaram ótima qualidade, em acordo com a literatura, e permitiram a obtenção das temperaturas de transformação e histerese em temperatura das amostras testadas;
- A aplicação do carregamento na LMF industrial Cu-Al-Ni testada em modo A sob $\sigma = 25$ MPa levou a um aumento das temperaturas de transformação. A histerese, praticamente, duplicou com a aplicação da carga.
- A LMF industrial Cu-Al-Ni testada em modo A sob $\sigma = 25$ MPa apresentou EMF de aproximadamente 0,7 % com boa concordância das temperaturas de transformação obtidas a partir das curvas $\varepsilon - T$ e $R - T$, respectivamente;
- Os laços de histerese R – T com e sem carga aplicada obtidos para a LMF laboratorial Ni-Ti-Cu testada em modo B sob flecha central imposta de $y = 1$ mm são qualitativamente semelhantes, inclusive em termos dos valores de temperaturas de transformação e histerese. Esse fenômeno foi atribuído ao fato

de que a corrente elétrica atua na superfície da amostra onde existem tensões trativas e compressivas de mesmo módulo. Estas se auto-anulam de modo que o comportamento interno da transformação de fase, praticamente não é afetado.

- A LMF laboratorial Ni-Ti-Cu testada em modo B sob flecha central imposta de $y = 1$ mm apresentou uma geração de força da ordem de $F = 150$ N, mas não houve concordância das temperaturas de transformação obtidas a partir das curvas $F - T$ e $R - T$, respectivamente. A discrepância foi atribuída à variação da tensão de flexão com o aumento da temperatura durante o ensaio e ao fato da corrente elétrica circular na superfície da amostra onde atuam tensões de tração e compressão.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos é possível sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- Adaptação da máquina desenvolvida para a realização de ensaios de fadiga do EMF em fios finos utilizando aquecimento por efeito Joule;
- Adicionar novos modos de operação a máquina multifuncional, como a ciclagem térmica sob carga constante e deflexão imposta constante em flexão simplesmente engastada;
- Estudo do efeito superelástico de ligas Ni-Ti incluindo medidas de resistência elétrica.

8 REFERÊNCIAS

AIROLDI, G.; RANUCCI, T.; RIVA, G.; SCIACCA, A. J. Phys.: Condens. Matter, v. 7, p. 3709-3720, 1995.

ARAÚJO FILHO, O. C. **Obtenção e Caracterização da Liga Quaternária β -CuZnAlNi com Efeito Memória de Forma**. 2000. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

AYDOGDU, Y.; AYDOGDU, A.; ADIGUZEL, O. Self-accommodating martensite plate variants in shape memory Cu-Al-Ni alloys. **Materials Processing Technology**, v. 123, p. 498-500, 2002.

BRAILOVSKI, V.; TROCHU, F.; DAIGNEAULT, G. Temporal characteristics of memory linear actuator and their applications to circuit breaks. **Materials & Design**, v. 17, p. 151-158, 1996.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1990, 576 p.

DAGDELEN, F.; GOKHAN, T.; AYDOGDU, A.; AYDOGDU, Y.; ADIGUZEL, O. Effects of thermal treatments on transformation behavior in shape memory Cu-Al-Ni alloys, **Materials Letters**, v. 57, p. 1079-1085, 2003.

DATTA, S.; BHUNYA, A.; BANERJEE, M.K. Two way shape memory loss in Cu-Zn-Al alloy, **Materials Science Engineering**, v. 300, p. 291-298, 2001.

DE ARAÚJO, C. J. ; MORIN, M.; GUÉNIN, F. Fatigue behavior of Ti-Ni-Cu thin wires SME. **Journal de Physique - IV**, v. 07, n. 11, p. 501-506, 1997.

DE ARAÚJO, C. J. ; GONZALEZ, C. H. ; MORIN, M.; GUÉNIN. Influence of the mechanical loading history on the stress assisted two way memory effect in a Ti-Ni-Cu alloy. **Materials Research**, v. 4, n. 3, p. 181-188, 2001.

DE ARAUJO, C. J.; GOMES, A. A. C.; SILVA, N. J.; SILVA, M. M.; SILVA, J. A.; SANTOS, M. A.; GONZÁLEZ, C. H.. **Ligas com Memória de Forma Obtidas pelo Processo Plasma Skull**. 6º Congresso Binacional de Metalurgia y Materiales, Santiago – Chile, 2006, 1 – 6.

DUERIG, T; PELTON, A; STOCKEL, D. An overview of nitinol medical applications. **Materials Science Engineering**, v. 273–275, p.149–160, 1999.

FUNAKUBO, H. Shape memory Alloys, Gordon and Breach Publishers, London, 273 p, 1987.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. Ed. 5, 2004, 688p.

JD HANRRISON – **Measurable Changes Concomitant With The Shape Memory Effect Transformation**. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys(UK), 1990.

LOJEN, G.; ANZEL, I.; KNEISSL, A.; KRIZMAN, A.; UNTERWEGER, E.; KOSEC B.; BIZJAM, K. Microstructure of rapidly solidified Cu-Al-Ni shape memory alloy ribbons. **Journal of Material Processing Technology**, v.162-163, p.220-229, 2005.

LOPÉZ CUÉLLAR, ENRIQUE. Fatigue par cyclage thermique sous contrainte de fils à mémoire de forme Ti-Ni-Cu après différents traitements thermomécaniques. Thèse d'Etat, INSA de Lyon, Lyon I, 2002, 180p.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. **Shape Memory Materials**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.

PACHECO, P. M. C. L., SAVI, M. A; LA CAVA, C. A. P. L.; SILVA, E. P.; MACHADO, L. G. **Modelagem de um Dispositivo de Pré-Carga com Memória de Forma para Juntas Flangeadas.** Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CD-ROM), Natal – RN, p. 1- 8, 2000.

REIS, R. P. B., DE ARAÚJO, C. J., SILVA, L. A. R., QUEIROGA S. L. M., **Desenvolvimento de Um Sistema de Medição da Variação de Resistência Elétrica em Função da Temperatura: Aplicação a Caracterização de Ligas com Memória de Forma.** IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2006), Recife – PE, Brasil, 2006, 1-10.

ROGERS, C. A.; LIANG, C. One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape memory Materials, *J. Intelligent Mat. Sys and Struct.*, n. 1. pp. 207-234.

SILVA, L.A.R.; **Desenvolvimento de um sistema de medição da variação de resistência elétrica em função da temperatura: Aplicação à caracterização de ligas com memória de forma.** Campina Grande: UFCG/Departamento de Engenharia Mecânica, 2005. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

SMART MATERIALS. **Shape memory alloys.** Disponível em: <http://www.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/sma.html>. Acesso em 19 jan. 2006.

TIPLER, P. A; MOSCA, G. **Física. Eletricidade, Magnetismo e Ótica**, vol.2, 5 ed., 2006, 596p.

VAN HUMBEECK, J. Non-medical applications of shape memory alloys. **Materials Science and Engineering** v. 273–275, p.134–148, 1999.

ZENGIN, R.; OZGEN, S.; CEYLAN, M. Oxidation behaviour and kinetic properties of shape memory CuAl_xNi_4 ($x = 13.0$ and 13.5) alloys. **Thermochimica Acta**, v.414, p.79–84, 2004.

ZHANG, XD; ROGERS, C.A.; LIANG,C. Modelling of The Two-Way Shape memory Effect. ASME, Smart Structures and. Materials, AD.v.24, pp.79-90, 1997.