

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

**ESTUDO DE UMA LIGA Cu-Al-Ni COM MEMÓRIA DE FORMA
VISANDO APLICAÇÕES EM SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA
SOBRECARGAS ELÉTRICAS**

SANDRO LINO MOREIRA DE QUEIROGA

CAMPINA GRANDE
2006

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

**ESTUDO DE UMA LIGA Cu-Al-Ni COM MEMÓRIA DE FORMA
VISANDO APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO
CONTRA SOBRECARGAS ELÉTRICAS**

SANDRO LINO MOREIRA DE QUEIROGA

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
2006



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

Q3e Queiroga, Sandro Lino Moreira de
2006 Estudo de uma liga Cu-Al-Ni com memória de forma visando aplicações em sistemas de proteção contra sobrecargas elétricas / Sandro Lino Moreira de Queiroga. — Campina Grande, 2006.
77f. il.

Referências.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientador: Carlos José de Araújo.

1— Transformações de Fases 2— Materiais com Memória de Forma 3- Ligas Cu-Al-Ni com Memória de Forma I— Título

CDU 620.181

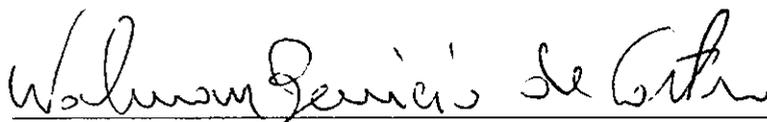
**ESTUDO DE UMA LIGA Cu-Al-Ni COM MEMÓRIA DE
FORMA VISANDO APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE
PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGAS ELÉTRICAS**

Sandro Lino Moreira de Queiroga

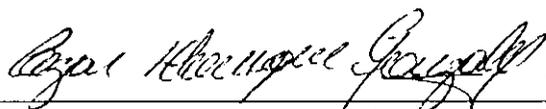
Dissertação defendida e aprovada em 20/03/2006, pela banca
examinadora constituída dos seguintes professores.



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



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



Prof. Dr. Cezar Henrique Gonzalez
Examinador Externo
DEMEC - UFPE

Campina Grande – PB
Março de 2006

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

A minha família;

Ao Prof. Carlos José de Araújo, pela orientação;

Aos alunos de iniciação científica pelo auxílio nas atividades experimentais;

Ao Prof. Celso pelo auxílio na resolução da modelagem matemática;

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

Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa na qual este trabalho esteve inserido.

MENSAGEM

Loteria de Babilônia

Vai e grita ao mundo que você está certo
Você aprendeu tudo enquanto estava mudo
Agora é necessário gritar e cantar Rock
E demonstrar o teorema da vida
E os macetes do xadrez
Você tem as respostas das perguntas
Resolveu as equações que não sabia
E já não tem mais nada o que fazer a não ser
Verdades e verdades
Mais verdades e verdades para me dizer
A declarar
Tudo o que tinha que ser chorado já foi chorado
Você já cumpriu os doze trabalhos
Reescreveu livros dos séculos passados
Assinou duplicatas, inventou baralhos
Passeou de dia e dormiu de noite
Consertou vitrolas para ouvir música
Sabe trechos da Bíblia de cor
Sabe receitas mágicas de amor
Conhece em Marte um amigo antigo lavrador
Que te ensinou a ter do bom e do melhor
Do melhor
Mas o que você não sabe por inteiro
É como ganhar dinheiro
Mas isso é fácil e você não vai parar
Você não tem perguntas pra fazer
Porque só tem verdades pra dizer
Pra declarar.

Raul Santos Seixas.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A – Austenita;
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- A_f - Temperatura de término da transformação martensita - austenita;
- A_s - Temperatura de início da transformação martensita - austenita;
- A_l - Área lateral da lâmina;
- b - Base das lâminas;
- C_p - Calor específico a pressão constante;
- d - Distância entre apoios;
- DSC - Calorimetria diferencial de varredura;
- DTA - Análise térmica diferencial;
- e - Espessura das lâminas;
- E_c - Energia trocada por convecção natural;
- E_g - Energia gerada;
- EMF - Efeito Memória de Forma;
- EMFR - Efeito memória de forma reversível;
- EMFS - Efeito memória de forma simples ou de único sentido;
- Fase X - Fase rica em titânio;
- G_a - Energia química livre da fase austenítica ;
- G_m - Energia química livre da fase martensita;
- h - Coeficiente de convecção;
- 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;
- K - Constante que depende do condutor;
- L - Comprimento das lâminas;

L1 - Liga teórica 1;
L2 - Liga teórica 2;
L3 - Liga teórica 3;
LaMMEA- Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas;
LL - Lingote produzido no LaMMEA;
LL1 - Lâmina 1 do lingote produzido no LaMMEA;
LL2 - Lâmina 2 do lingote produzido no LaMMEA;
LMF - Ligas com Memórias de Forma;
LT - Lâmina do lingote fabricado pela Trefimetaux;
M – Martensita;
m - Massa da lâmina;
 M_f - Temperatura de término da transformação austenita – martensita;
 M_s - Temperatura de início da transformação austenita - martensita;
 $(M_s)_\sigma$ - Temperatura M_s sob carga;
N: Carga geranda;
R - Resistência elétrica;
 r_o - Resistividade elétrica;
S - Seção do condutor em mm^2 ;
T - Temperatura na lâmina;
t - tempo;
TMA - Análise termomecânica;
 T_∞ - Temperatura ambiente;
V - Diferença de potencial;
y - Flecha devido a deformação da lâmina;
 $\frac{dT}{dt}$ - Taxa variação da temperatura;
 $\frac{\Delta U}{\Delta t}$ - Variação de energia interna na lâmina;
 $\Delta G^{A \rightarrow M}$ - Variação da energia livre de Gibbs da fase austenítica para martensítica;
% wt - Percentual em peso;
 β' - Fase martensítica com estrutura ortorrômbica;
 γ' - Fase martensítica com estrutura hexagonal.

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Propriedades da liga Cu-Al-Ni com EMF	19
TABELA 4.1	Composição da liga selecionada e temperaturas previstas	27
TABELA 5.1	Temperaturas de transformação da liga LL e LT	40
TABELA 5.2	Dimensões das lâminas	41

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Visão microscópica do EMF	5
FIGURA 3.2	Visão macroscópica esquemática do EMF	5
FIGURA 3.3	Micrografia ótica mostrando uma microestrutura martensítica típica.	7
FIGURA 3.4	Curva típica de transformação de uma LMF	7
FIGURA 3.5	Esquemática do equilíbrio entre as fases austenita e martensita ...	10
FIGURA 3.6	Ilustração esquemática da mudança de forma por EMFR	11
FIGURA 3.7	Comportamento termomecânico das LMF. T1: carregamento em estado austenítico, T2: carregamento em estado martensítico	12
FIGURA 3.8	Diagrama de fase da liga Cu-Al-Ni, para 3% em peso de Ni	15
FIGURA 3.9	Dependência da temperatura M_s em função do teor de níquel e alumínio	16
FIGURA 3.10	MEV mostrando a fase X e fase γ da liga Cu-Al-Ni-Ti	20
FIGURA 3.11	Aplicação na odontologia do efeito superelástico	21
FIGURA 3.12	Luva de LMF para conexão de tubos	22
FIGURA 3.13	Aplicação de um atuador térmico do tipo mola com memória de forma	23
FIGURA 3.14	Exemplos de elementos ativos em ligas de cobre com EMF reagindo à passagem de corrente elétrica ($i > 0$)	23
FIGURA 3.15	Desenho em corte de um relé de sobrecarga bimetálico	25
FIGURA 4.1	Forno de indução e acessórios	28
FIGURA 4.2	Matéria prima utilizada para fusão	29
FIGURA 4.3	Lâmina usinada	29
FIGURA 4.4	Esquema elétrico de ligação do método dos quatro fios	31
FIGURA 4.5	Bancada de teste para ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura de amostras de LMF	31

FIGURA 4.6	Plataforma experimental para caracterização termo-mecânica em flexão três pontos	34
FIGURA 4.7	Montagem da lâmina – parafuso – célula de carga na plataforma experimental	35
FIGURA 4.8	Curva da carga em função da tensão de saída da célula de carga	36
FIGURA 4.9	Microscópio ótico da marca Olympus, modelo BX 51M	37
FIGURA 4.10	Microdurômetro da marca Future – Tech, modelo FM – 700	37
FIGURA 5.1	Ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura da liga LL	39
FIGURA 5.2	Ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura da liga LT	39
FIGURA 5.3	Dimensão das lâminas e forma de apoio	41
FIGURA 5.4	Curva da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo. 6º ciclo para a lâmina LT	42
FIGURA 5.5	Curva da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo. 10º ciclo para a lâmina LL1	42
FIGURA 5.6	Curva da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo do 12º ciclo para a lâmina LL2	43
FIGURA 5.7	Curva do 6º ensaio de geração de força da lâmina LT	44
FIGURA 5.8	Curva do 7º ensaio de geração de força da lâmina LT	45
FIGURA 5.9	Temperatura de transformação A_s em função do número de ciclos, lâmina LT	45
FIGURA 5.10	Ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura para lâmina LT após realização dos ciclos de geração de carga.....	46
FIGURA 5.11	Curva do 10º ensaio de geração de força da lâmina LL1	47
FIGURA 5.12	Curva do 13º ensaio de geração de força da lâmina LL1	47
FIGURA 5.13	Temperatura de transformação A_s em função do número de ciclos, lâmina LL1	48
FIGURA 5.14	Ensaio de variação de resistência em função da temperatura sob carga, lâmina LL1	48
FIGURA 5.15	Valores das temperaturas de transformação da lâmina LL1, realizados com carga e sem carga	49
FIGURA 5.16	Curva do 3º do ensaio de geração de força da lâmina LL2	50

FIGURA 5.17	Curva do 12° do ensaio de geração de força da lâmina LL2	50
FIGURA 5.18	Temperatura de transformação A_s em função do número de ciclos, lâmina LL2	51
FIGURA 5.19	Microestrutura martensita da lâmina LT. Aumento 50 X.....	52
FIGURA 5.20	Microestrutura martensita da lâmina LL1. Aumento 50 X.....	53
FIGURA 5.21	Impressões ensaio de microdureza, aumento 100 X lâmina LF	54
FIGURA 6.1	Desenho esquemático com as dimensões da lâmina e o balanço de energia	55
FIGURA 6.2	Varição da temperatura em função do tempo para diversas geometrias e corrente de 20A	59
FIGURA 6.3	Faixa de temperatura de atuação da lâmina com carga e sem carga ...	60
FIGURA 6.4	Curva de disparo de um relé de sobrecarga bimetálico	61
FIGURA 6.5	Perfil de temperatura na lâmina para o aquecimento e resfriamento ..	62
FIGURA 6.6	Perfil de temperatura na lâmina para o aquecimento e resfriamento com regime permanente	63
FIGURA 6.7	Simulação para determinar a corrente elétrica de ativação da lâmina LT para obter mesmo perfil de temperatura realizado com soprador térmico, em regime permanente	64
FIGURA 6.8	Curva de aquecimento experimental	65
FIGURA 6.9	Perfil de temperatura para corrente de 158 A e $h = 20 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Fórmula empírica 1 para estimar a temperatura M_s	15
Equação 2	Fórmula empírica 2 para estimar a temperatura M_s	16
Equação 3	Integral de Joule necessária para aquecer o condutor desde a temperatura máxima para serviço contínuo até a temperatura limite de curto-circuito.....	24
Equação 4	Equação da carga em função da tensão para célula de carga	36
Equação 5	Balço de energia na lâmina	56
Equação 6	Energia gerada devido a passagem da corrente elétrica	56
Equação 7	Energia trocada por convecção natural	56
Equação 8	Varição de energia interna na lâmina	56
Equação 9	Solução geral da equação diferencial linear	57
Equação 10	Taxa de variação da temperatura no aquecimento	57
Equação 11	Taxa de variação da temperatura no resfriamento	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivo Específico	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Descoberta do Efeito Memória de Forma	4
3.2 Efeito Memória de Forma	4
3.3 Transformação Martensítica	6
3.4 Transformação Martensítica Termoelástica	8
3.5 Outros Comportamentos Termomecânicos das LMF	10
3.5.1 Efeito Memória de Forma Reversível (EMFR)	10
3.5.2 Efeito Superelástico	11
3.6 Degradação do Efeito de Memória de Forma Reversível	13
3.7 Ligas Comerciais com EMF	13
3.7.1 Ligas Cu-Al-Ni com EMF	14
3.7.2 Efeito das Ciclagens Térmicas nas Ligas CuAlNi com EMF	18
3.7.3 Propriedade Mecânicas e Físicas da Liga Cu-Al-Ni	19
3.7.4 Introdução de Elementos de Liga	19
3.8 Aplicação das LMF	20
3.8.1 Aplicação em Aparelhos Ortodônticos	21
3.8.2 Aplicação em Conectores	21
3.8.3 Aplicação em Atuadores Térmicos	22

3.8.4 Aplicação no Setor Elétrico	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 Seleção da Liga	27
4.2 Fabricação da Liga	27
4.3 Caracterização da Liga	30
4.3.1 Resistência Elétrica em Função da Temperatura	30
4.3.2 Geração de Força em Modo de Flexão Três Pontos	33
4.3.3 Microscopia Ótica	36
4.3.4 Microdureza	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1 Resistência Elétrica em Função da Temperatura	38
5.2 Geração de Força em Modo de Flexão Três Pontos	40
5.3 Microscopia Ótica	52
5.4 Ensaios de Microdureza	53
6 ANÁLISE SIMPLIFICADA SOBRE A POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO DA LIGA Cu–Al–Ni PARA PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGAS ELÉTRICAS	55
6.1 Modelagem Matemática	55
6.2 Simulação Numérica	58
6.3 Proteção Contra Sobrecargas Elétricas	60
6.4 Perfil de Temperatura na Lâmina	61
7 CONCLUSÕES	66
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
9 REFERÊNCIAS	68
10 ANEXOS	72

RESUMO

Este trabalho trata do estudo de uma liga Cu-Al-Ni com memória de forma visando possíveis aplicações em sistema de proteção contra sobrecargas elétricas. Foi estudada a composição em peso Cu-13,5Al-4Ni. A matéria prima usada estava na forma de barras maciças dos elementos comercialmente puros, a liga foi fundida em forno de indução ao ar com uso de fluxo protetor e vazada em lingoteira de aço. Foram extraídas lâminas do lingote para caracterização por ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura, com o objetivo de determinar a existência da transformação de fase que origina o efeito memória de forma. Outras técnicas de caracterização, como a microscopia ótica para visualização de fase martensítica, microdureza e ensaio de geração de carga também foram utilizadas. Os resultados obtidos com a liga de origem laboratorial foram comparados com aqueles obtidos com a mesma liga fornecida pela empresa francesa Société Trefimétaux. As temperaturas de transformações de ambas as ligas foram similares, a liga produzida no LaMMEA teve menor geração de carga, microdureza média de HV 250 próxima a da liga Trefimétaux, e ambas apresentaram granulometria grosseira com tamanho de grão médio em torno de 600 μm . A liga em estudo tem elevado potencial para aplicação no setor elétrico, pois em simulações teóricas simplificadas, verificou-se que o tempo de atuação em proteção contra sobrecargas pode ser menor que o de sistemas de proteção disponíveis no mercado.

ABSTRACT

This work is dedicated to the study of a Cu-Al-Ni shape memory alloy (SMA) aiming applications for protection against electrical overloads. It was studied the nominal chemical composition Cu-13,5Al-4,0Ni (wt%). The raw materials used to obtain the Cu-Al-Ni ingots were massive bars of the commercially pure elements melted in an air induction furnace. Samples cutted directly from the obtained ingots were betatized at 900°C during 15 minutes followed by quenching in water at room temperature (~27°C). The sheet samples were characterized by electrical resistance as a function of temperature to determine the phase transformation at the origin of the shape memory phenomena. Others techniques like optical microscopy, micro hardness and force recovery as a function of temperature were employed to complement the characterization. The results obtained with the laboratory Cu-Al-Ni SMA were compared with the ones from a same alloy supplied by Société Trefimétaux (France). The transformation temperatures ($M_s=128^\circ\text{C}$), micro hardness in the martensitic phase (HV 250) and average grain size (~600 μm) were similar for both alloys, however the laboratory alloy has demonstrated a minor intensity of force recovery (~125N) during heating. The studied alloy has a good potential for electrical applications because theoretical simulations have demonstrated that the Cu-Al-Ni SMA sheets can respond more rapidly to the electrical current than the classical protection systems available in the market.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais inteligentes são inovações que tem provocado uma revolução no mundo da engenharia nas últimas décadas no que se refere à concepção de projetos. Materiais inteligentes são aqueles que além de ter sua função estrutural, possuem função de sensor e/ou atuador. Dentre estes materiais encontram-se as cerâmicas piezo-elétricas, os polímeros eletro-ativos, os fluidos eletro e magneto-reológicos, e as ligas com memória de forma (LMF) (SRINIVASAN, MCFARLAND, 2001).

O fenômeno conhecido por efeito memória de forma (EMF) é a capacidade que algumas ligas metálicas possuem de recuperarem uma deformação pseudoplástica através de um aquecimento acima de uma determinada temperatura crítica. Este fenômeno está associado a uma transformação de fase do tipo martensítica reversível. As LMF são materiais funcionais e para sua aplicação é necessário o projeto do material em si, que é realizado fazendo-se variar a composição química e os tratamentos termomecânicos para obter as temperaturas de transformação desejadas. Estas ligas são mais importantes pelo que fazem (uma ação sensor ou atuador) do que propriamente pelo que são (um material) (ARAÚJO FILHO, 2000).

Algumas ligas clássicas são propensas a desenvolver essa capacidade de memória de forma, a exemplo do próprio latão (Cu-Zn), mas a temperatura de transformação é muito baixa e torna inviável sua aplicação. Entre as ligas mais utilizadas estão as de níquel e titânio (Ni-Ti) e as ligas ternárias a base de cobre (Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni). Esses materiais ativos, sendo sensíveis a uma variação de temperatura, tornam-se naturalmente interessantes para o desenvolvimento de aplicações no setor elétrico onde o aquecimento pode ser provocado pela passagem de corrente elétrica que pode originar uma mudança espontânea de forma e/ou geração de esforço mecânico.

Os relés bimetálico ou eletrônico são sistemas disponíveis no mercado para proteção contra sobrecarga elétrica e usado em larga escala na proteção de motores elétricos. O relé não faz a interrupção da corrente elétrica, mas envia sinal de comando para um dispositivo de manobra que faz a interrupção (este dispositivo é um contactor). Os relés bimetálicos possuem lâminas de dois materiais distintos soldadas, com

coeficientes de dilatação diferentes. Quando a lâmina é aquecida por efeito Joule sofre uma deflexão acionando um mecanismo de disparo que atuará sobre os contatos auxiliares do contactor. Estas lâminas podem vir a ser produzidas a partir de uma liga com efeito memória de forma, em substituição ao material bimetálico, melhorando assim o tempo de resposta.

Este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental visando a aplicação de uma liga da família Cu-Al-Ni com EMF no setor elétrico, para proteção contra sobrecargas elétricas. A liga estudada tem composição nominal em peso de 82,5Cu-13,5Al-4Ni com boa faixa de temperatura de transformação para ativação por corrente elétrica. Esta liga foi fundida em um forno de indução ao ar, homogeneizada a 900 °C por 24h e caracterizada por ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura, ensaio de geração de carga, microscopia ótica e microdureza e seus resultados comparados com os de uma liga fabricada pela empresa Trefimetaux (França).

Uma modelagem matemática simplificada, seguida de simulações numéricas foi desenvolvida para demonstrar seu desempenho em termos de atuação por corrente elétrica.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo geral realizar a obtenção, via fusão por indução ao ar, assim como proceder a caracterização física, microestrutural e eletromecânica de uma liga do sistema Cu-Al-Ni passível de apresentar o fenômeno de memória de forma de reconhecido potencial para aplicação no setor elétrico.

2.2 Objetivo Específico

- Instalar e testar um equipamento de fusão por indução magnética;
- Dominar a técnica de fusão por indução ao ar para obtenção de ligas Cu-Al-Ni;
- Selecionar e estudar uma liga da família Cu-Al-Ni visando aplicações em sistemas de proteção contra sobrecargas elétricas;
- Realizar ensaios de geração de carga em função da temperatura em amostras de lâminas com memória de forma;
- Proceder a caracterização física da liga Cu-Al-Ni selecionada;
- Realizar uma modelagem matemática e simulação do aquecimento elétrico e resfriamento de lâminas de ligas de cobre com memória de forma.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Descoberta do Efeito Memória de Forma (EMF)

As primeiras observações do EMF foram verificadas em uma liga Au-47,5 %at Cd por Chang e Read em 1930 (OTSUKA, WAYMAN,1998). A. Orlander descobriu um comportamento pseudoelástico tipo borracha nesse mesmo tipo de liga em 1932. Em 1938 foi observado por Greninger e Mooradian um comportamento idêntico ao anterior associado à formação de uma fase martensítica em ligas Cu-Zn. A compreensão desse comportamento termoelástico foi detalhada por Kurdjumov e Khandros em 1949 e também por Chang e Read em 1951. Somente em 1960 Buehler e seus colaboradores descobriram uma liga equiatômica de Ni-Ti com EMF a qual denominaram de Nitinol (Níquel Titânio Naval Ordnance Laboratory), que veio a ser considerada a mais bem sucedida das ligas com EMF, possuindo alta resistência mecânica, biocompatibilidade, boa resistência a corrosão, alta condutividade térmica e elétrica. Desde então se intensificaram as aplicações nos mais diversos campos da engenharia e da área médico-odontológica.

3.2 Efeito Memória de Forma

O EMF é a capacidade que possuem alguns materiais de recuperarem uma deformação plástica através de um aquecimento acima de uma temperatura crítica (OTSUKA, WAYMAN, 1998). Este fenômeno está associado a uma transformação de fase martensítica especial, que tem a característica de ser termoelástica e reversível, contrariamente a transformação martensítica que ocorre nos aços. Conforme ilustra a Figura 3.1, a deformação é induzida na fase martensítica, abaixo de uma temperatura crítica onde a liga é maleável. Esta deformação é recuperada com um aquecimento acima da temperatura crítica onde o material muda para a fase austenítica, sem ocorrer difusão atômica.

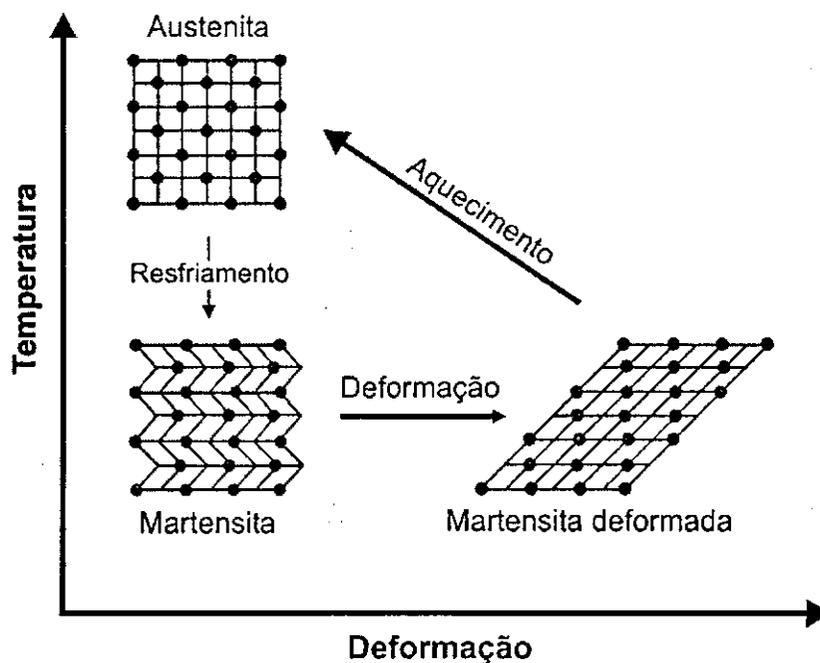


FIGURA 3.1 - Visão microscópica do EMF. Fonte: http://www.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mem/sma.html.

A Figura 3.2 mostra um elemento tipo mola que inicialmente está a uma temperatura inferior a temperatura de término de formação da martensita (M_f). Nesse instante aplica-se uma força F ($A \rightarrow B$), que ao ser liberada faz com que apenas uma parte da forma seja recuperada ($B \rightarrow C$), restando uma deformação residual. Durante o aquecimento acima da temperatura de término de formação da austenita (A_f), a forma original é recuperada ($C \rightarrow D$) e a mola volta ao tamanho normal. Este fenômeno é também chamado de efeito memória de forma simples ou de único sentido (EMFS).

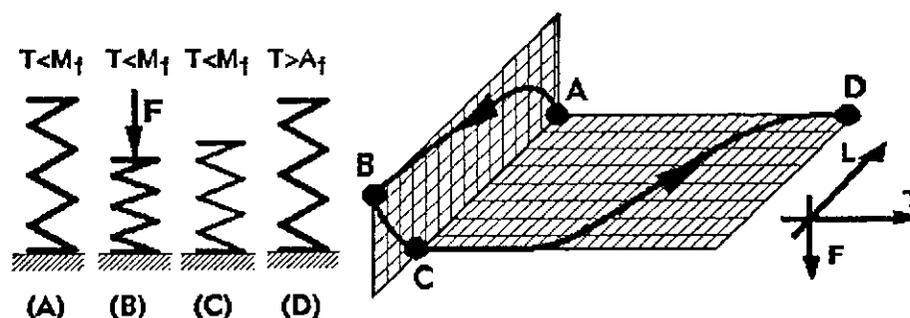


FIGURA 3.2 - Visão macroscópica esquemática do EMF

3.3 Transformação Martensítica

Conforme mencionado anteriormente o fenômeno de memória de forma é associado a uma transformação martensítica especial. Vale lembrar que 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).

As ligas com memória de forma (LMF) possuem duas estruturas cristalinas distintas, dependendo da temperatura, martensita a baixa temperatura e austenita a alta temperatura. A martensita pode ser obtida por efeito térmico ou induzida por tensão.

A martensita induzida por temperatura é obtida inicialmente por resfriamento rápido a partir da temperatura da fase austenita para uma temperatura bastante inferior. Essa transformação da austenita em martensita ocorre sem difusão atômica, pois a velocidade de resfriamento é muito elevada e não há tempo para que os átomos se desloquem e atinjam posições de longo alcance (OTSUKA, WAYMAN, 1998).

Assim como nos aços, a martensita das LMF é formada de finas lamelas dispostas em forma de agulhas, conforme mostra a Figura 3.3. A maneira de caracterizar fisicamente a transformação martensítica apresentadas pelas LMF consiste em determinar as temperaturas críticas de transformação de cada ciclo de resfriamento e aquecimento, conforme ilustra Figura 3.4.

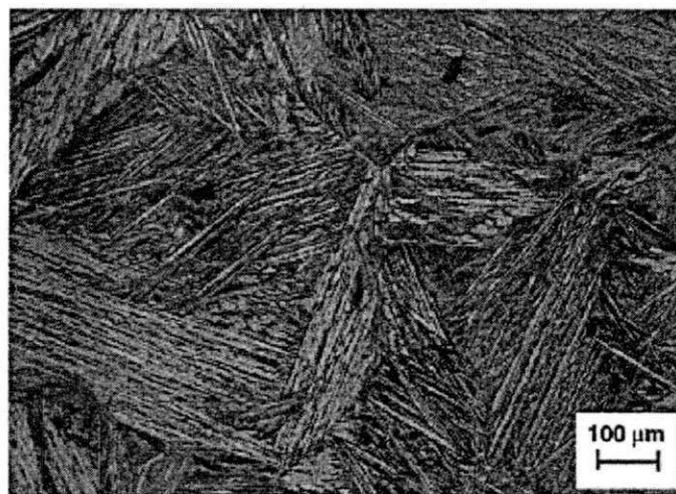


FIGURA 3.3 - Micrografia ótica mostrando uma microestrutura martensítica típica. Fonte: (SCHERNGELL, KNEISSL, 2002).

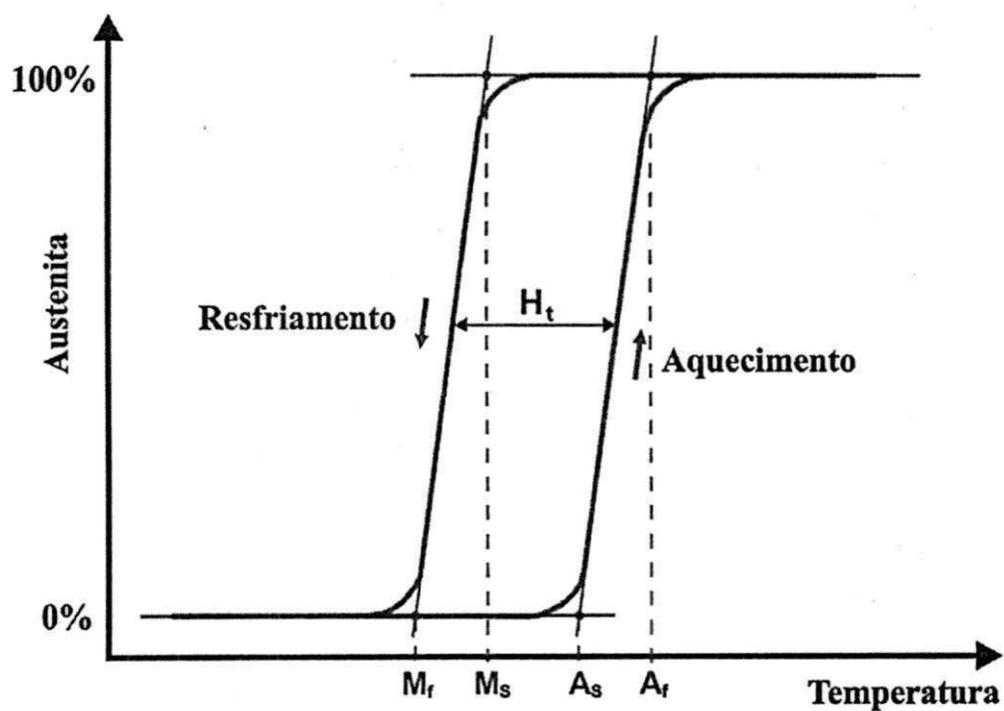


FIGURA 3.4 - Curva típica de transformação de uma LMF.

Por definição, as temperaturas críticas da transformação reversível são:

A_s : temperatura de início da transformação martensita - austenita;

A_f : temperatura de término da transformação martensita - austenita;

M_s : temperatura de início da transformação austenita - martensita;

M_f : temperatura de término da transformação austenita – martensita;

H_f : histerese da transformação.

A transformação apresenta uma histerese em temperatura H_f , definida como sendo a diferença entre a temperatura a 50% de formação da austenita e a temperatura a 50% de formação da martensita, conforme ilustra a Figura 3.4.

Algumas características gerais da transformação martensítica são:

- A transformação ocorre por um mecanismo de cisalhamento entre planos gerando plaquetas da fase produto (martensita). O tamanho das plaquetas de martensita é grande o bastante para serem observadas em um microscópio ou até mesmo a olho nu;
- As fases matriz e produto têm a mesma composição química sem difusão atômica;
- Como não há energia ativa de difusão envolvida, as velocidades de transformação são muito elevadas. As interfaces matriz-produto são deslizantes e podem mover-se sem ativação térmica. As velocidades de transformação são freqüentemente independentes da temperatura e nesse caso a transformação é dita atérmica;
- A transformação reversa de martensita em austenita é desencadeada pelo aquecimento da martensita a temperaturas superiores a A_s ;
- Todo cristal de martensita possui planos de hábitos específicos (interface matriz-produto);
- A superfície de uma amostra que tenha sofrido uma transformação martensítica apresenta irregularidades macroscópicas, chamadas de relevo de superfície. Estas distorções são provocadas pela natureza cisalhante da transformação. A mudança de forma é considerada como uma inclinação da superfície livre, de maneira a minimizar a energia da deformação.

3.4 Transformação Martensítica Termoelástica

As transformações de fase martensíticas responsáveis pelo EMF são de caráter termoelástico. Durante as transformações termoelásticas, o movimento da

interface é controlado por um balanço local entre as forças químicas e não químicas (ARAÚJO 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). Então, as transformações podem ser caracterizadas pelos 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 (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 3.5. 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).

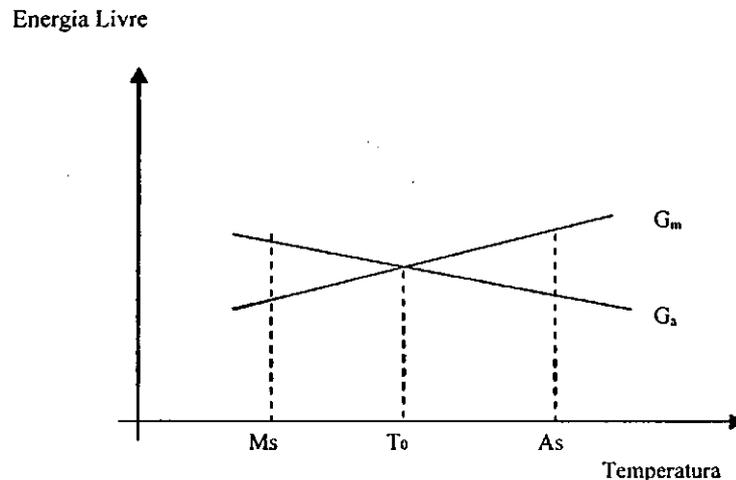


FIGURA 3.5 - Esquematização do equilíbrio entre as fases austenita e martensita.

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

3.5 Outros Comportamentos Termomecânicos das LMF

3.5.1 Efeito Memória de Forma Reversível (EMFR)

O EMFR aparece devido a um processo de treinamento do material através de um método baseado em ciclagens (pseudo-elástica ou termomecânica) 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 tratamento de educação 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 3.6, o qual corresponde a uma mudança espontânea da forma em função da temperatura e sem aplicação de carga ou deformação externa (A→B→C).

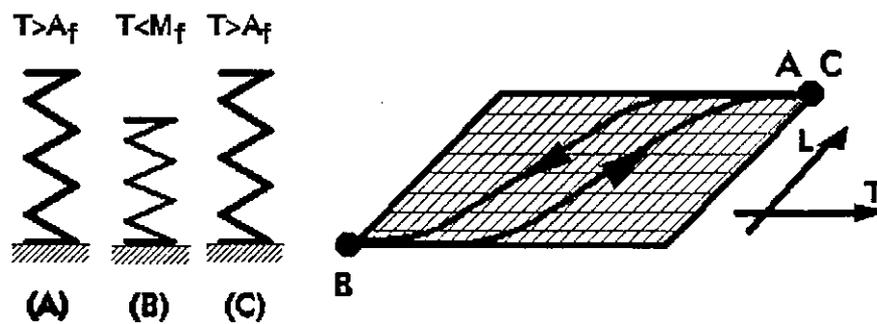


FIGURA 3.6 - Ilustração esquemática da mudança de forma por EMFR

3.5.2 Efeito Superelástico

Quando uma LMF é tensionada 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 3.7 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 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 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).

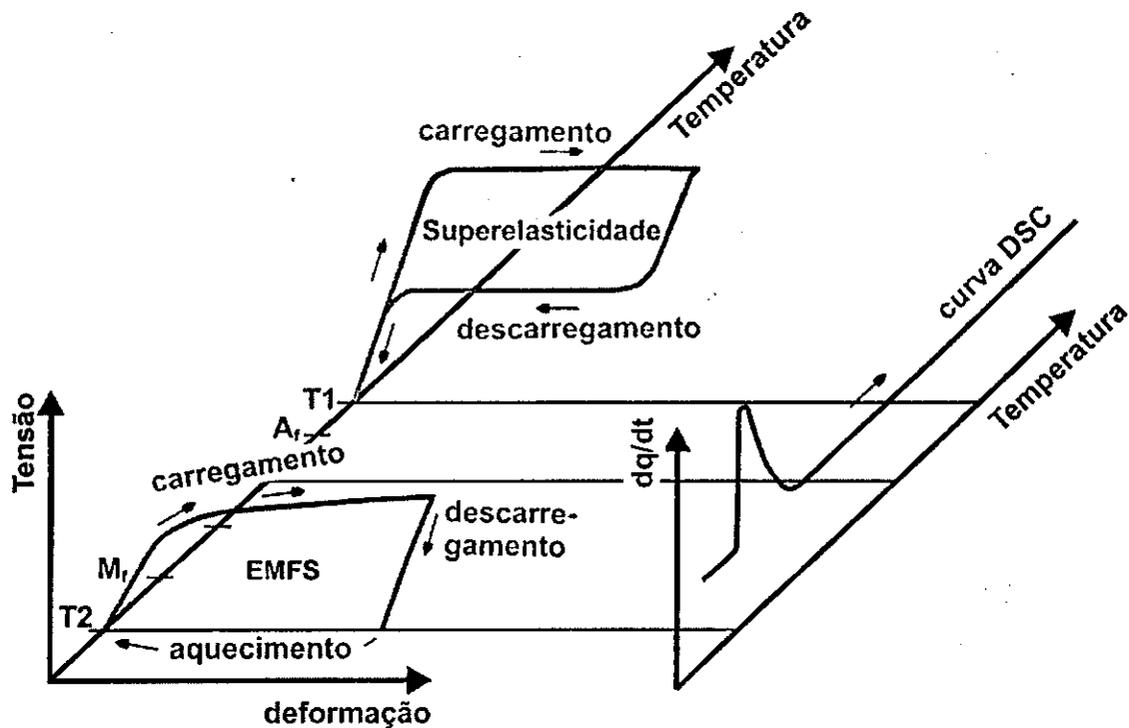


FIGURA 3.7 - Comportamento termomecânico das LMF. T1: carregamento em estado austenítico, T2: carregamento em estado martensítico. Fonte: <http://www.furukawa.co.uk/nt.html>.

A Figura 3.5, exibida anteriormente, mostra o comportamento esquemático da transformação em termos da energia livre de Gibbs. A aplicação de uma tensão provoca um deslocamento da curva livre ($\Delta G^{A \rightarrow M}$) para baixo. Desta forma, a temperatura de equilíbrio entre as fases aumenta e consequentemente a temperatura M_s sob carga ($M_s)_\sigma$ também. 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.

3.6 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 α' (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 pode-se enumerar:

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

3.7 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, 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 inteligentes, fato que limita sua utilização a aplicações de baixas frequências. Essa limitação em frequência está mais diretamente relacionada ao processo resfriamento do material.

3.7.1 Ligas Cu-Al-Ni com EMF

Dentre as LMF a base de cobre as mais frequentemente aplicadas são as ligas Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni (LOGEN et al., 2005). A liga Cu-Al-Ni tem recebido atenção especial, por causa de sua melhor estabilidade térmica a altas temperaturas, garantindo que essas ligas possam ficar um tempo mais elevado na fase austenítica sem ocorrer precipitações de fase (ASLANIDS, et al., 1999).

A Figura 3.8 mostra uma região do diagrama de fase de uma liga Cu-Al-Ni, com o teor de Ni constante de 3%. Através desse diagrama é possível estimar a faixa de temperatura para a qual a liga deve ser aquecida na fase austenita (fase β) para tratamento térmico de têmpera.

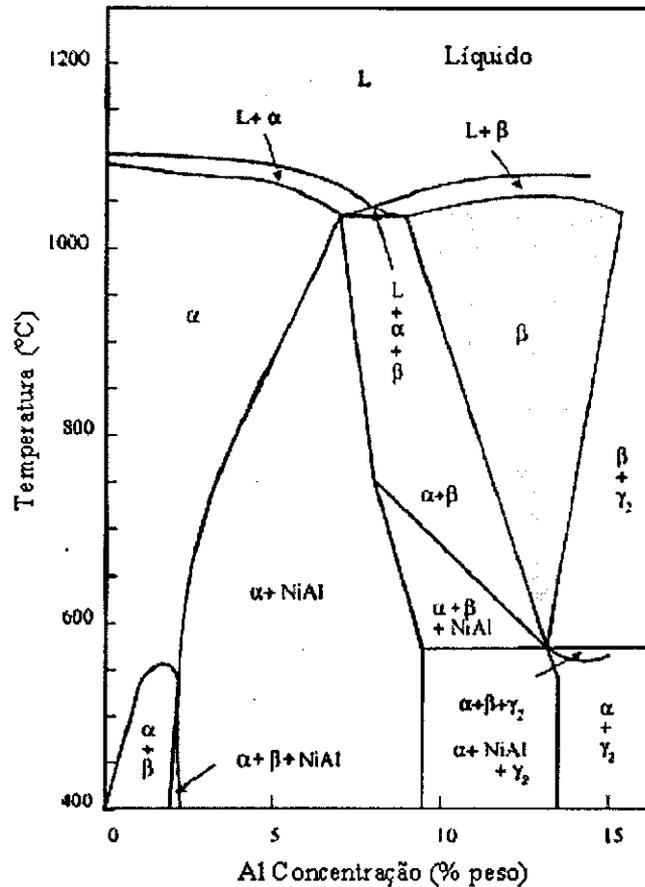


FIGURA 3.8 - Diagrama de fase da liga Cu-Al-Ni, para 3% em peso de Ni. Fonte: (OTSUKA, WAYMAN, 1998).

As temperaturas de transformação martensítica das ligas Cu-Al-Ni podem estar situadas entre -200 e 200 °C dependendo da quantidade de Al e Ni. A influência do alumínio é muito maior que a do níquel (ZENGIN; OZGEN; CEYLAN, 2004; LELATKO; MORAWIEC, 2003). A temperatura M_s pode ser estimada pela seguinte equação empírica (LOGEN et al., 2005):

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2020 - 45 \times (\text{wt.\%Ni}) - 134 \times (\text{wt.\%Al}) \quad (1)$$

Em trabalhos desenvolvidos anteriormente por RECARTE, et al. (1999), foi estabelecida outra equação empírica para estimar a temperatura M_s como mostrado na Equação (2). A Figura 3.9 mostra a dependência da temperatura M_s em função do teor de níquel e alumínio.

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 2433 - 19,1 \times (\text{wt.}\% \text{Ni}) - 169,9 \times (\text{wt.}\% \text{Al}) \quad (2)$$

Para uma mesma composição química as Equações (1) e (2) fornecem valores distintos para M_s . Para uma liga com composição em peso de 82,5Cu-13,5Al-4Ni, a primeira equação fornece um valor de 31 °C, enquanto a segunda resulta em 63 °C. Estas variações de temperaturas podem ser atribuídas as diferenças de processos que afetam o tamanho de grão, homogeneidade da liga, porosidade e aos tratamentos de betatização (temperaturas diferentes, transições ordem-desordem). Estas equações devem ser usadas apenas como uma referência ao escolher a composição adequada para uma determinada aplicação.

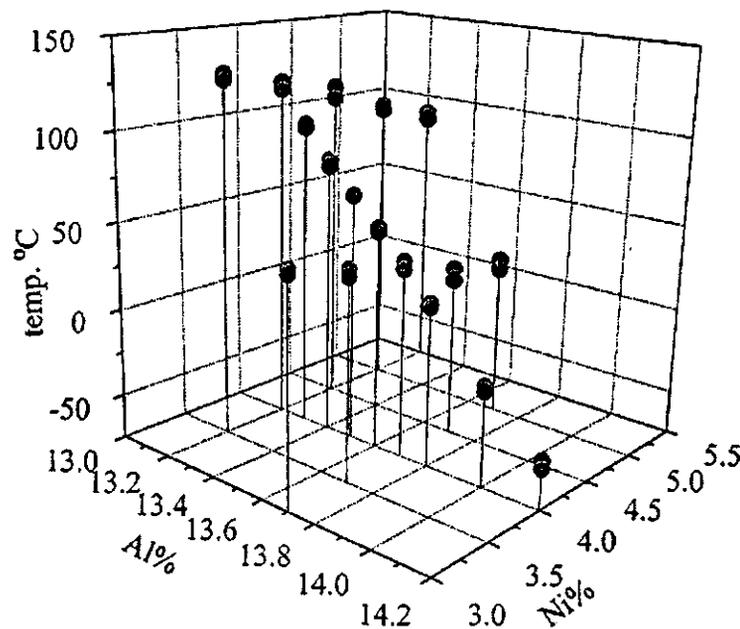


FIGURA 3.9 - Dependência da temperatura M_s em função do teor de níquel e alumínio. Fonte: (RECARTE, et al., 1999).

Em trabalhos experimentais realizados anteriormente por ZENGIN; OZGEN; CEYLAN (2004) e RECARTE et al. (1999) e analisando as Equações (1) e (2), observa-se que o aumento do teor de alumínio mantendo-se o teor de níquel constante, reduz as temperaturas de transformação. Este comportamento é revelado também pela Figura 3.9.

A martensita termoelástica das LMF caracteriza-se por sua boa deformabilidade em temperaturas inferiores a M_f , claramente perceptível em ligas da família Ni-Ti. Nas ligas Cu-Al-Ni com teor de alumínio superior a 12% e com o teor de níquel baixo (<3%) isso não ocorre, pois o elevado teor de alumínio leva a formação da fase martensítica γ' , uma estrutura hexagonal extremamente frágil (PICORNELL et al., 1999). Ligas com 14% de alumínio são extremamente frágeis. Na faixa entre 11 e 12,5% de Al tem-se também uma fase martensita β' , um pouco mais dúctil. Porém a influência do níquel pode "transportar" a fase β' a alta temperatura do diagrama de fase para a direita, formando-se a fase γ' novamente. A martensita β' possui uma estrutura ortorrômbica que tem mais planos e direções compactas para escorregamento levando a uma melhor deformabilidade. Outro fator de fragilidade é a facilidade de formar precipitados (em forma de rosetas), que dificulta a transformação e a tensão de ruptura é alcançada antes da transformação.

O acompanhamento da transformação por meio de ensaio de DSC para a martensita do tipo γ' revela um pico endotérmico de grande intensidade, com histerese mínima, enquanto a martensita do tipo β' mostra uma menor variação do sinal de DSC em função da temperatura, resultando numa grande histerese (GONZALEZ, 2002).

Para se selecionar a composição ideal de uma liga Cu-Al-Ni, deve ser levado em consideração dois fatores importantes, a composição química e a temperatura de transformação. Para obtenção de temperaturas de transformação mais baixas ($M_s < 80^\circ\text{C}$) deve-se aumentar o teor de Al. Porém o aumento do teor de Al para valores acima de 13,5% torna a liga muito frágil. Se um teor de Al inferior a 13% for empregado obtêm-se maior ductilidade, mas a temperatura de transformação M_s fica numa faixa superior a 200°C . Uma faixa de composição entre 13 e 13,5 %Al é a que consegue favorecer simultaneamente esses dois requisitos.

Ligas ternárias a base de cobre são metaestáveis na região da fase β e muito sensíveis ao tratamento térmico e ao histórico termomecânico, resultando assim em modificação nas temperaturas de transformação. Em um trabalho desenvolvido por DAGDELEN et al. (2003), isso fica evidenciado. Usando-se duas composições em peso de liga, 85,18Cu-11Al-3,82 Ni e a outra 85,62Cu-11Al-3,32Ni, foram aplicados tipos de tratamentos térmicos diferentes a cada liga e obtido resultados distintos para as temperaturas de transformação. O melhor resultado foi obtido com a segunda liga, a

qual foi aquecida a 930 °C com permanência de 30 min resfriada em água a 0 °C, aquecida a 100 °C com permanência de 30 min e resfriada em água a 0 °C. Para esse tratamento foram obtidas as seguintes temperaturas de transformação: $A_s=68,2$ °C, $A_f=87,2$ °C, $M_s=69,2$ °C e $M_f=46,1$ °C.

Outro tratamento térmico que muito influencia as propriedades das LMF é o tratamento de homogeneização, que tem o objetivo de uniformizar a composição química do material e melhorar sua ductilidade. Este tratamento consiste em aquecimento na região da fase β com tempo de permanência prolongado, em torno de 24h, para que ocorra o processo de difusão atômica. Trabalhos desenvolvidos por MORAWIEC et al. (1999), ZENGIN; OZGEN; CEYLAN (2004) e LELATKO, MORAWIEC (2003) usaram esse tratamento térmico e obtiveram bons resultados em termos de temperaturas de transformação.

As LMF Cu-Al-Ni, quando submetidas a aquecimento prolongado em atmosfera não inerte sofrem processo de oxidação. O mecanismo de oxidação em cobre puro se dá em dois estágios, primeiro uma camada de Cu_2O se forma na superfície, depois é formada uma camada de CuO abaixo da camada de Cu_2O , processo esse a baixa temperatura (ZENGIN; OZGEN; CEYLAN, 2004).

As LMF são susceptíveis a fratura intergranular. Essa fratura é do tipo frágil por clivagem e ocorre na região do contorno de grão. Esse fenômeno é agravado quando o material possui grãos grosseiros, com tamanho médio da ordem de 1 mm, contribuindo para concentração de tensão (OTSUKA, WAYMAN, 1998). A redução do tamanho de grão reduz bastante a tendência da fratura frágil (BASTIAN; CAMINHA JÚNIOR; MORAES, 1997).

3.7.2 Efeito das Ciclagens Térmicas nas Ligas Cu-Al-Ni com EMF

A ciclagem térmica consiste em aquecer o material a temperatura superior a A_f e em seguida resfriá-lo a temperatura inferior a M_f , completando assim um ciclo completo. Esse processo gera no material um acúmulo de defeitos (discordâncias), que podem ser visualizados em microscopia eletrônica de transmissão. Essa reconfiguração de discordâncias causa no material mudanças nas temperaturas de

transformação. As temperaturas de transformação M_s e A_f sofrem redução com o aumento do número de ciclos (OTSUKA, WAYMAN, 1998).

3.7.3 Propriedade Físicas e Mecânicas da Liga Cu-Al-Ni

Estão listadas na Tabela 3.1 as principais propriedades físicas e mecânicas da liga Cu-Al-Ni.

TABELA 3.1 – Propriedade da liga Cu-Al-Ni com EMF.

Propriedades físicas	Unidades	Cu-Al-Ni
Ponto de Fusão	(°C)	1000 a 1050
Densidade	(kg/m ³)	7100 a 7200
Resistividade elétrica	(Ωμm)	0,10 a 0,14
Calor específico	(W/kg°C)	373 a 574
Condutividade térmica	(W/mK)	75
Propriedades mecânicas		
Módulo de elasticidade da martensita	(GPa)	80 a 100
Limite de resistência	(MPa)	700 a 800
Propriedades características do EMF		
Temperatura de transformação	(°C)	-200 a 200
Deformação recuperável	%	4 *
Histerese	(°C)	15 a 25

* Em materiais monocristalinos essa deformação pode atingir 15%. Fonte: (OTSUKA, WAYMAN, 1998).

3.7.4 Introdução de Elementos de Liga

Os elementos de liga possíveis de serem adicionados às LMF têm a função de refinar a microestrutura, melhorar a resistência mecânica e alterar as temperaturas de transformação. Entre os elementos adicionados estão: nióbio, titânio, gálio, manganês, cromo, cobalto, zircônio, boro, entre outros.

As ligas contendo nióbio caracterizam-se pela sua alta plasticidade e recuperação da forma e melhoria nas propriedades mecânicas. A adição de nióbio em ligas Cu-Al causa significativo aumento nas temperaturas de transformação (MORAWIEC et al., 1998).

As ligas Cu-Al-Ni com adição de titânio conduz à formação da fase γ juntamente com uma fase-X rica em titânio, afetando as características da transformação

martensítica e especialmente as propriedades mecânicas tais como o atrito interno e o módulo de elasticidade (SEGUI et al., 1999).

Em estudos realizados por SEGUI et al. (1999) com duas ligas de mesma composição 82,3Cu–11,9Al–4,8Ni–1Ti, sendo uma laminada à quente a temperatura de 850 °C e a outra à 650 °C, em ambas foi identificada a fase X e a fase γ com tamanho de grão significativamente menor para a liga laminada à 650 °C. A Figura 3.10 mostra a presença dessas duas fases. O problema de se trabalhar com esse tipo de liga é a forte reatividade do titânio em altas temperaturas, sendo necessário forno com atmosfera inerte ou sob vácuo.

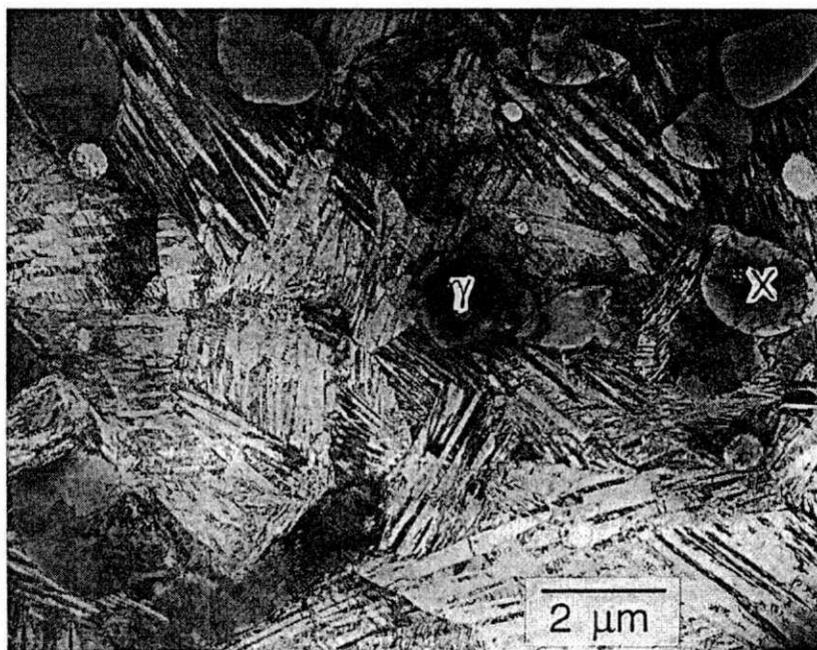


FIGURA 3.10 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrando a fase X e fase γ da liga Cu-Al-Ni-Ti. Fonte: (SEGUI et al., 1999).

3.8 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).

3.8.1 Aplicação em Aparelhos Ortodônticos

Muitos dos arames dos aparelhos ortodônticos são hoje produzidos com material que apresenta o efeito superelástico (liga Ti-Ni), sendo altamente eficientes, podendo ser mais tensionados que os fios normais, não apresentando folga tão rapidamente, pois com o deslocamento do dente o fio continua tensionado, dispensando inúmeras visitas ao dentista. A Figura 3.11 ilustra esse tipo de aplicação.

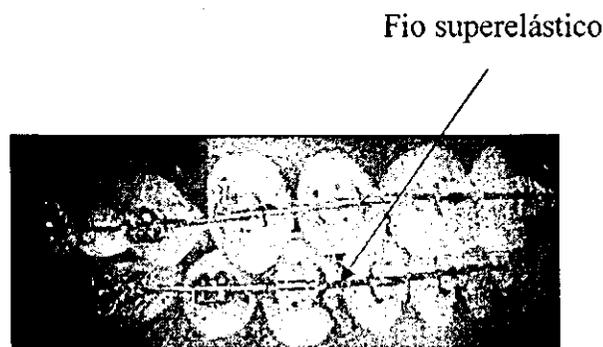


FIGURA 3.11 - Aplicação na odontologia do efeito superelástico

3.8.2 Aplicação em Conectores

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 liga 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 3.12 mostra essa aplicação.

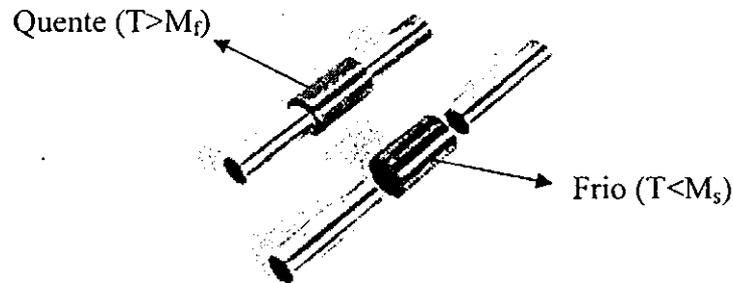


FIGURA 3.12 – Luva de LMF para conexão de tubos. Fonte: <http://www.furukawa.co.uk/nt.html>.

3.8.3 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, WAYMAN, 1998). A Figura 3.13 ilustra um atuador térmico, constituído de um controlador de temperatura, uma mola com EMFR, uma mola de apoio (sem EMFR), 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 fique a 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.

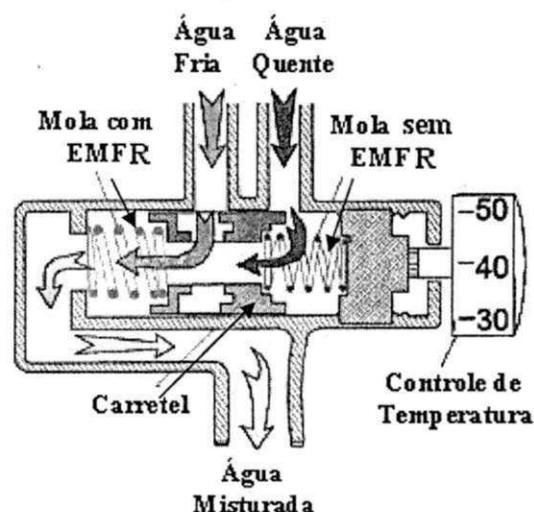


FIGURA 3.13 - Aplicação de um atuador térmico do tipo mola com memória de forma.
 Fonte: <http://www.furukawa.co.uk/nt.html>.

3.8.4 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 3.14.

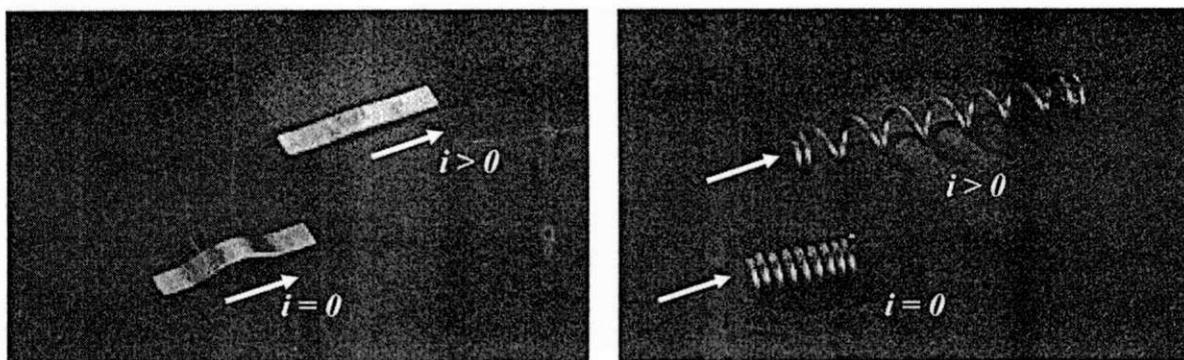


FIGURA 3.14 - Exemplos de elementos ativos em ligas de cobre com EMF reagindo à passagem de corrente elétrica ($i > 0$).

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:

$$\int_0^t I^2 dt \leq K^2 S^2 \quad (3)$$

em que :

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. Outro tipo de protetor 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. Na Figura 3.15 mostra-se um esquema em corte de um relé bimetálico mostrando as lâminas bimetálicas em atuação.

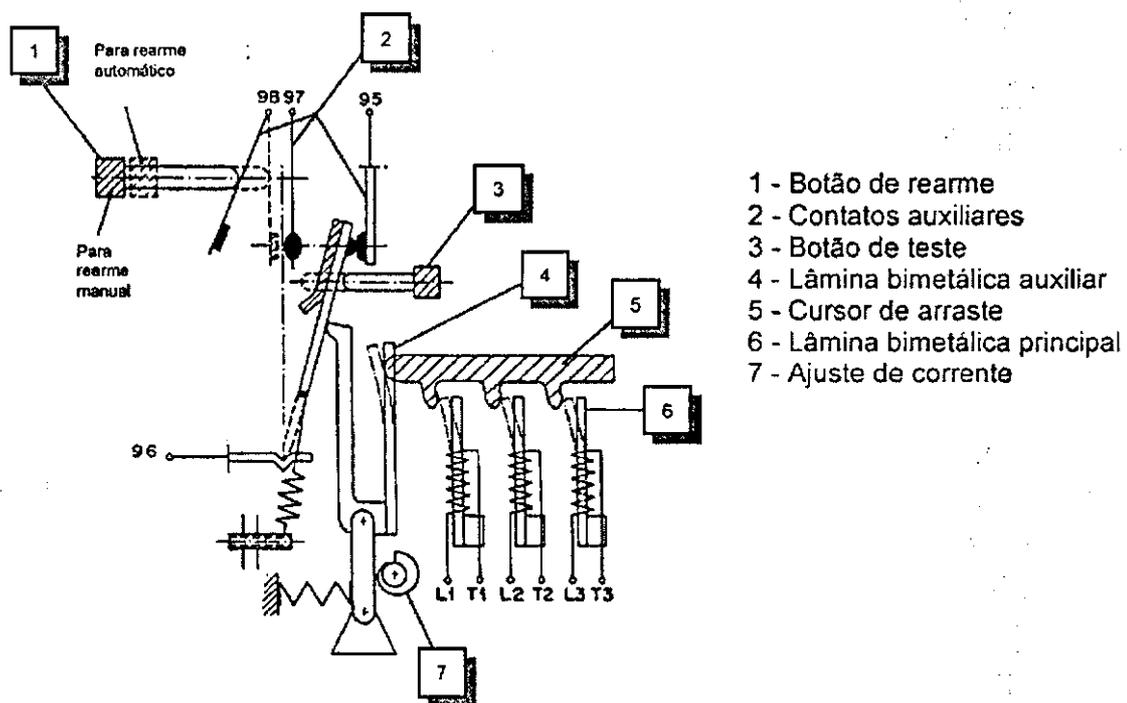


FIGURA 3.15 - Desenho em corte de um relé de sobrecarga bimetálico.

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).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Seleção da Liga

A liga selecionada para este estudo foi da família Cu-Al-Ni, passível de apresentar o fenômeno memória de forma. Foram analisadas inicialmente três composições nominais em peso, visto que para a aplicação em proteção contra sobrecargas elétricas, é ideal uma LMF com temperatura de transformação austenítica A_s situada entre 70 e 180 °C e com fase martensítica a temperatura ambiente. As outras composições serão produzidas para testar e dominar o processo de fusão por indução e otimizá-lo. A Tabela 4.1 exibe as composições com as respectivas temperaturas de transformação indicados na literatura (ZENGİN; OZGEN; CEYLAN, 2004; RECARTE et al., 2004).

TABELA 4.1 - Composição da liga selecionada e temperaturas previstas.

Liga	% Peso			Temperatura de Transformação			
	Cu	Al	Ni	A_s (°C)	A_f (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)
L1	83,0	13,0	4,0	135,4	172,3	150,9	112,7
L2	82,5	13,5	4,0	49,7	72,8	59,2	26,7
L3	82,0	14,0	4,0	1	12	-21	-27

4.2 Fabricação da Liga

Na produção das primeiras composições, o cobre utilizado foi comercialmente puro na forma de fios picotados, enquanto o alumínio e o níquel estavam na forma de limalhas. O uso de fios e limalhas não vinham fornecendo resultados totalmente satisfatórios, devido sobretudo a excessiva perda por oxidação, por isso foram substituídos posteriormente por barras maciças de cada material utilizado. Para eliminação da camada de óxido do cobre, foi feita uma decapagem usando uma solução aquosa de ácido, com a imersão dos tarugos de cobre por aproximadamente 30 segundos, seguida de lavagem em água corrente e secagem. A pesagem do material foi feita numa balança da marca Marete, modelo AL200C, com resolução da ordem de 1 mg.

Foi adicionado 1% do peso da liga de um fluxo protetor Coperpal LT fornecido pela empresa SOMIPAL. A massa total da liga em cada fusão foi de 200g.

A fusão foi realizada em um sistema de indução da marca INDUCTOTHERM modelo VIP POWER TRACK PT 9,6 kHz composto de conversor e forno de mesa. O cadinho utilizado foi de grafite, modelo CI-1 da empresa Morganite Cadinho. Em uma mesa de apoio contendo uma camada de vermiculita foi apoiada a lingoteira para vazamento do metal líquido. A lingoteira utilizada foi desenvolvida em cantoneira de aço carbono e possui canais retangulares de diferentes larguras. A Figura 4.1 mostra uma foto desse sistema de fusão.

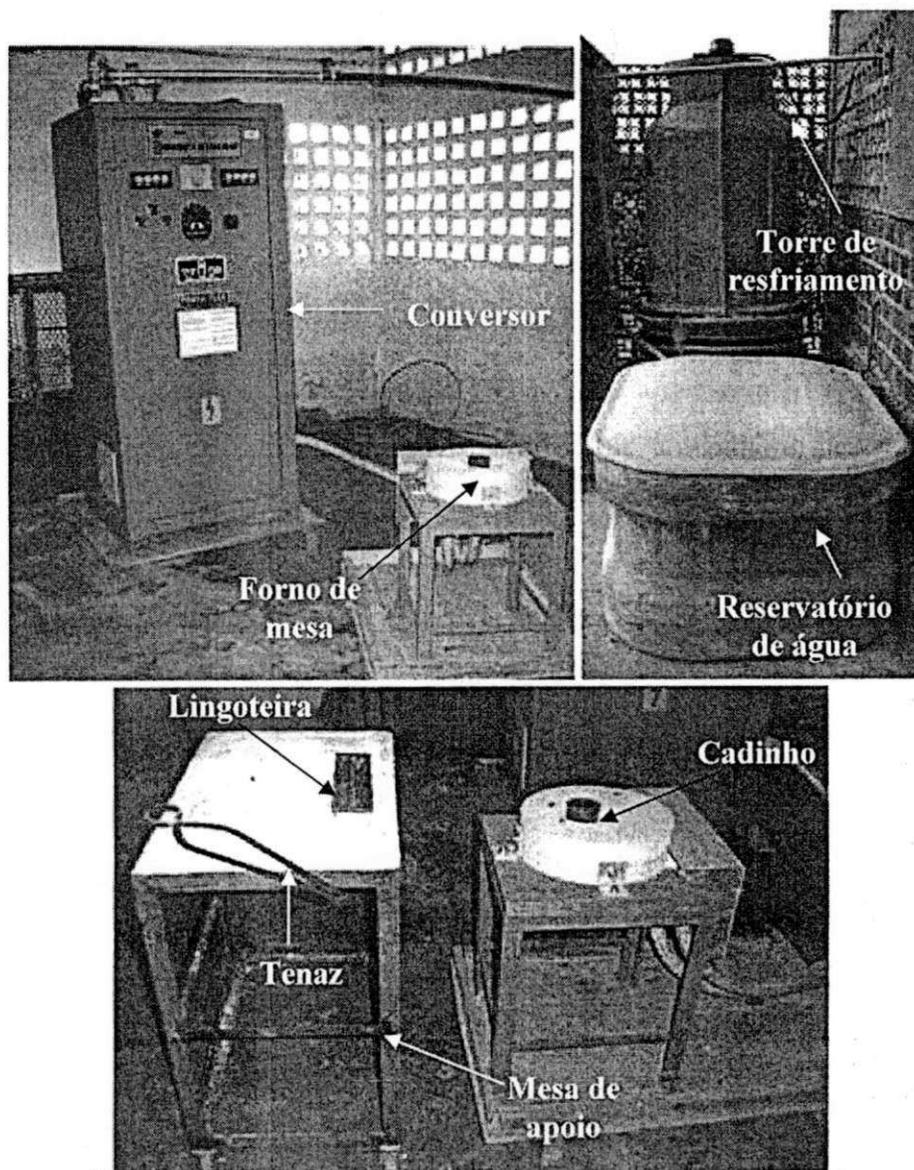


FIGURA 4.1 - Forno de indução e acessórios

A matéria prima utilizada está mostrada na Figura 4.2. Foram utilizadas barras maciças dos elementos químicos comercialmente puros.

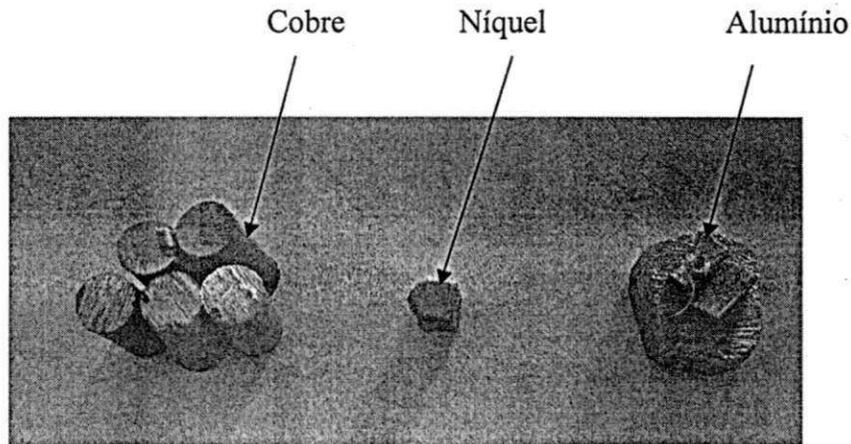


FIGURA 4.2 – Matéria prima utiliza para fusão.

Os lingotes obtidos após fundição foram usinados para obtenção de pequenas lâminas, conforme ilustra a Figura 4.3. Estas lâminas foram submetidas a tratamento térmico de têmpera para conferir ao material a estrutura martensítica. O tratamento térmico consistiu em aquecimento até uma temperatura na região da fase β , (900 °C) por 15 minutos, para haver homogeneização na temperatura e resfriamento brusco em água a temperatura ambiente.

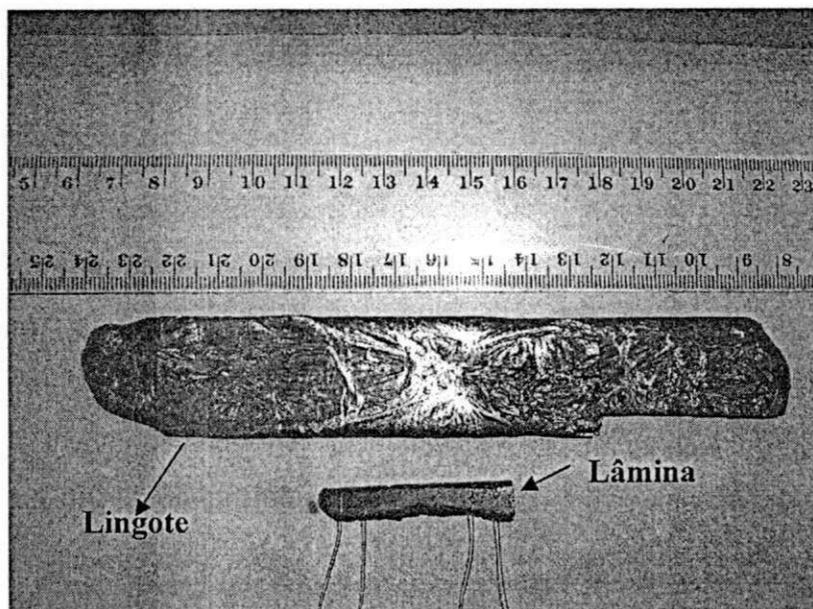


FIGURA 4.3 – Lingote obtido com a instalação da Figura 4.1 e lâmina usinada.

4.3 Caracterização da Liga

Para caracterização do material obtido foram desenvolvidas técnicas específicas como a variação de resistência elétrica em função da temperatura e geração de força em função da temperatura em modo de flexão três pontos. Além das técnicas especialmente desenvolvidas para esse trabalho, foram utilizadas também análises clássicas por microscopia ótica e microdureza.

4.3.1 Resistência Elétrica em Função da Temperatura

As ligas foram inicialmente caracterizadas por ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura. O sistema de caracterização foi montado no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) em um trabalho de conclusão de curso (SILVA, 2005), visando determinar as temperaturas críticas na detecção da transformação de fase entre -30 e 200 °C.

No ensaio da variação de resistência elétrica em função da temperatura, passa através da lâmina uma corrente contínua e por meio de um sistema de aquisição de dados foi feita a leitura da tensão em pontos equidistantes dos pontos de aplicação da corrente. A amostra é imersa em um banho termo regulável e a temperatura foi medida por um termopar tipo K e enviada a um banco de dados de um programa controlador do sistema de aquisição de dados que armazena os resultados das medições das temperaturas e das tensões, em intervalos de tempo pré-determinados. Este método é denominado de método dos quatro fios, aplicado na medição de resistências muito baixas, inferiores a 10Ω . A Figura 4.4 mostra o princípio de medição da resistência elétrica com base na lei de Ohm por esse método. As correntes normalmente usadas nos ensaios foram situadas na faixa de 1 a 2 A. Os fios de contato são soldados à lâmina em teste utilizando uma micro soldadora por descarga capacitiva da marca TgK.

É importante observar que a corrente aplicada à lâmina não deve ser muito alta para que a transformação de fase seja provocada pelo banho térmico e não pela corrente elétrica (efeito Joule). A amostra utilizada tem forma prismática com dimensões aproximadas de 47 x 4 x 5 mm.

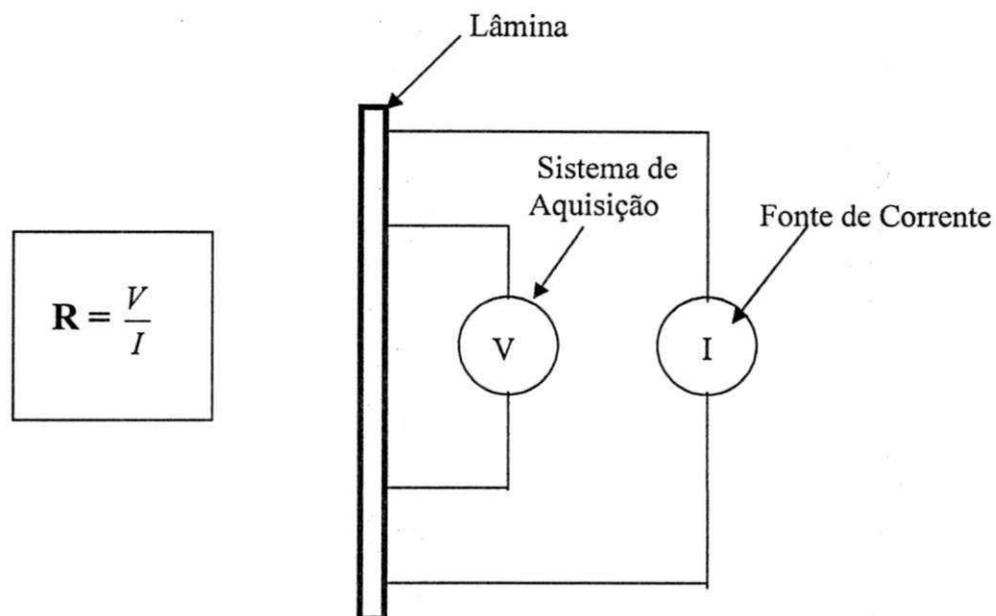


FIGURA 4.4 - Esquema elétrico de ligação do método dos quatro fios.

A Figura 4.5 mostra a bancada experimental montada de acordo com o princípio de medição descrito anteriormente.

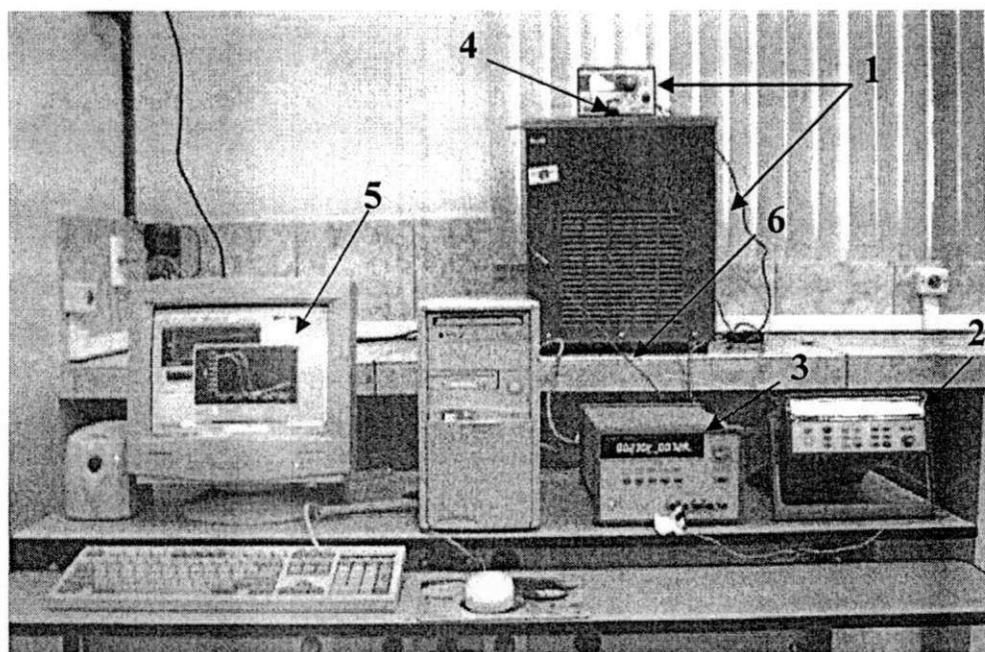


FIGURA 4.5 - Bancada de teste para ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura em amostras de LMF.

A bancada experimental é composta das seguintes partes:

1 – Banho de circulação térmica com programação e controle digital, da marca COLE-PARMER;

2 – Sistema de aquisição de dados Agilent, modelo 34970A;

3 – Fonte com controle de corrente Agilent, modelo E3633A;

4 – Amostra;

5 – Microcomputador com programa Agilent BenchLink Date Logger

Utilities;

6 - Termopar tipo K.

Banho de Circulação Térmica com Programação e Controle Digital

O banho é composto de um reservatório de aproximadamente 13 litros onde fica o fluido que receberá a lâmina a ser testada. O fluido utilizado é o óleo de silicone Rhodosil 47V50 (Rhodia Silicones) onde a amostra fica imersa. Esse banho permite trabalhar na faixa de temperatura de -50 a 200 °C.

Sistema de Aquisição de Dados - Modelo Agilent 34970

Este sistema está equipado com um módulo multiplexador de 20 canais com precisão de leitura de até 6,5 dígitos. É possível realizar medida direta de temperatura, tensão contínua, tensão alternada, resistência elétrica, frequência e período em tempo real. O intervalo de varredura pode ser programável com armazenamento de até 50.000 leituras.

Os dados do sistema acima são enviados para um programa onde são armazenados e visualizados. Para visualização na tela são disponíveis apenas 1.000 leituras.

Fonte com Controle de Corrente Agilent E3633A

A fonte de corrente é responsável pelo fornecimento da corrente a ser aplicada na amostra. Essa fonte permite tanto o controle de corrente como o controle de tensão, nas escalas de 8V/20A e 20V/10A.

Microcomputador com Programa Aligent BenchLink Data Logger Utilities

O sistema de aquisição de dados é interligado a uma computador através de uma placa de interface GPIB. O programa Aligent BenchLink Data Logger Utilities fornecido com o sistema de aquisição permite visualizar na tela em tempo real os efeitos gerados pela transformação associada ao fenômeno de memória de forma, enquanto as leituras são armazenadas em um banco de dados. O programa também permite programar o sistema de aquisição de dados de forma simples e prática.

Termopar Tipo K

O termopar tipo K é utilizado para medição da temperatura do óleo onde a amostra está imersa e deve ser posicionado próximo a lâmina para que a temperatura corresponda à temperatura da amostra. Deve ser selecionado um canal no sistema de aquisição de dados para fazer a leitura do termopar.

4.3.2 Geração de Força em Modo de Flexão Três Pontos

Para realização dessa técnica foi montada no LaMMEA uma plataforma experimental a partir da estrutura rígida de uma prensa de bancada de 15 toneladas da marca MARCON, modelo MPH-15. A Figura 4.6 mostra uma vista geral dessa plataforma experimental.

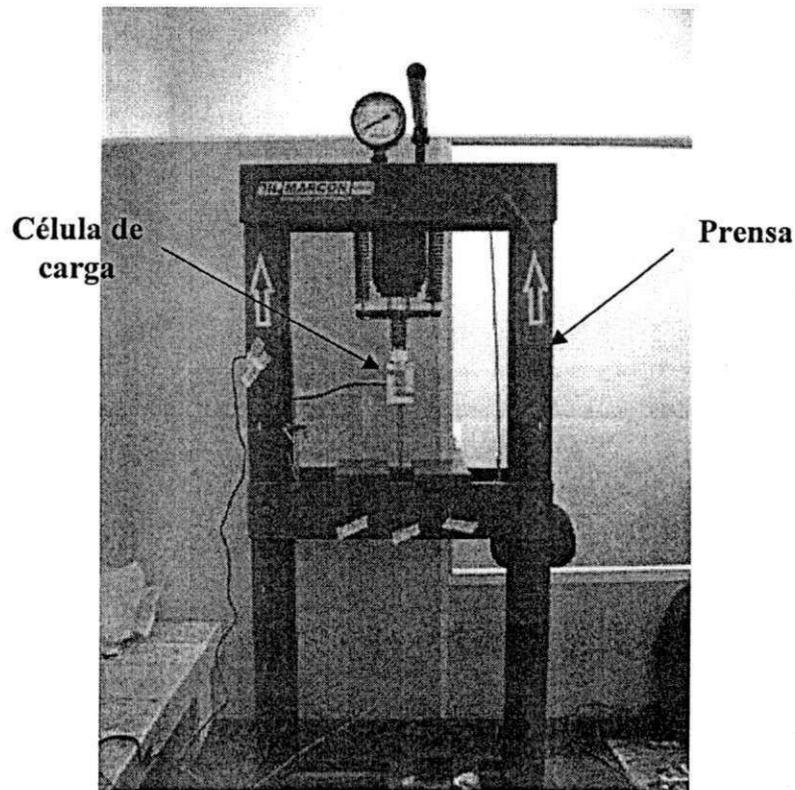


FIGURA 4.6 - Plataforma experimental para caracterização termo-mecânica em flexão três pontos.

A amostra fica apoiada nos barramentos da própria prensa enquanto uma força é aplicada para defletir-la em modo de flexão três pontos, utilizando-se do sistema hidráulico da própria prensa. Após a amostra deformada em flexão na temperatura ambiente, são soldados os fios para realização do ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura sob carga, utilizando-se o método dos quatro fios. O isolamento elétrico da amostra nos barramentos da prensa é feito usando-se folhas de celulose. O termopar fica posicionado em contato com a parte posterior da amostra. A célula de carga fica presa na parte superior ao fuso da prensa e na parte inferior fica apoiada a um parafuso que faz o contato direto com a amostra. A Figura 4.7 mostra uma vista ampliada dessa montagem da Figura 4.6.

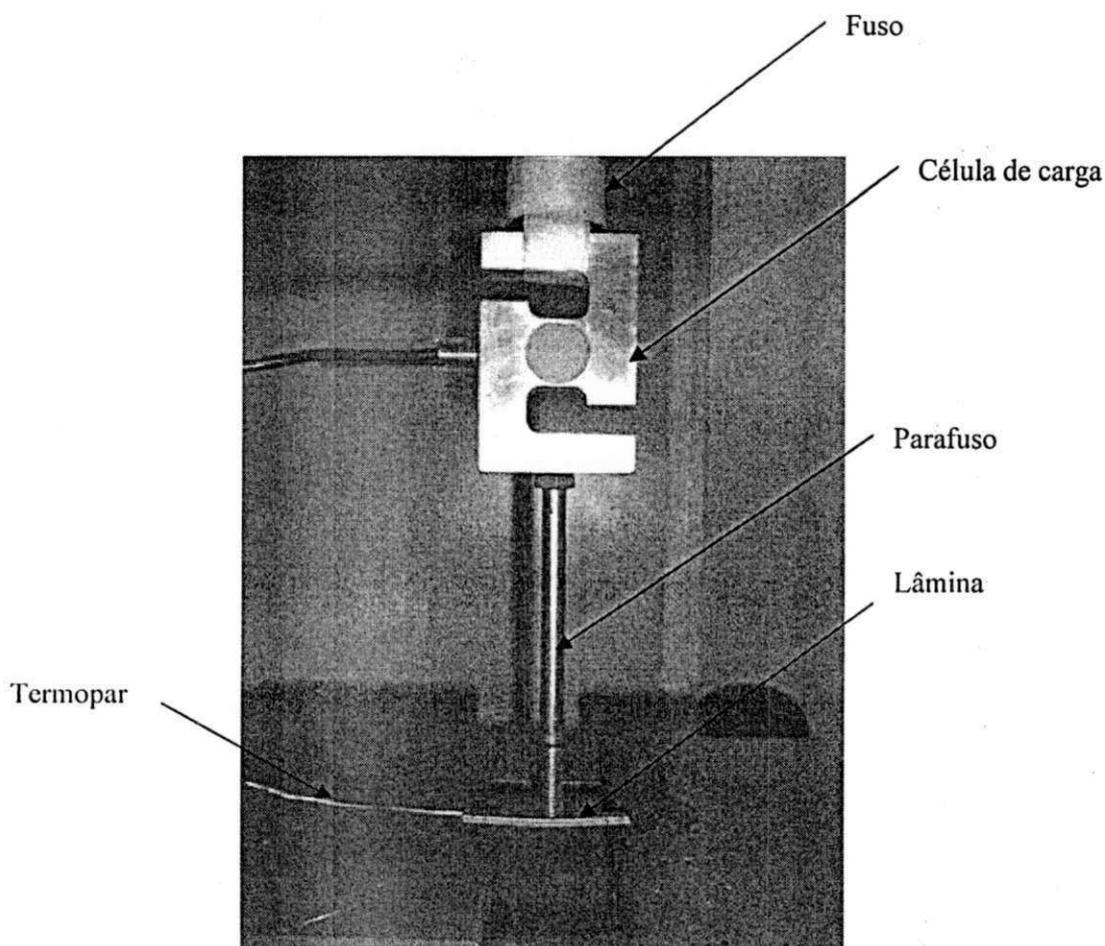


FIGURA 4.7 - Montagem da lâmina – parafuso – célula de carga na plataforma experimental.

Inicialmente é aplicada uma pré-carga para manter a rigidez no sistema lâmina deformada – parafuso – célula de carga – fuso da prensa. Essa pré-carga situa-se na faixa de 3 a 6 N. Por meio de um soprador térmico da marca STEINEL, modelo HL 1500 faz-se o aquecimento da amostra. Na recuperação da forma, a amostra “empurra” o parafuso e esse exerce uma força sobre a célula de carga que está fixa. A aquisição dos dados é feita pelo Sistema de Aquisição de Dados - Modelo Agilent 34970.

Foi utilizada uma célula de carga da marca EXCEL, modelo MS, com tensão de excitação de 6 a 10 Vcc e capacidade nominal para 50kg. Para a aquisição dos dados da célula de carga foi necessário fazer o levantamento da curva de carga versus tensão, para que o sistema de aquisição forneça o valor medido diretamente em Newton e não em Volt, que é o valor de saída. Para tal, foi utilizada uma tensão de excitação de

9 V e posicionado alguns pesos sobre a célula e medida sua tensão de saída. De posse desses dados traçou-se a curva de resposta da célula que é uma função linear da tensão de saída. A Figura 4.8 mostra a curva obtida com a respectiva Equação (4).

$$N = 26514V - 0,6628 \quad (4)$$

Em que :

N: Carga em Newton;

V: tensão em Volt

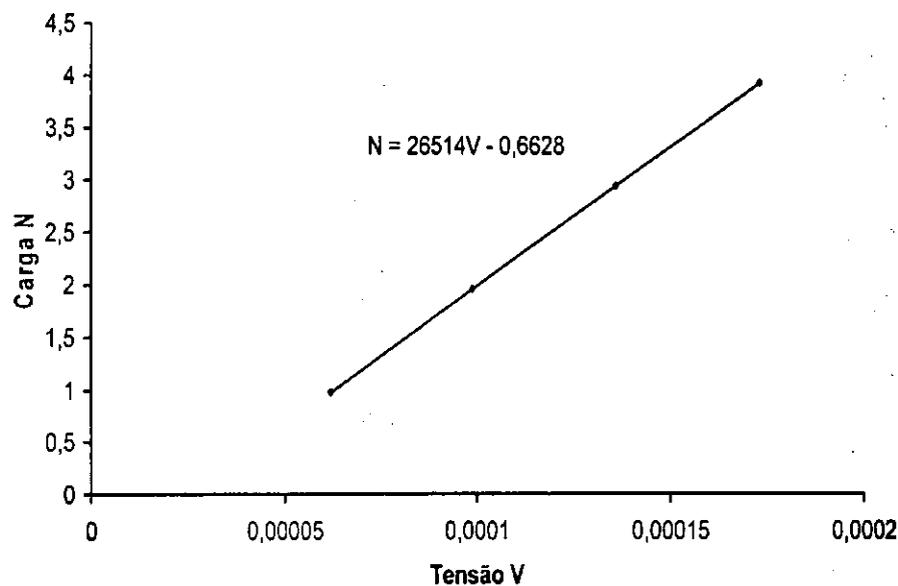


FIGURA 4.8 - Curva da carga em função da tensão de saída da célula de carga.

4.3.3 Microscopia Ótica

A microscopia ótica foi realizada em microscópio ótico da marca Olympus, modelo BX 51M e as imagens foram capturadas através de um programa analisador de imagens MSQ. A Figura 4.9 mostra uma foto do microscópio utilizado.

Para análise em microscopia ótica as amostras foram embutidas em resina acrílica e para o lixamento foram usadas lixas de granulometria 220, 400, 600, 1200. O polimento foi feito com alumina de granulometria 1, 0.3, 0.2 e 0.1 μm .

O ataque químico foi realizado com ácido nítrico diluído em água a 10%, com tempo de permanência de 30 segundos.

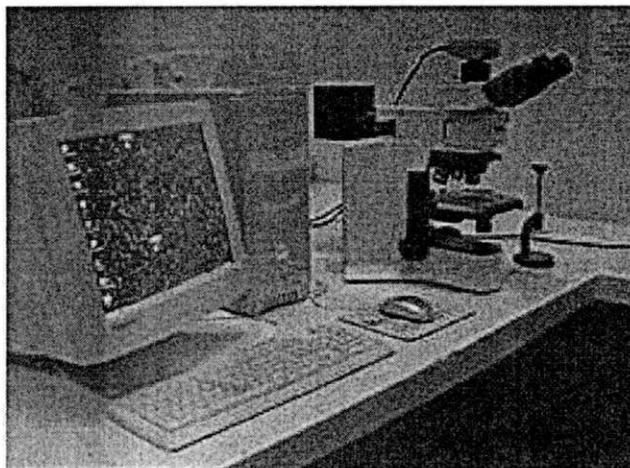


FIGURA 4.9 - Microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX 51M.

4.3.4 Microdureza

A microdureza foi medida em microdurômetro da marca Future – Tech, modelo FM – 700. Foram analisadas amostra da liga CuAlNi com 13,5 %Al embutidas em resina acrílica especial. Foi usada uma carga de 25 gf e tempo de penetração de 15s. A Figura 4.10 mostra uma foto do microdurômetro utilizado.

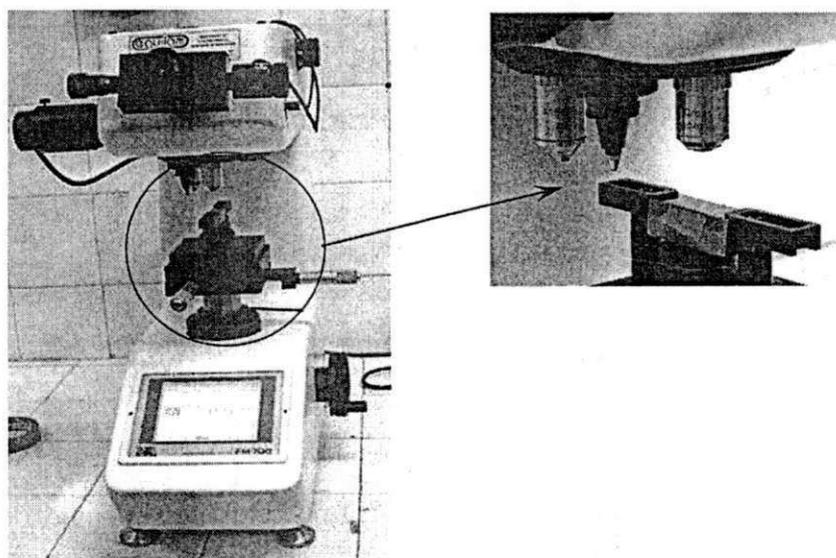


FIGURA 4.10 - Microdurômetro da marca Future – Tech, modelo FM – 700.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após alguns testes preliminares a liga selecionada para esse trabalho foi aquela com composição nominal Cu-13,5Al-4Ni (%peso) com temperatura A_s próxima de 120 °C. Essa liga foi elaborada no LaMMEA e comparada com uma liga fornecida pela empresa francesa Tréfinmetaux.

5.1 Resistência Elétrica em Função da Temperatura

O lingote da liga obtida no LaMMEA foi homogeneizado a 900 °C durante 24h. As lâminas retiradas do lingote homogeneizado foram aquecidas a 900 °C durante 15 min e resfriadas bruscamente em água a temperatura ambiente. A liga Tréfinmetaux foi submetida apenas ao tratamento de têmpera.

As Figura 5.1 e 5.2 mostram as curvas de resistência elétrica em função da temperatura para a liga LaMMEA (LL) e Tréfinmetaux (LT), para o segundo aquecimento, respectivamente. As curvas de resistência elétrica em função da temperatura apresentam um aumento linear da resistência até A_s , seguido de uma redução brusca entre A_s e A_f (região de transformação), seguida de outro aumento linear da resistência acima de A_f (condutor comum, região austenítica). O comportamento inverso ocorre no resfriamento. Os valores das temperaturas de transformação foram determinados pelo método das tangentes e estão resumidos na Tabela 5.1.

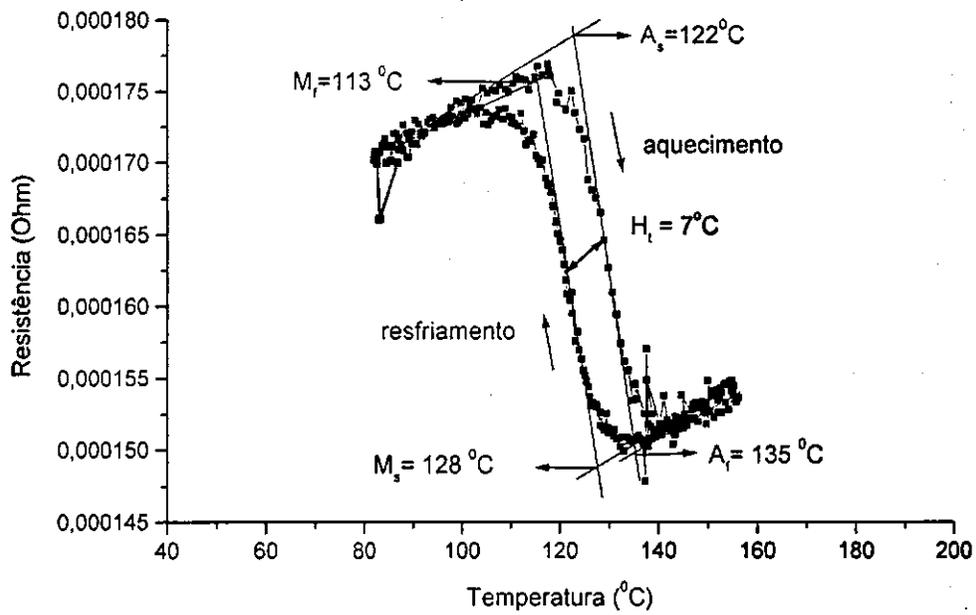


FIGURA 5.1 - Ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura da liga LL.

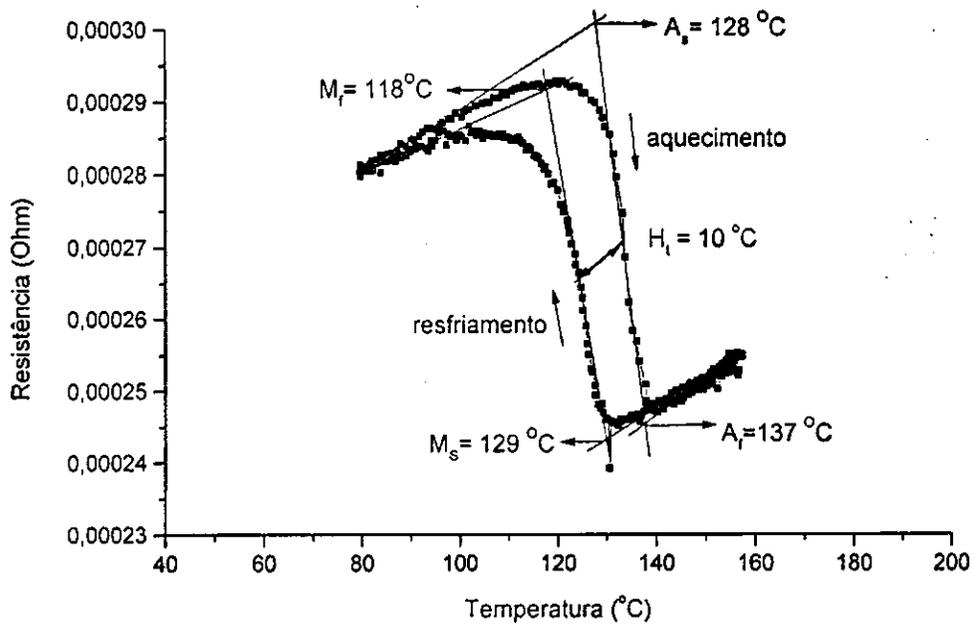


FIGURA 5.2 - Ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura da liga LT.

TABELA 5.1 - Temperaturas de transformação das ligas LL e LT.

Ligas	Temperatura de Transformação				
	A _s (°C)	A _r (°C)	M _s (°C)	M _r (°C)	H _t (°C)
LL	122	135	128	113	7
LT	128	137	129	118	10

Para ambas as ligas os valores das temperaturas de transformação foram bastante próximos. A maior variação observada foi para a temperatura A_s da liga LL que foi 6 °C inferior aquela da liga LT, mostrando que independentemente do processo de fabricação as temperaturas de transformação não apresentam grandes variações e a liga produzida no LaMMEA tem uma boa qualidade comparativamente ao produzido pela rota industrial da empresa Tréfinmetaux (CLEMENT; NAUDOT; WELTER, 1991).

5.2 Geração de Força em Modo de Flexão Três Pontos

Para os ensaios de geração de carga em função da temperatura em modo de flexão três pontos, as lâminas de teste são primeiramente deformadas pseudoplasticamente na região central para uma flecha (y) à temperatura ambiente. O aquecimento da lâmina com um soprador térmico leva a recuperação da flecha contra um sensor de carga (Figura 4.7), originando um esforço crescente em função da temperatura.

Cada lâmina foi simplesmente apoiada e submetida a 15 ciclos de aquecimento e resfriamento. A Figura 5.3 mostra as dimensões das lâminas as quais estão resumidas na Tabela 5.2. A base b é uma dimensão perpendicular à espessura (e).

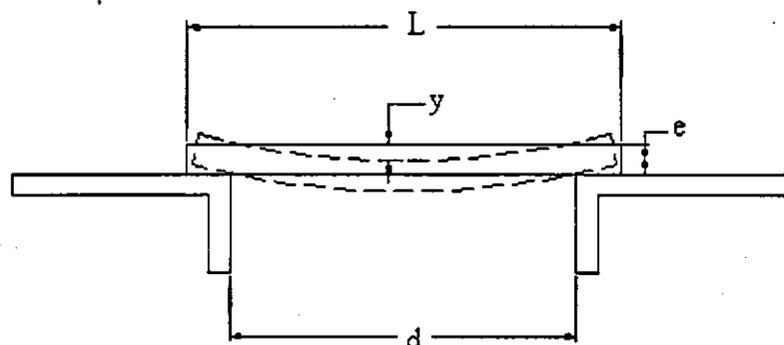


FIGURA 5.3 – Dimensões das lâminas e forma de apoio.

TABELA 5.2 – Dimensões das lâminas.

Amostra de lâminas	L (mm)	e (mm)	b (mm)	d (mm)	Flecha y(mm)
LT	56,67	3,03	5,93	47,5	1,61
LL1	47,0	4,07	5,24	39,85	1,0
LL2	64,9	4,03	5,67	53,2	0,7

As lâminas LL1 e LL2 foram retiradas do lingote fabricado no LaMMEA. Seus resultados de variação de resistência elétrica, ensaios de geração de força, microscopia ótica e microdureza foram comparados com os resultados de uma lâmina retirada de lingote fabricado pela Tréfinmetaux Centre Recherche (França), fabricada por processo de fusão e conformação mecânica (CLÉMENT; NAUDOT; WELTER, 1991).

O nível de temperatura máximo atingido durante os ensaios ficou em torno de 250 °C, com algumas variações provocadas por deficiência no processo de aquecimento feito com soprador térmico. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram os resultados da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo para as lâminas LT, LL1 e LL2. Constatou-se que a lâmina LT levou ao maior nível de carga gerada para a mesma faixa de temperatura, enquanto que nas lâminas LL1 e LL2 o nível de carga foi bem inferior devido às suas menores flechas, conseqüentemente menor deformação pseudoplástica a ser recuperada. Nas Figuras 5.5 e 5.6 a carga atingiu um pequeno patamar com tendência de estabilização em um nível máximo de carga, não

sofrendo mais aumento com a temperatura. Na amostra LT não foi atingido um patamar de carga como mostra a Figura 5.4.

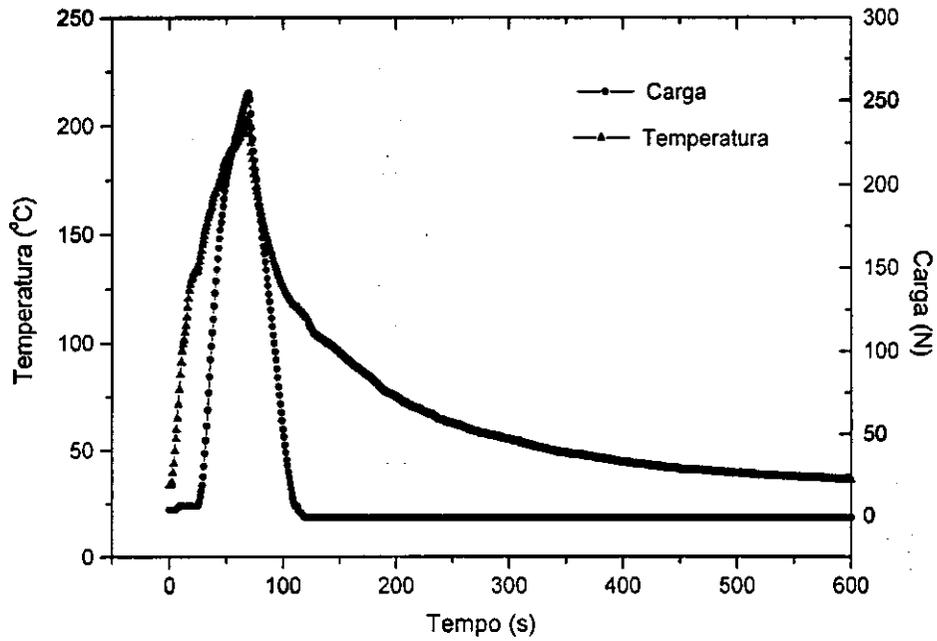


FIGURA 5.4 – Curva da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo. 6º ciclo para a lâmina LT.

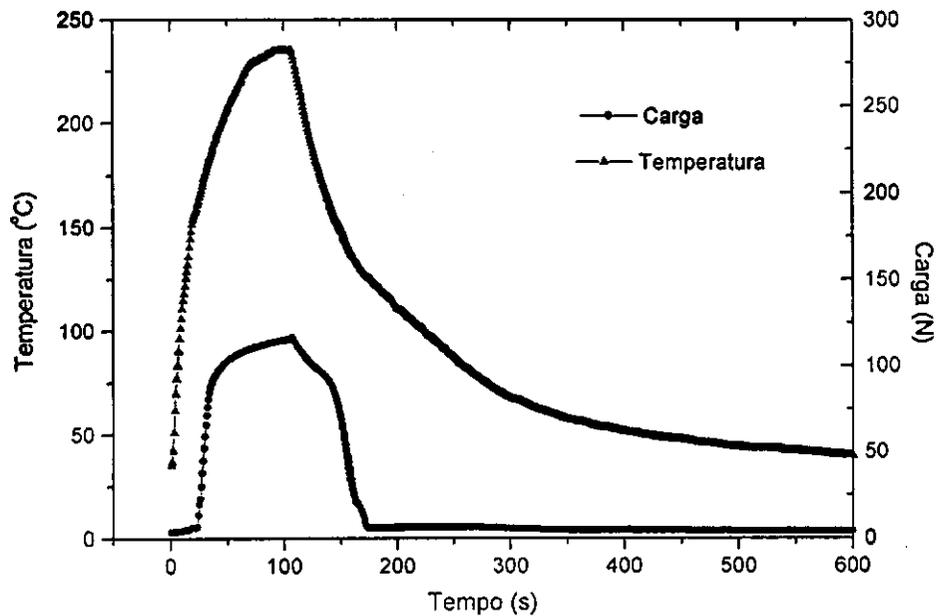


FIGURA 5.5 - Curva da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo. 10º ciclo para a lâmina LL1.

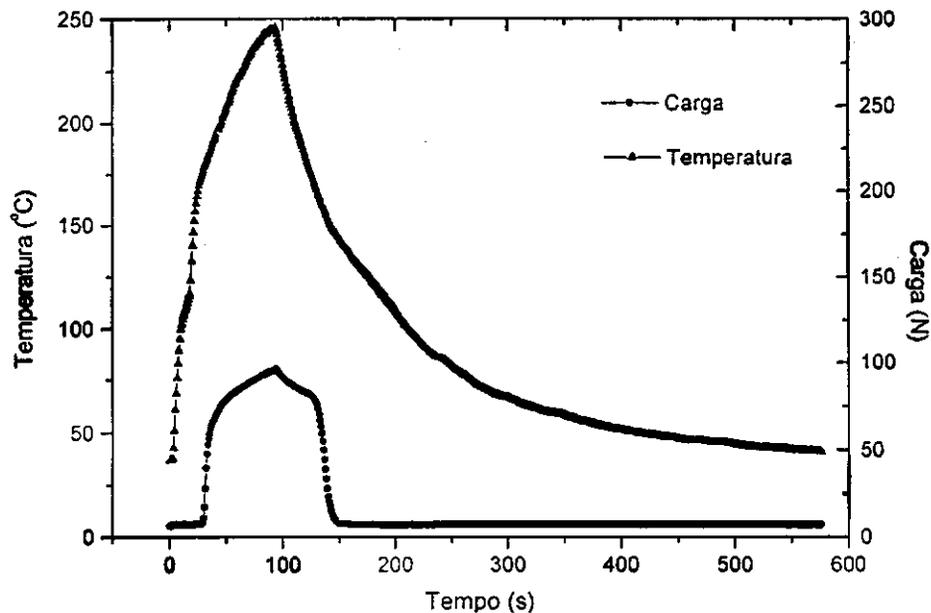


FIGURA 5.6 - Curva da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo. 12º ciclo para a lâmina LL2.

Quando os valores de temperatura e carga gerada mostrados nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 são colocados um em função do outro, obtêm-se laços de histerese carga versus temperatura (N-T) semelhantes aos das Figuras 5.7 e 5.8 para os 6º e 7º ciclos, respectivamente, da liga LT. Verifica-se nas Figuras 5.7 e 5.8 que o nível de carga gerada atingiu valores tão altos quanto 270 N para uma temperatura máxima da ordem de 210 °C. Essas figuras mostram também que as curvas N-T da lâmina LT apresentam uma histerese térmica média de aproximadamente 30 °C, bastante superior aquela medida no laço R-T sem carga que foi de 10 °C, conforme se verifica na Figura 5.2.

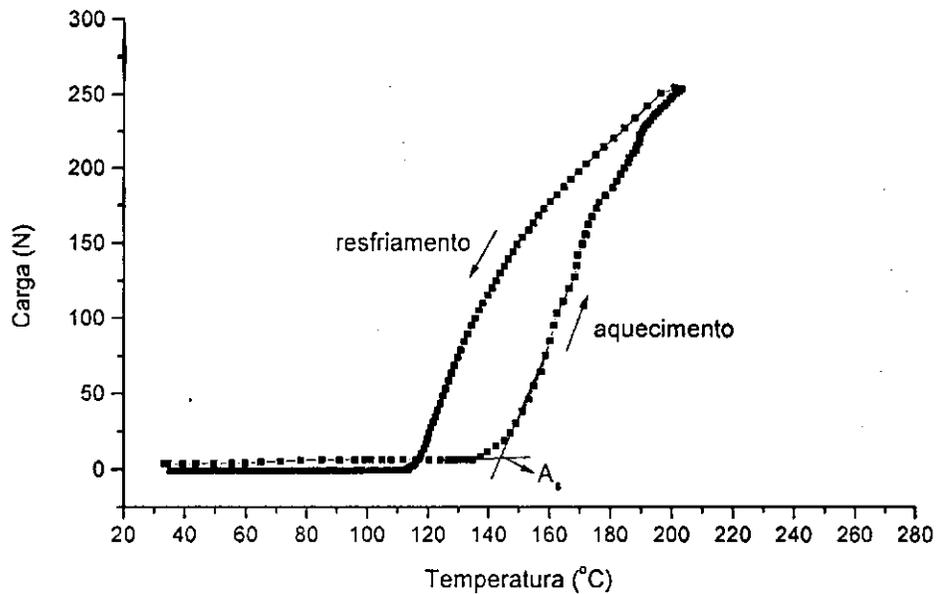


FIGURA 5.7 – Curva do 6º ensaio de geração de força da lâmina LT.

As temperaturas A_s medidas a partir dos laços N-T conforme indicados nas Figuras 5.7 e 5.8 são traçados em função do número de ciclos na Figura 5.9. Essa figura revela que a temperatura A_s medida a partir dos resultados de carga gerada em função da temperatura é superior aquela da Tabela 5.1. Isso acontece porque sob carga as temperaturas de transformação das LMF aumentam linearmente de acordo com uma lei de Clausius – Clayperon modificada (OTSUKA, WAYMAN, 1998). O aumento de A_s com o número de ciclos revelado pela Figura 5.9 pode ser atribuído ao aumento espontâneo da flecha da lâmina LT no decorrer dos ensaios.

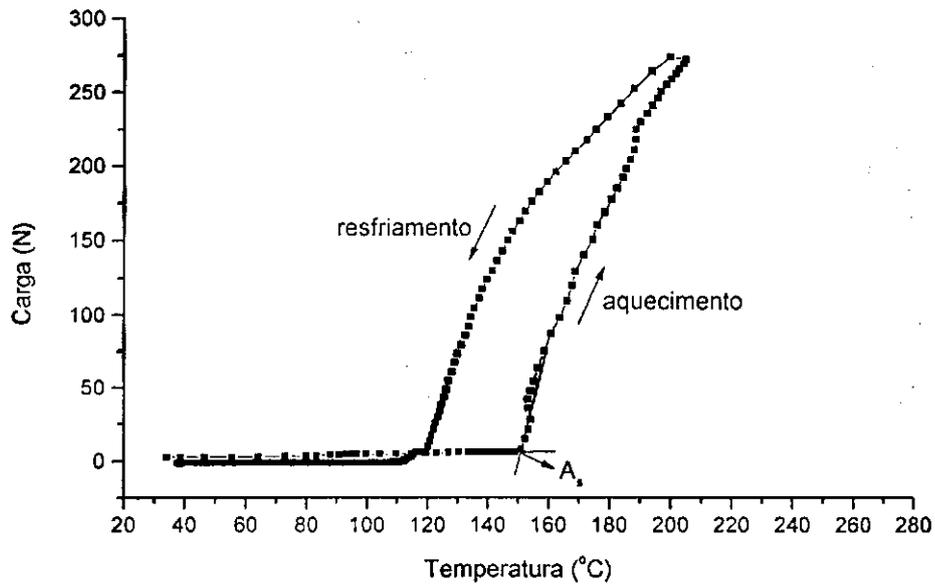


FIGURA 5.8 - Curva do 7º ensaio de geração de força da lâmina LT.

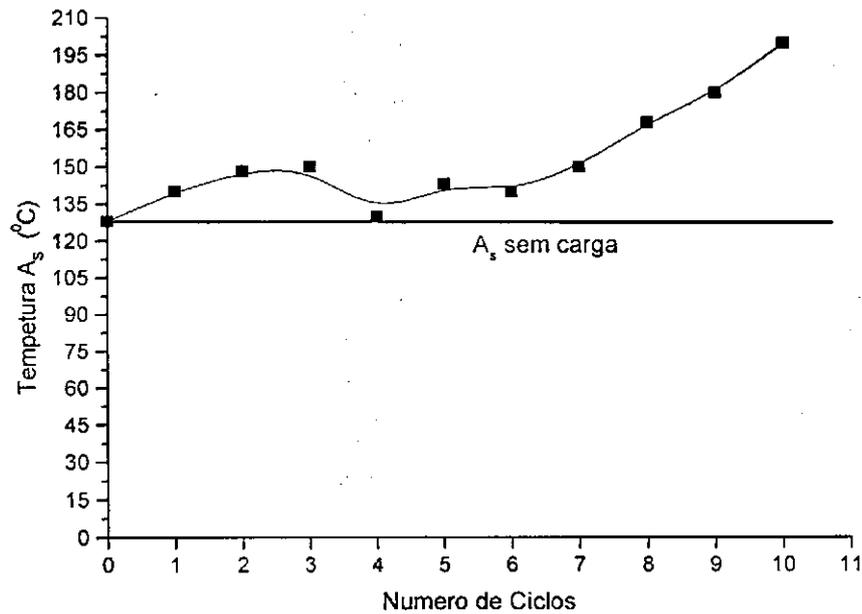


FIGURA 5.9 – Temperatura de transformação A_s em função do número de ciclos, lâmina LT.

A lâmina LT apresentou EMFR após as ciclagens, assumindo uma forma reta para temperatura superior a A_f e a forma fletida na temperatura ambiente. As ligas a base de cobre desenvolvem o EMFR em um menor número de ciclos comparadas com as ligas Ni-Ti (OTSUKA, WAYMAN, 1998).

Após os ensaios de geração de força foi realizado um ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura, conforme mostra a Figura 5.10. O comportamento obtido é praticamente idêntico aquele mostrado na Figura 5.2 para a mesma lâmina antes das ciclagens termomecânicas

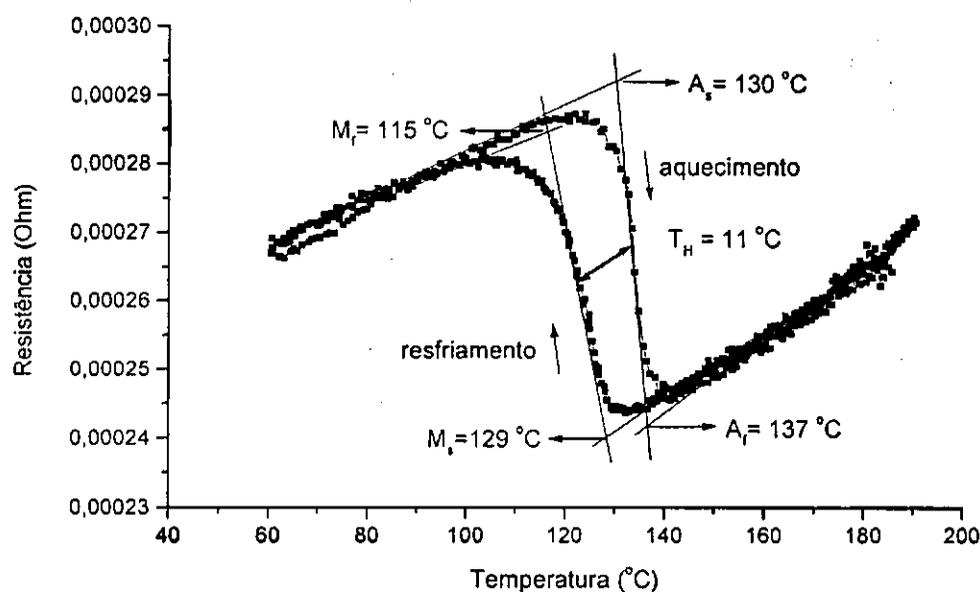


FIGURA 5.10 – Ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura para lâmina LT após carga.

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram os laços N-T referentes, respectivamente, aos 10º e 13º ciclos de geração de carga em função da temperatura para a lâmina LL1. Essas figuras revelam que cargas da ordem de 125 N são geradas quando uma temperatura máxima de 230 °C é atingida. Comparativamente com a lâmina LT, verifica-se que os laços N-T da lâmina LL1 mostram uma tendência de estabilização da carga gerada para temperaturas entre 190 e 230 °C, fenômeno não observado na lâmina LT (Figuras 5.7 e 5.8), apesar da mesma ter gerado o dobro de carga da lâmina LL1.

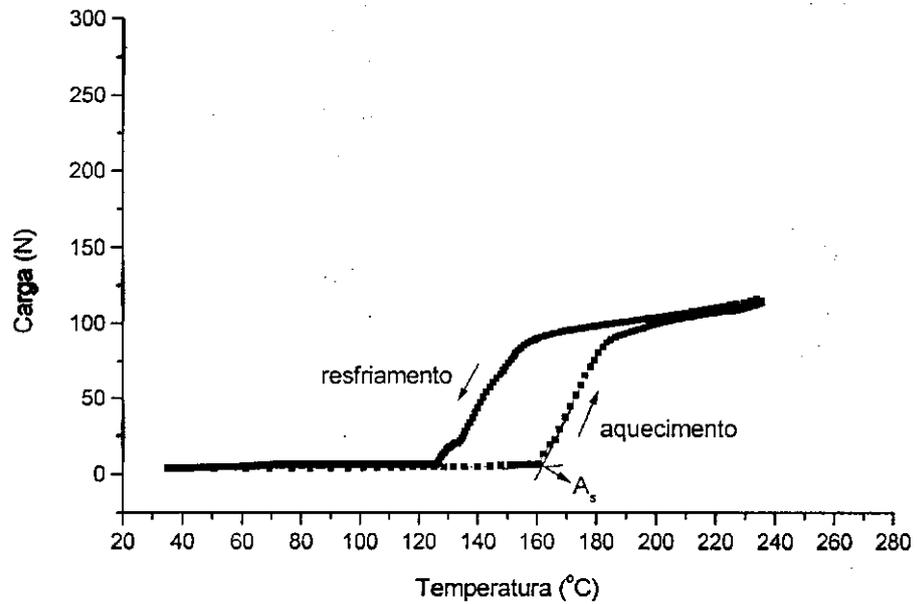


FIGURA 5.11 – Curva do 10º ensaio de geração de força da lâmina LL1.

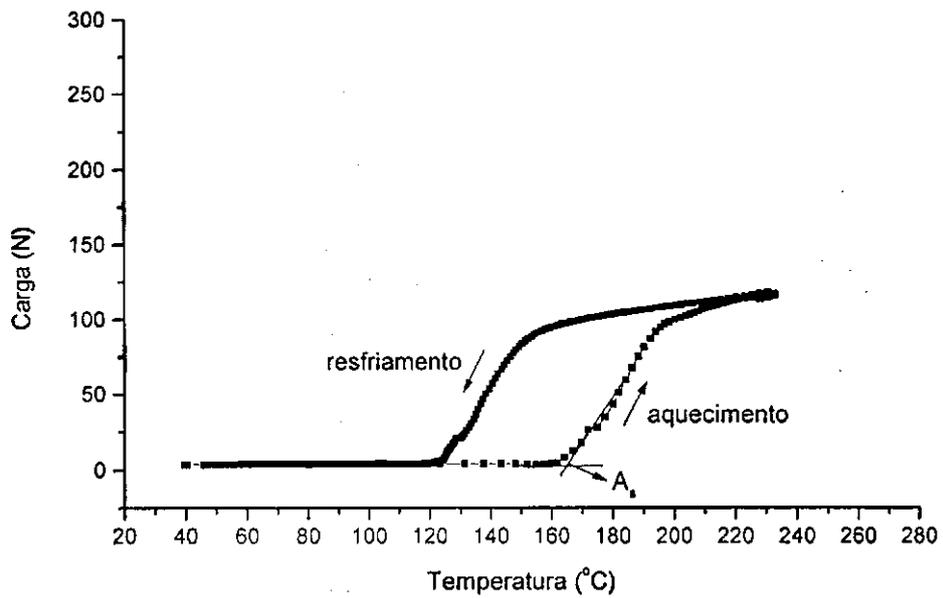


FIGURA 5.12 – Curva do 13º ensaio de geração de força da lâmina LL1.

A Figura 5.13 mostra o comportamento da temperatura A_s medida a partir dos laços de geração de carga. Comparativamente com a lâmina de origem industrial LT (Figura 5.9), observa-se uma melhor estabilidade de A_s em função do número de ciclos.

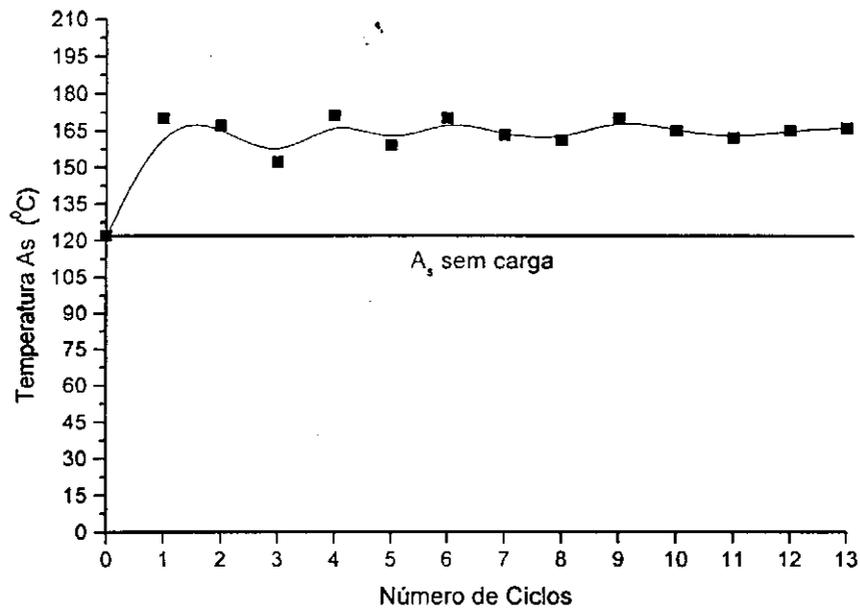


FIGURA 5.13 – Temperatura de transformação A_s em função do número de ciclos, lâmina LL1.

A Figura 5.14 mostra um resultado típico de variação de resistência elétrica em função da temperatura realizada concomitantemente com o ensaio de geração de carga. A curva correspondente à região de aquecimento é bastante perturbada pelo fluxo de ar quente usado para ativar a lâmina.

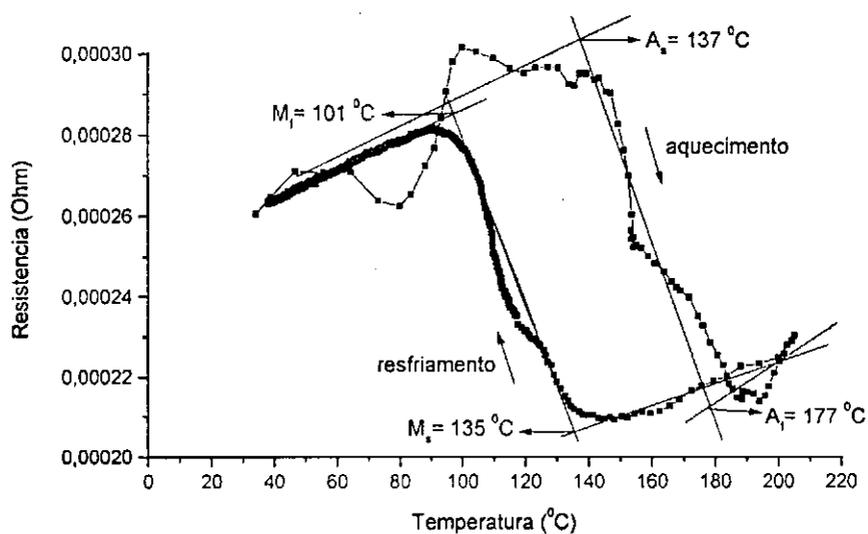


FIGURA 5.14 – Ensaio de variação de resistência em função da temperatura sob carga, lâmina LL1.

A Figura 5.15 compara os valores das temperaturas de transformação medidas a partir dos laços de resistência elétrica com e sem carga (Figuras 5.14 e 5.1). Como era de se esperar, as temperaturas obtidas sob carga são superiores aquela proveniente dos ensaios sem carga, exceto para o caso da temperatura M_f .

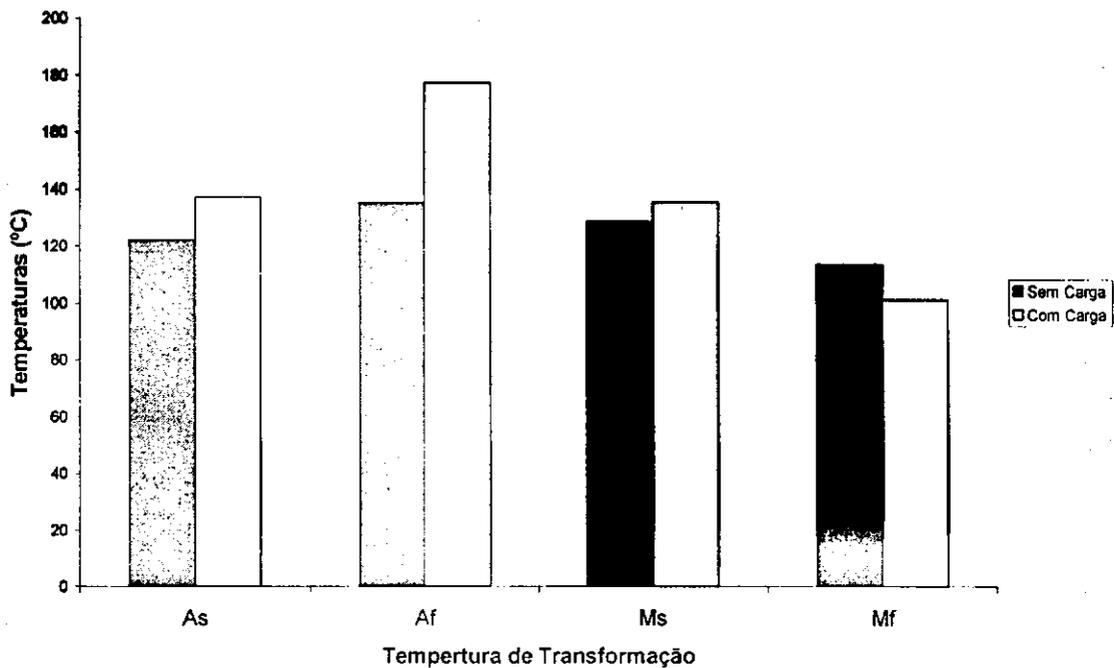


FIGURA 5.15 – Valores das temperaturas de transformação da lâmina LL1, realizados com carga e sem carga.

Os resultados obtidos para a lâmina LL2 foram bastante semelhantes aos da lâmina LL1. Conforme mostram as Figuras 5.16, 5.17 e 5.18, a carga tende a manter-se constante após atingida a temperatura A_f e a temperatura A_s é maior que o valor medido no ensaio de resistência elétrica em função da temperatura sem carga. No entanto os valores das temperaturas A_s foram superiores aos da lâmina LL1, conforme demonstra uma comparação com as Figuras 5.18 e 5.13. Vale ressaltar que não foi observado aumento da flecha (y) no decorrer da ciclagem.

As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam os resultados de dois ensaios de geração de carga realizados, o primeiro corresponde ao 3º e o segundo ao 12º ciclo.

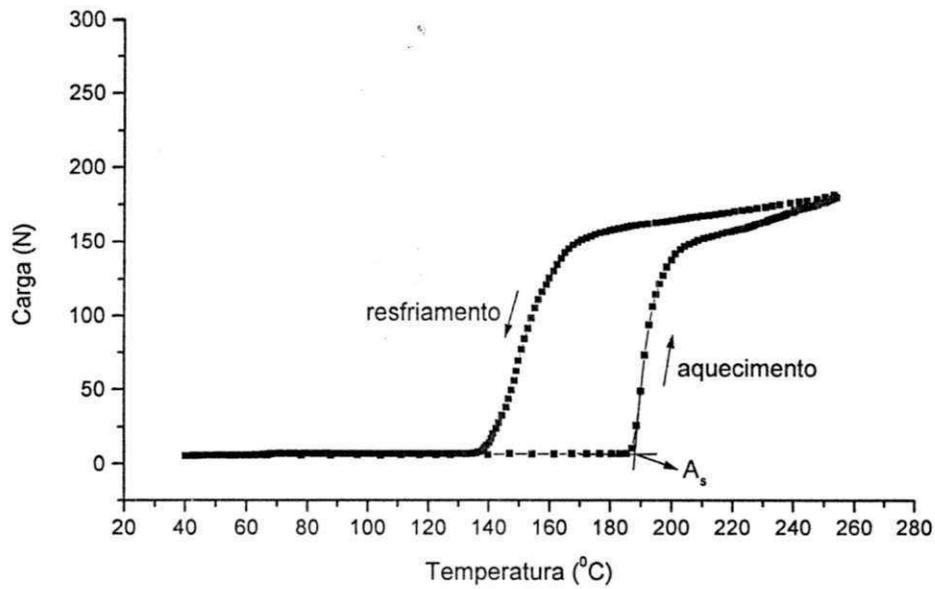


FIGURA 5.16 – Curva do 3º do ensaio de geração de força da lâmina LL2.

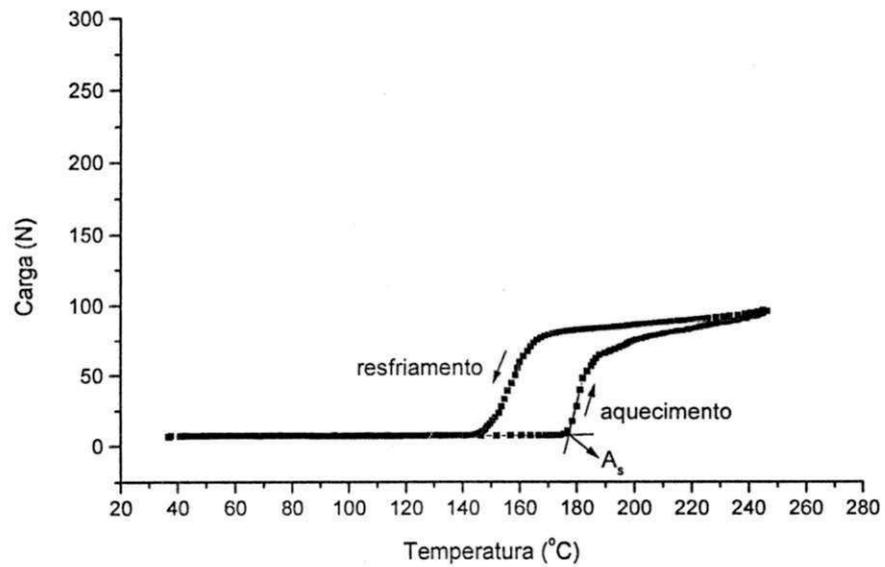


FIGURA 5.17 – Curva do 12º do ensaio de geração de força da lâmina LL2.

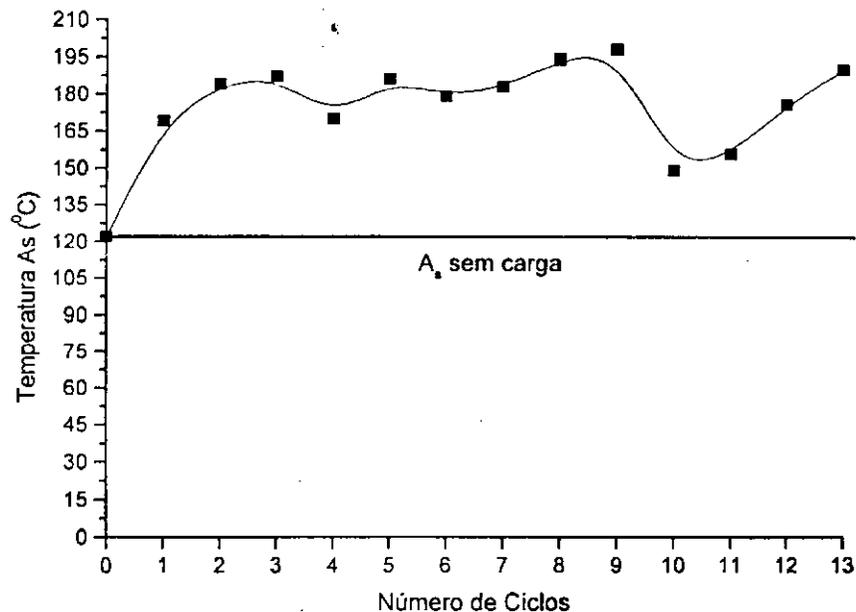


FIGURA 5.18 – Temperatura de transformação A_s em função do número de ciclos, lâmina LL2.

Vale ressaltar que ensaios de geração de força em modo de flexão semelhantes ao realizado neste trabalho são dificilmente encontrados na literatura, de modo que foi impossível realizar comparações claras com trabalhos desenvolvidos por outros autores.

Para estabelecer um bom critério de comparação entre lâminas, seria necessário um lote com mesmas dimensões, obtidas pelo mesmo processo de fundição e mesmo processo pós-fundição, seja ele de usinagem ou conformação mecânica. O processo de usinagem não é ideal, pois produz sulcos, concentradores de tensões, que reduz a resistência à flexão das lâminas. Por outro lado, o aquecimento deveria ser realizado em banho térmico para proporcionar uma ativação mais lenta e eliminar a perturbação do fluxo de ar quente.

A liga em estudo, com 13,5% Al, tem alta fragilidade devido à provável formação da fase martensítica γ' (PICORNELL, et al., 1999). As deformações aplicadas nas amostras de lâminas foram mínimas, deformações maiores foram tentadas, mas não suportadas e a fratura ocorreu sempre no centro da lâmina onde o momento fletor é máximo. Mesmo com mínimas deformações aplicadas e os concentradores de tensão, as lâminas LL1 e LL2 geraram cargas correspondentes a 50% daquelas geradas pela lâmina LT, e também suportaram as ciclagens termomecânicas adequadamente. A

lâmina LT desenvolveu cargas mais elevadas, mas a flecha inicial que foi de 1,61 mm elevou-se no decorrer dos ensaios mantendo-se sempre superior a das lâminas LL1 e LL2, levando a uma geração de carga mais importante, pois maior quantidade de deformação tinha que ser recuperada. A lâmina LL2 tem dimensões maiores que a lâmina LT, mas menor flecha, gerando assim menor carga.

Para uma possível aplicação em proteção contra sobrecargas elétricas é necessário um elemento atuador capaz de gerar força na recuperação da forma que possa vencer algum outro elemento que possa vir a trabalhar em oposição, como uma mola clássica, por exemplo.

5.3 Microscopia Ótica

Na microscopia ótica foram observados o tamanho médio de grão, o contorno do grão e a microestrutura em termos da formação de variantes de martensita. Em todas as amostras analisadas foi identificada a presença da microestrutura martensítica. As Figuras 5.19 e 5.20 revelam variantes de martensita clássicas em forma de “zig-zag” e agulhas finas paralelas, comumente observadas na literatura (AYDOGDU; AYDOGDU; ADIGUZEL, 2002). Os grãos são relativamente grosseiros, com tamanho médio situado entre 550 e 600 μm .

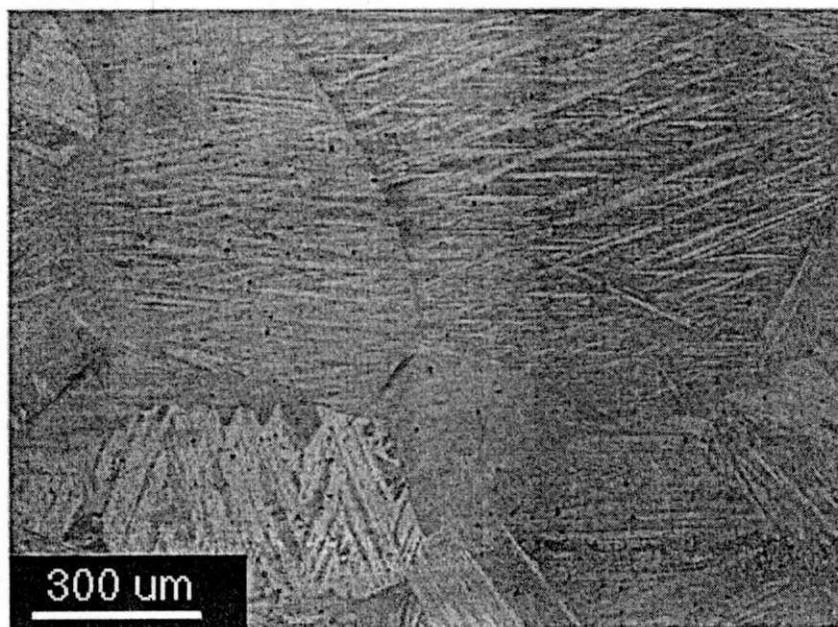


FIGURA 5.19 – Microestrutura martensítica da lâmina LT. Aumento 50 X.

A Figura 5.20 mostra a estrutura martensítica da liga LL1. Em ambas as ligas verificou-se a presença da estrutura martensítica de grãos grosseiros. Segundo OTSUKA, WAYMAN (1998), ligas Cu-Al-Ni podem ter tamanhos de grão em torno de 1 mm, valor que pode ser bastante reduzido com uso de elementos refinadores de grão como o titânio (aproximadamente 15 μm).

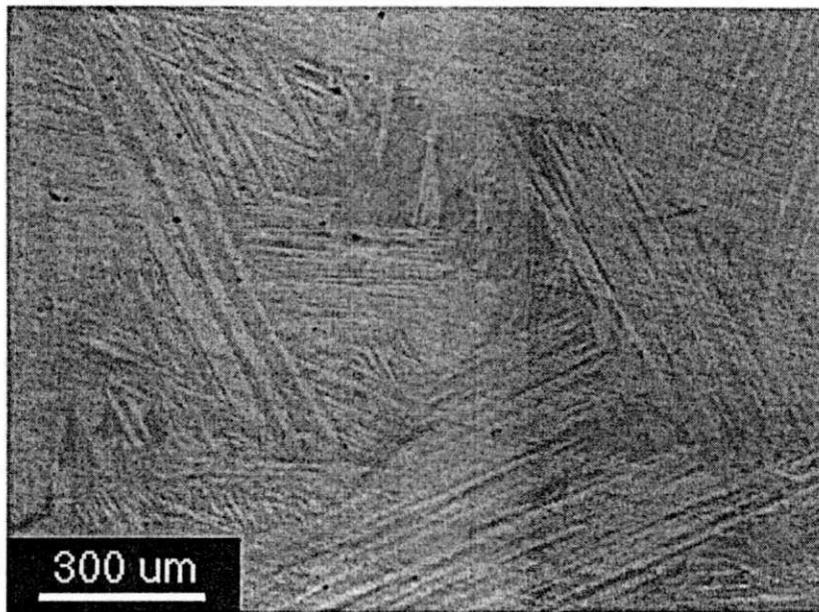


FIGURA 5.20 – Microestrutura martensítica da lâmina LL1. Aumento 50 X.

5.4 Ensaios de Microdureza

Foi medida a microdureza Vickers das lâminas LT e LL1 e comparados os seus valores. Essas medidas foram feitas no centro do grão, próximo ao contorno e no contorno de grão.

A lâmina LT apresentou dureza média de 245 HV. No centro do grão foi obtido valor médio de 270 HV, próximo ao contorno esse valor caiu para 208 HV e no contorno do grão esse valor cai drasticamente atingindo valores da ordem de HV 78. Esse gradiente de dureza pode justificar a fratura intergranular (OTSUKA, WAYMAN, 1998), muitas vezes observadas nas ligas Cu-Al-Ni devido a presença da fase martensítica γ' (PICORNELL et al., 1999). A Figura 5.21 mostra uma foto das impressões feitas próximo ao contorno e exatamente no contorno de grão para a liga LT.

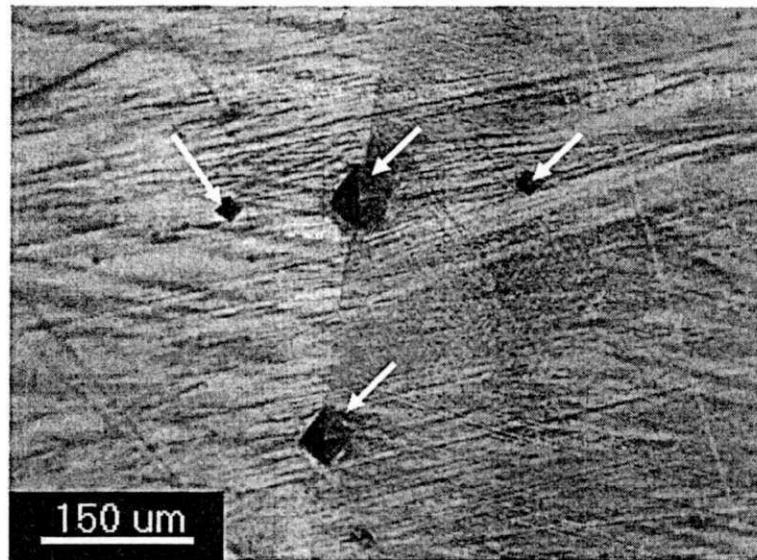


FIGURA 5.21 – Impressões do ensaio de microdureza. Aumento 100 X, lâmina LT.

Percebe-se pela foto da Figura 5.21 que a impressão da penetração no contorno de grão é muito maior que a impressão próxima ao contorno, demonstrando sua menor dureza.

A amostra da lâmina LL1 apresentou resultados de microdureza bastante semelhantes aos da lâmina LT. A dureza média foi de 250 HV, sendo maior no centro do grão 280 HV e menor no contorno 75 HV.

Na literatura não encontrou-se valores de microdureza para a liga Cu-Al-Ni com composição química e tamanho de grão próximo ao da liga em estudo para serem comparados. Em trabalhos desenvolvidos paralelamente no LaMMEA com ligas da mesma composição química e fabricadas por processo de fundição ao ar e fundição por plasma, confirmou-se a microdureza média em torno de 250 HV (DA SILVA et al., 2006).

6 ANÁLISE SIMPLIFICADA SOBRE A POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO DA LIGA Cu–Al–Ni PARA PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGAS ELÉTRICAS

Conforme verificado durante a caracterização térmica por variação de resistência elétrica em função da temperatura, a liga Cu–Al–Ni estudada inicia sua mudança de forma a $A_s = 122 \text{ °C}$ e termina a $A_f = 135 \text{ °C}$. Na aplicação pretendida, o aquecimento ocorre por efeito Joule devido à passagem de corrente elétrica que leva o material a atingir a zona de transformação e, portanto, de mudança de forma entre A_s e A_f .

Para avaliação da ativação de lâminas Cu–Al–Ni até a faixa de transformação ($A_s \leftrightarrow A_f$) foi desenvolvido um modelo térmico simplificado para permitir a realização de uma série de simulações numéricas. Esse modelo não considera a transformação de fase sofrida pelo material, cuja influência pode ser analisada no trabalho de BRAILOVSKI; TROCHU; DAIGNEAULT (1996).

6.1 Modelagem Matemática

Considere a lâmina esquematizada na Figura 6.1, com suas dimensões, comprimento “L”, base “b” e espessura “e”.

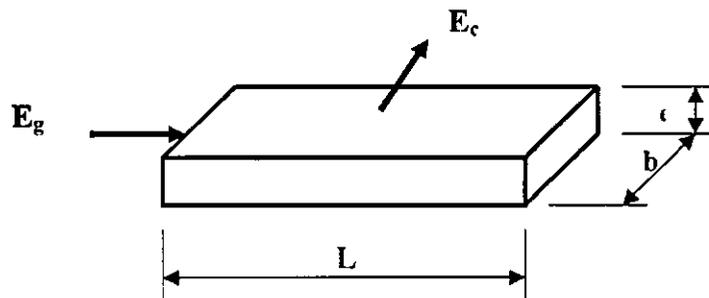


FIGURA 6.1 - Desenho esquemático com as dimensões da lâmina e o balanço de energia.

Para simplificar o problema, considerar-se-á aumento uniforme de temperatura, a troca de calor por radiação desprezível, dilatação térmica negligenciável, condução unidimensional e ausência de variação da resistência elétrica com a temperatura. Fazendo-se o balanço de energia, resulta em:

$$E_g - E_c = \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (5)$$

Em que :

E_g : Energia gerada;

E_c : Energia trocada por convecção natural;

$\frac{\Delta U}{\Delta t}$: Variação de energia interna na lâmina.

A energia gerada é devido a passagem da corrente elétrica e corresponde:

$$E_g = RI^2 \quad (6)$$

Em que:

R: Resistência elétrica do material;

I: Corrente elétrica.

A energia trocada por convecção natural equivale a :

$$E_c = A_l h(T - T_\infty) \quad (7)$$

Em que:

A_l : Área lateral da lâmina;

h: Coeficiente de convecção;

T: Temperatura na lâmina;

T_∞ : Temperatura ambiente.

A variação de energia interna corresponde a

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = mC_p \frac{dT}{dt}, \quad (8)$$

Em que:

m: Massa da lâmina;

C_p : Calor específico a pressão constante;

$\frac{dT}{dt}$: Taxa variação da temperatura.

Substituindo estes valores na equação na Equação (5), tem-se:

$$RI^2 - hA_l (T - T_\infty) = mC_p \frac{dT}{dt}. \text{ Fazendo-se uma mudança de variável}$$

$\theta = T - T_\infty$ e substituindo na equação anterior tem-se:

$$\frac{d\theta}{dt} - \frac{hA_l}{mC_p} \theta = \frac{RI^2}{mC_p};$$

Resolvendo-se a equação diferencial linear não homogênea tem-se:

Solução da homogênea: $\theta_H = c \exp\left(\frac{-hA_l}{mC_p}t\right)$, onde c é uma constante de

integração;

Solução particular: $\theta_p = \frac{RI^2}{hA_l}$;

Solução geral: $\theta = c \exp\left(\frac{-hA_l}{mC_p}t\right) + \frac{RI^2}{hA_l}$; (9)

Estabelecendo-se as condições de contorno, para tempo inicial t=0 a temperatura na lâmina é igual a temperatura ambiente, substituindo na Equação (9) tem-se a constante c:

$$c = \frac{-RI^2}{hA_l}.$$

A equação para taxa de variação da temperatura no aquecimento é:

$$T = T_\infty + \frac{RI^2}{hA_l} \left(1 - \exp\left(\frac{-hA_l}{mC_p}t\right)\right) \quad (10)$$

Para o resfriamento a geração de energia é nula, pois não há passagem de corrente elétrica pela lâmina. Assim da Equação (5), tem-se que

$$-E_c = \frac{\Delta U}{\Delta t}, \text{ substituindo os valores de } E_c \text{ e } \frac{\Delta U}{\Delta t}, \text{ tem-se:}$$

$$-hA_l(T - T_\infty) = mC_p \frac{dT}{dt}, \text{ substituindo } \theta = T - T_\infty \text{ e resolvendo a equação por}$$

separação de variáveis tem-se: $\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{hA_l}{mC_p} dt$. Integrando com θ variando de θ_0 a θ

e o tempo de t_0 a t, $\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = -\int_{t_0}^t \frac{hA_l}{mC_p} dt$, tem-se: $\theta = \theta_0 \exp\left(\frac{-hA_l}{mC_p}(t - t_0)\right)$, onde t_0 é o

tempo para ao qual a lâmina teve seu aquecimento máximo, $\theta_0 = (T_0 - T_\infty)$, T_0 é a

temperatura máxima atingida. Substituindo estes valores, a equação para taxa de variação da temperatura no resfriamento resume-se a:

$$T = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty}) \exp\left(\frac{-hA_l}{mC_p}\right)(t - t_0) \quad (11)$$

Estas equações podem expressar a temperatura em função da geometria da lâmina, pois a massa, a resistência elétrica e a área lateral dependem das dimensões da lâmina.

6.2 Simulação Numérica

Algumas simulações numéricas foram realizadas utilizando o programa MATLAB. Para estas simulações foram considerados os seguintes valores para os parâmetros e propriedades:

- Calor específico: $C_p=380$ W/kg °C; (OTSUKA, WAYMAN, 1998)
- Coeficiente de convecção: $h=10$ W/m²K; (INCROPERA, DE WITT, 2003);
- Temperatura ambiente: $T_{\infty} = 27$ °C.

Medidos experimentalmente:

- Massa específica: $d=7100$ kg/m³;
- Resistividade elétrica: $r_0=1,13 \times 10^{-7}$ Ωm.

Primeiramente foi estudada a taxa de variação da temperatura para diversas geometrias. Estabeleceu-se o comprimento $L = 40$ mm, a espessura $e = 1$ mm e a corrente elétrica constante $I = 20$ A e o único parâmetro variado foi a base “b” da lâmina. Foram testados quatro valores para a base, **2 mm, 5 mm, 5,97 mm e 10 mm**. A Figura 6.2 mostra o comportamento da temperatura em função do tempo para esse caso.

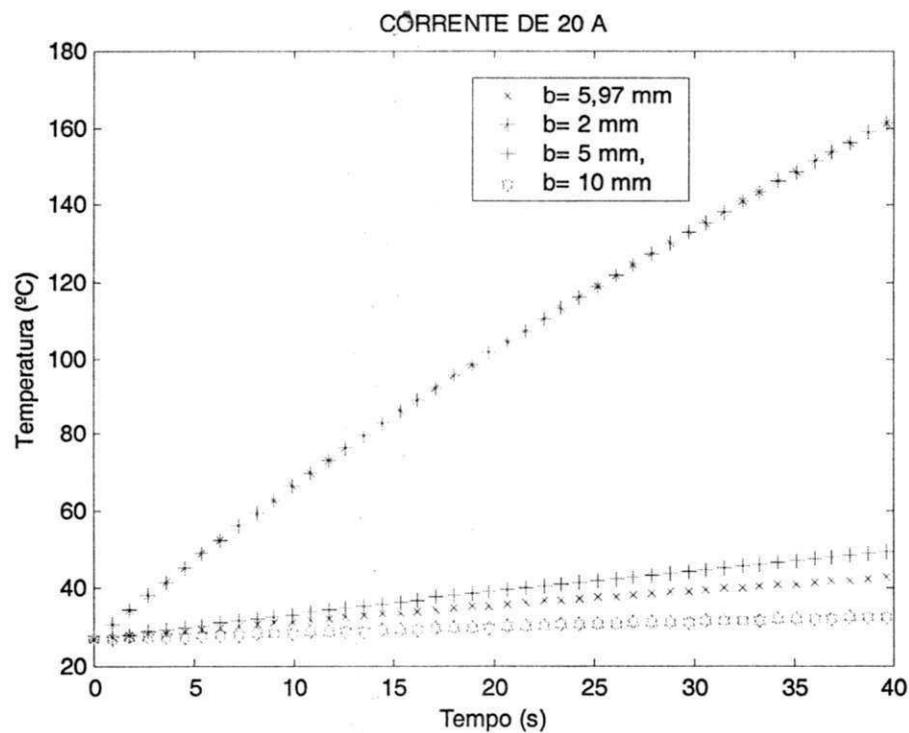


FIGURA 6.2 - Variação da temperatura em função do tempo para diversas geometrias e corrente de 20A.

A Figura 6.3 mostra a faixa de temperatura de atuação da lâmina, limite inferior sem carga $A_f = 135$ °C e limite superior com carga, tomado o valor médio para A_f com carga de 170 °C.

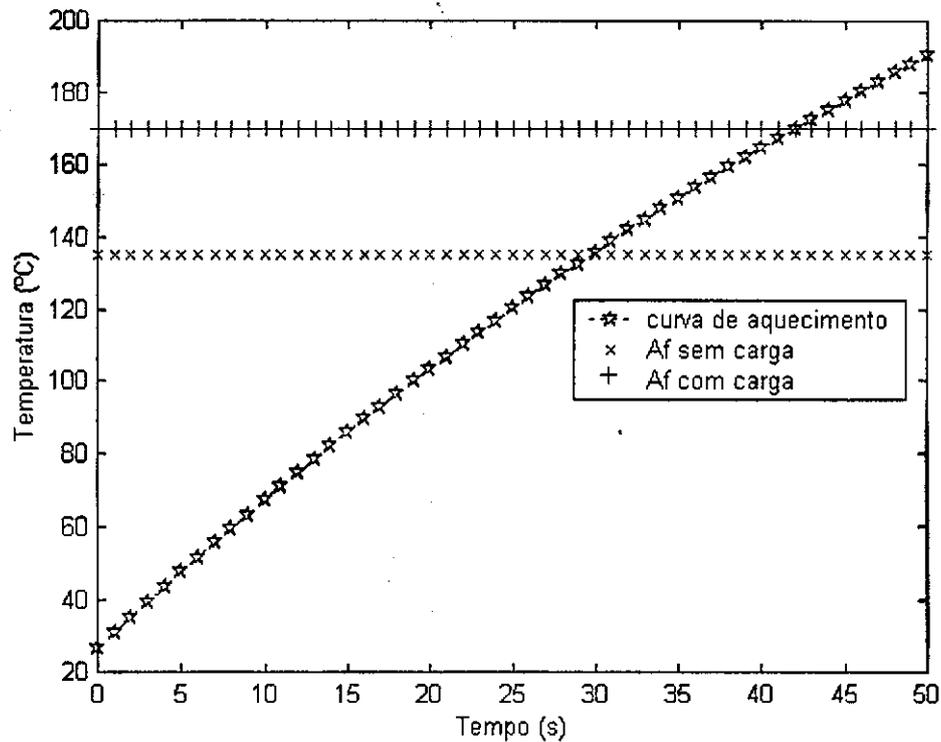


FIGURA 6.3 - Faixa de temperatura de atuação da lâmina com carga e sem carga.

Como era de se esperar a dimensão da base $b=2$ mm fornece o melhor tempo de resposta, a temperatura de transformação é atingida em 29,45 s.

6.3 Proteção Contra Sobrecarga Elétrica

Os relés de sobrecarga bimetalicos, marca SIEMENS, modelo 3RU11 até 100 A são destinados para a proteção de cargas com partida normal contra aquecimento indevido causado por sobrecarga ou falta de fase. Uma sobrecarga ou uma falta de fase causa uma elevação da corrente nos motores, acima do ajuste da corrente nominal do motor. Esta elevação de corrente aquece as tiras dos elementos bimetalicos que se encontram no interior do relé de tal forma que, ao se curvarem, acionam um mecanismo de disparo que atuará sobre os contatos auxiliares. Os contatos desligarão a carga através de um contactor. O tempo de desligamento é função da corrente ajustada e esta é função da corrente nominal cuja relação está representada na curva de disparo da Figura 6.4.

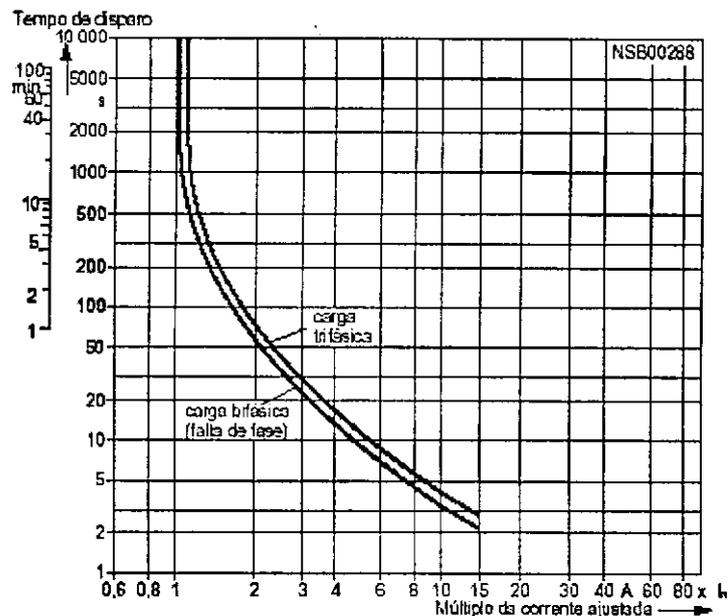


FIGURA 6.4 - Curva de disparo de um relé de sobrecarga bimetalico. Fonte: Catálogo Siemens.

Para uma corrente ajustada de 20 A o relé atuará em 50 s para uma corrente de $2 \times I_n$ que equivale a 40 A em falta de fase. Para carga trifásica, o tempo de atuação é de 75 s, tempo esse muito superior aquele estimado para atuação da lâmina com EMF que foi de 29,45 s para uma corrente de 20 A.

Esta análise é conservadora, pois a mudança de forma inicia-se ao ser atingida a temperatura A_s . Na realidade, para essa corrente a lâmina não deve fletir e acionar o contactor, pois essa corrente de 20 A é a corrente nominal de trabalho do motor, essa análise serve para demonstrar a eficiência de uma lâmina de LMF atuando nesse tipo de proteção. Vale ressaltar que para o projeto de um dispositivo desse tipo devem ser levados em consideração vários outros parâmetros elétricos.

6.4 Perfil de Temperatura na Lâmina

Com base nas Equações (10) e (11), foram traçados os comportamentos da variação de temperatura da lâmina em função do tempo. A Figura 6.5 mostra o perfil de temperatura para o aquecimento até ser atingida a temperatura A_f e o posterior resfriamento. O perfil exponencial não fica evidenciado porque no aquecimento a temperatura é atingida em curto intervalo de tempo.

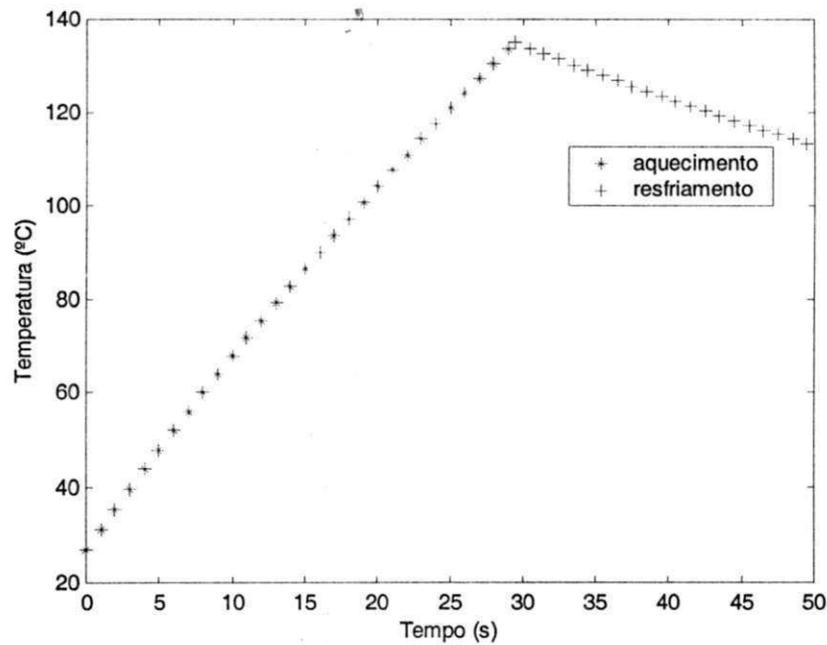


FIGURA 6.5 - Perfil de temperatura na lâmina para o aquecimento e resfriamento.

Na Figura 6.6 o perfil exponencial fica bem evidenciado, pois a variação da temperatura é traçada até ser atingido o regime permanente. Esse perfil de temperatura no resfriamento é idêntico ao obtido na curva de resfriamento experimental das Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. As curvas experimentais apresentam um pequeno desvio no resfriamento devido à transformação de fase. A curva teórica não apresenta esse comportamento, pois no modelo matemático a transformação de fase é desconsiderada.

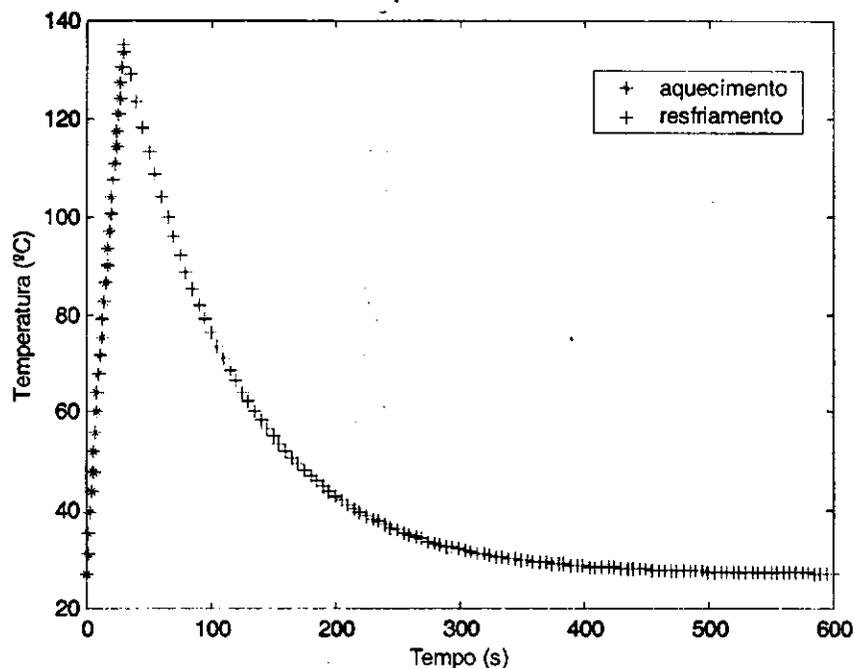


FIGURA 6.6 - Perfil de temperatura na lâmina para o aquecimento e resfriamento com regime permanente.

A curva de aquecimento e resfriamento obtida com soprador térmico mostrada na Figura 5.4 pode ser simulada utilizando o modelo matemático, determinando assim a corrente necessária para aquecer a lâmina até a temperatura desenvolvida em função do tempo com o soprador térmico.

A simulação foi realizada para a lâmina LT, pois essa apresenta geometria mais uniforme que as lâminas LL1 e LL2. A lâmina LT foi aquecida até a temperatura de 205 °C em um intervalo de tempo de 69 s. Para a simulação foi variado o tempo e determinada a temperatura alcançada em função da corrente. Foram testados diversos valores e o que mais se aproximou corresponde a uma corrente de 150 A. Para essa simulação foram utilizadas as dimensões da lâmina LT e coeficiente de convecção de 10 W/m² °C. A Figura 6.7 mostra esse resultado.

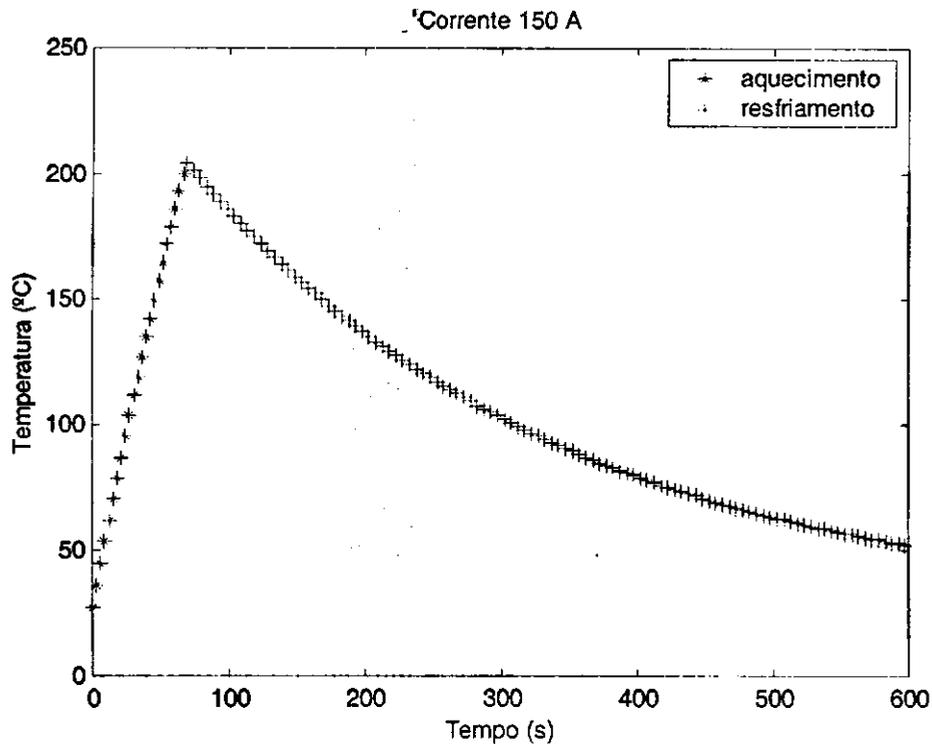


FIGURA 6.7 - Simulação para determinar a corrente elétrica de ativação da lâmina LT para obter mesmo perfil de temperatura realizado com soprador térmico, em regime permanente.

A temperatura máxima da lâmina ativada com uma corrente elétrica de 150 A é 205 °C atingida em 67,95 s. Porém para o tempo de 600s a lâmina LT já tem atingido o regime permanente como mostra a curva experimental da Figura 6.8. No entanto, na simulação numérica esse regime permanente não é atingido conforme mostra Figura 6.7, isso provavelmente devido o coeficiente de convecção adotado para essa simulação ser inferior ao coeficiente de convecção real. Segundo INCROPERA, DE WITT (2003) o coeficiente de convecção para gases em convecção livre varia entre 2 e 25 W/m² °C. Assim, utilizando-se um coeficiente de convecção de 20 W/m² °C e uma corrente elétrica de 158 A, obtêm-se um perfil de temperatura para aquecimento e resfriamento muito aproximado aquele observado experimentalmente como mostra a Figura 6.9.

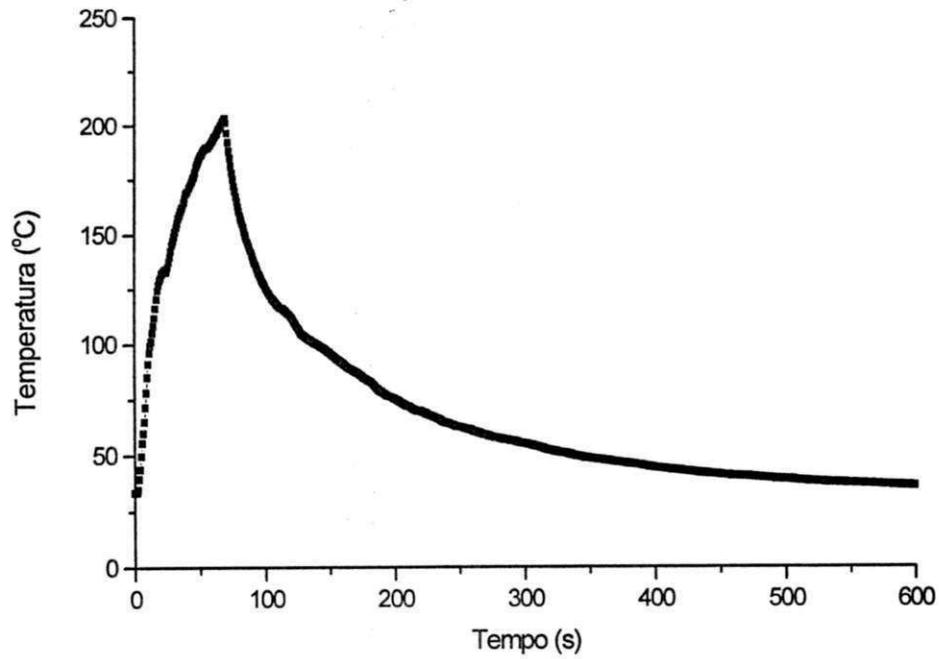


FIGURA 6.8 – Curva de aquecimento experimental.

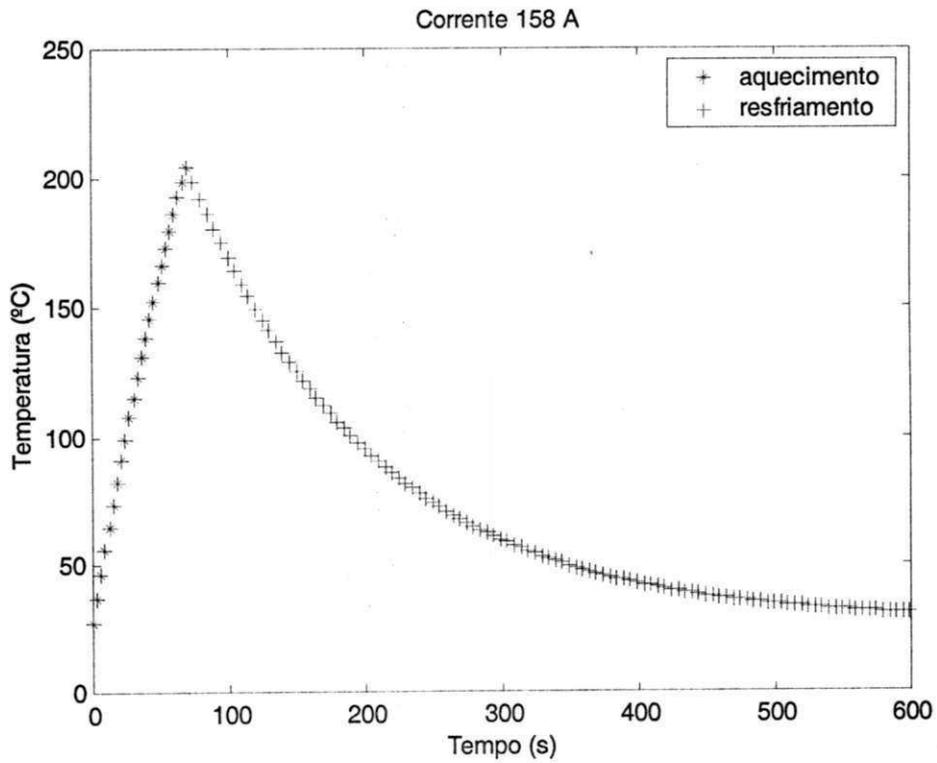


FIGURA 6.9 – Perfil de temperatura para corrente de 158 A e $h = 20 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se um estudo visando subsidiar o desenvolvimento de aplicações no setor elétrico para uma liga 82,5Cu-13,5Al-4,0Ni (% peso) com efeito memória de forma. Constatou-se que o tratamento térmico de homogeneização realizado a 900 °C por 24h melhora a ductilidade da liga. As temperaturas de transformação obtidas estão em uma boa faixa para ativação por corrente elétrica. Comparando-se os resultados obtidos com a liga desenvolvida no LaMMEA com aqueles de uma liga de origem industrial, as temperaturas de transformação verificadas através de medidas de resistência elétrica em função da temperatura confirmou valores bastante semelhantes para ambos os materiais. Foi identificada a presença de microestruturas martensíticas semelhantes, com tamanho de grão médio da ordem de 600 μm e microdureza Vickers em torno de 250 HV no centro do grão. Ambas as ligas possuem alta fragilidade que pode estar relacionada em parte a granulação grosseira ou à formação da fase martensítica γ' , limitando assim as deformações plásticas em modo de flexão.

Os ensaios termomecânicos de geração de força em função da temperatura em modo de flexão três pontos, revelaram que a força gerada em amostras de lâminas da liga industrial correspondeu ao dobro daquela observada em amostras da liga de laboratório, fato esse atribuído à diferença de deformação plástica de flexão (flecha, y) imposta as amostras, que foi de 1,6 mm na liga industrial e de 1,0 mm na liga LaMMEA. O material tem grande capacidade de geração de força e capacidade de vencer a resistência imposta por outro elemento que venha a trabalhar em oposição ao seu movimento.

A liga em estudo apresentou elevado potencial para aplicação no setor elétrico, pois as simulações numéricas desenvolvidas mostraram que o tempo de atuação de uma lâmina com efeito memória de forma pode ser inferior ao tempo de atuação proporcionado por um dispositivo bimetálico clássico disponível no mercado.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após analisados os resultados obtidos nesse trabalho, torna-se possível enumerar sugestões para trabalhos futuros, tais como:

- Estudo da melhoria da ductilidade da liga Cu-Al-Ni com memória de forma utilizando titânio como refinador de grão em processo de fusão por plasma;
- Análise da ativação elétrica experimental das lâminas da liga Cu-Al-Ni com memória de forma;
- Estudo de ligas Cu-Al-Nb obtidas em forno de indução e forno de plasma;
- Comportamento eletrotermomecânico de LMF base cobre em modo de flexão 3 pontos.

9 REFERÊNCIAS

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.

ASLANIDS, D.; SERNEELS, A.; MOORLEGHEM, W.V. Based shape memory alloy hinge for deployment applications. **Proceedings of Shape Memory and Superelastic Technologies Conference**, p.1-13,1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5410: instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 1998. 128 p.

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.

BASTIAN, F.L.; CAMINHA JÚNIOR, H.M.; MORAES, M.M. **Apostila de Mecânica da Fratura**, Rio de Janeiro: IBQN Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear, 1997. 500 p. Notas de Aulas.

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.

CLEMENT, G.; NAUDOT, P.; WELTER, J.M. Industrial processing of copper based shape memory alloys. **Journal de Physique IV**, Colloque C4, v.1, p. 109-116, 1991.

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.

DA SILVA, N.J.; SILVA, M.M.; SANTOS, M.A.; GONZALEZ, C.H.; DE ARAÚJO, C.J. Influência do uso de refinadores de grão industriais nas propriedades de ligas de cobre com memória de forma, **61º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, Rio de Janeiro, 10 p., 2006.

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.

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

FURUKAWA ELETRIC EUROPE LIMITED. **Materials – NiTi alloys**. Disponível em: <<http://www.furukawa.co.uk/nt.html>> . Acesso em 19 jan. 2006.

GONZALEZ, C.H. **Etude des Comportements Electro-thermomécaniques et de la Stabilisation Martensitique d'Alliages Monocristallins à Mémoire de Forme Base Cuivre**. 2002. 178 p. *PhD Thesis*: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

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

INCROPERA, P.F.; DE WITT, D. P. **Transferência de Calor e de Massa**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2003, 698p.

LELATKO, J.; MORAWIEC, H. The effect of Ni, Co and Cr on the primary particle structure in Cu–Al–Nb–X shape memory alloys. **Materials Chemistry and Physics**, v.81, p.472–475, 2003.

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.

MORAWIEC, H.; LELTKO, J.; KOVAL, Y.; KOLOMYTZEV, V. High-Temperature Cu-Al-Nb Shape Memory Alloy. **Materials Science Forum**, v.327-328, p. 291-294, 1999.

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

PICORNELL, C.; RAPACIOLI, R.; PONS, J.; CESARI, E. Two way shape memory effect in Cu-Al-Ni single crystals, **Materials Science Engineering**, v. 273-275, p. 605-609, 1999.

RECARTE, V.; PEREZ-SAEZ, R.B.; BOCANEGRA, E.H.; NÓ, M.L.; SAN JUAN, J. Dependence of the martensitic transformation characteristics on concentration in Cu-Al-Ni shape memory alloys. **Materials Science Engineering**, v. 273-275, p.380-384, 1999.

RECARTE, V.; PÉREZ-LANDEZÁBAL, J.I.; RODRÍGUEZ, BOCANEGRA, E.H.; NÓ, M.L.; SAN JUAN, J. Thermodynamics of thermally induced martensitic transformations in Cu-Al-Ni shape memory alloys. **Acta Materialia**, v.52, p.3941-3948, 2004.

SCHERNGELL, H.; KNEISSL, A.C. Generation, development and degradation of the intrinsic two-way shape memory effect in different alloy systems. **Acta Materialia**, v.50, p. 327-341, 2002.

SEGUI, C.; PONS, J.; CESARI, E.; MUNTASELL, J.; FONT, J. Characterization of a hot-rolled Cu-Al-Ni-Ti shape memory alloy, **Materials Science Engineering**, v. 273-275, p. 625-629, 1999.

SIEMENS, **Relés de sobrecarga bimetálicos e eletrônicos**. 44 p., 2001.

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.

SRINIVASAN, A. V.; MCFARLAND, D. M. **Smart Structures: Analysis and Design**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

ZENGIN, R.; OZGEN, S.; CEYLAN, M. Oxidation behaviour and kinetic properties of shape memory CuAl_xNi₄ (x = 13.0 and 13.5) alloys. **Thermochimica Acta**, v.414, p.79-84, 2004.

ANEXOS

ANEXO I

Programas Desenvolvidos

Programa 1: Dimensões da lâmina

```

clear all
clc
L=0.040;      %m           comprimento
h=0.001;      %m           espessura
i=20;         %A           corrente elétrica
hc=10;        %W/m2K      coeficiente de convecção
c=380;        % W/kg°C    calor específico
ro=1.13e-7;   %Ohm.m      resistividade
d=7100;       %kg/m³      densidade
To=300;       %K          temperatura inicial
t=0:0.1:40;

%para b1
b1=0.00595;  %5,95 mm    %termo que varia
R1=(ro*L/(b1*h));      %cálculo da resistência elétrica
AL1=2*h*L+(2*L*b1);    %cálculo da área lateral
m1=d*h*L*(b1);        %cálculo da massa
tt=To+((R1*i*i)/(hc*AL1)).*(1-exp((-hc*AL1)/(m1*c)).*t));
T=tt-273;
%Fim de b1
%para b2
b2=0.002 ; %2 mm        %termo que varia
R2=(ro*L/(b2*h));
AL2=2*h*L+(2*L*b2)
m2=d*h*L*(b2)
t2=To+((R2*i*i)/(hc*AL2)).*(1-exp((-hc*AL2)/(m2*c)).*t));
T2=t2-273;
%Fim de b2
%para b3
b3=0.005; %5 mm        %termo que varia
R3=(ro*L/(b3*h));
AL3=2*h*L+(2*L*b3);
m3=d*h*L*(b3);
t3=To+((R3*i*i)/(hc*AL3)).*(1-exp((-hc*AL3)/(m3*c)).*t));
T3=t3-273;
%Fim de b3
%para b4
b4=0.01; %10 mm        %termo que varia
R4=(ro*L/(b4*h));
AL4=2*h*L+(2*L*b4);
m4=d*h*L*(b4);
t3=To+((R4*i*i)/(hc*AL4)).*(1-exp((-hc*AL4)/(m4*c)).*t));
T4=t3-273;
%Fim de b3
plot(t,T,'r',t,T2,'b',t,T3,'k',t,T4,'m')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Temperatura (°C)')
title('CORRENTE DE 20 A')
legend('b= 5,97 mm','b= 2 mm','b= 5 mm','b= 10 mm')

```

Programa 2: Perfil de temperatura

```

clear all
clc
m=5.68e-4; %kg
h=10; %W/m2K
Al=2.4e-4; %m2
c=380; %calor específico
R=0.0023; %Ohm
To=27; %27 °C
t=0:0.1:50;
i=20;
T=To+((R*i*i)/(h*Al)).*(1-exp((-h*Al)/(m*c)).*t));
T1=135; %Temperatura Af sem carga
T2=170; %Temperatura Af com carga
plot(t,T,'m',t,T1,'red',t,T2,'blue')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Temperatura (°C)')
legend('curva de aquecimento','Af sem carga','Af com carga')

```

Programa 3: Perfil de temperatura com regime permanente

```

clear all
clc
m=5.68e-4; %kg
h=10; %W/m²C
Al=2.4e-4; %m²
c=380; %
R=0.0023;
%R=0.00016; %Ohm
To=27; %C
i3=20; %A
for tk=0:0.01:100;
    t3s=To+((R*i3*i3)/(h*Al)).*(1-exp((-h*Al)/(m*c)).*tk));
    if t3s-135<=0.01 ts=tk;, Tg=t3s;
end
end
ff=ts;
a=['Tempo para atingir temperatura de transformação: ',num2str(ff),'
s']
b=['Temperatura de transformação: ',num2str(Tg),' °C']
t=0:0.01:ts;
T3=To+((R*i3*i3)/(h*Al)).*(1-exp((-h*Al)/(m*c)).*t));
plot(t,T3,'r')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Temperatura (°C)')
tj=ts:0.1:50;
t1=Tg;
t32=To+(t1-To).*exp((-h*Al)/(m*c)).*(tj-ts));
c=t32(1);
mm=['Temperatura inicial de resfriamento: ',num2str(c),' °C']
hold on
plot(tj,t32)
legend('aquecimento','resfriamento')

```

Programa 4: Corrente para atuação das lâminas

```
clear all
clc
m=0.0072; %kg
h=10; %W/m²C
Al=0.001; %m²
c=380; %
R=3.564e-4;
%R=0.00016; %Ohm
To=27; %C
i3=150; %A
for tk=0:0.01:70;
    t3s=To+((R*i3*i3)/(h*Al)).*(1-exp(((h*Al)/(m*c)).*tk));
    if t3s-205<=0.01 ts=tk; Tg=t3s;
    end
end
ff=ts;
a=['Tempo para atingir temperatura máxima: ',num2str(ff),' s']
b=['Temperatura máxima: ',num2str(Tg),' °C']
t=0:0.01:ts;
T3=To+((R*i3*i3)/(h*Al)).*(1-exp(((h*Al)/(m*c)).*t));
plot(t,T3,'r')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Temperatura (°C)')
tj=ts:0.1:600;
t1=Tg;
t32=To+(t1-To).*exp(((h*Al)/(m*c)).*(tj-ts));
c=t32(1);
mm=['Temperatura inicial de resfriamento: ',num2str(c),' °C']
hold on
plot(tj,t32)
legend('aquecimento','resfriamento')
```

ANEXO II

Catálogo Relé Bimetálico

Relés de sobrecarga

Relés de sobrecarga bimetálicos

3RU11 até 100 A
CLASSE 10

SIRIUS



Descrição

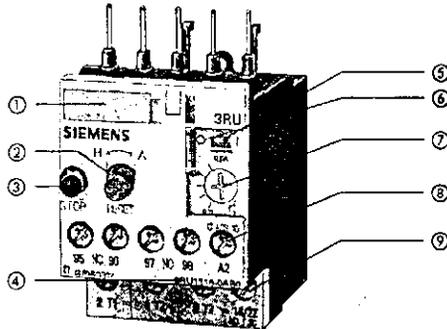
Os relés de sobrecarga bimetálicos 3RU11 até 100 A são destinados para a proteção de cargas com partida normal (vide "Classe de disparo") contra aquecimento indevido causado por sobrecarga ou falta de fase (vide "Proteção contra falta de fase"). Uma sobrecarga ou uma falta de fase causam uma elevação da corrente do motor, acima do ajuste de corrente nominal do motor (vide "Ajustes"). Esta elevação de corrente aquece as tiras dos elementos bimetálicos que se encontram no interior do relé de tal forma que, ao se curvarem, acionam um mecanismo de disparo que atuará sobre os contatos auxiliares (vide "Contatos auxiliares"). Os contatos desligarão a carga através de um contator. O tempo de desligamento é função da corrente de disparo em relação à corrente ajustada I_n cuja relação está representada na curva de disparo do relé (vide "Curva de disparo"). O estado "atuado" é sinalizado através de marca indicativa (vide "Indicação de estado").

O rearme pode ser feito de forma manual ou automática (vide "Rearme manual ou automático") após decorrido o tempo de rearme (vide "Tempo de rearme").

Os relés de sobrecarga bimetálicos 3RU11 estão preparados, de forma a poderem ser montados tanto individualmente como diretamente em contadores 3RT1, economizando espaço (vide "Montagem"). A ligação nos terminais principais e auxiliares pode ser feita de diversas maneiras (vide "Terminais de ligação"), entre outras, com terminais Cage Clamp. O funcionamento do relé pode ser testado, através de uma chave deslizante de teste - TEST (vide "Função de teste - TEST"). Além da função teste - TEST, o relé de sobrecarga 3RU11 está equipado com uma função desliga - STOP (vide "Função desliga - STOP").

Para informações sobre as possibilidades de aplicação do relé de sobrecarga 3RU11, ver "Aplicações", "Condições climáticas", "Relés de sobrecarga em partida estrela-triângulo" e "Operação com inversores de frequência".

Relés de sobrecarga bimetálicos 3RU11



- ① Etiqueta de identificação do componente/circuito
- ② Botão de rearme-RESET (manual/automático)
- ③ Botão desliga-STOP
- ④ Indicação do tipo (completo)
- ⑤ Indicação de estado em operação/atuado e função de teste-TEST
- ⑥ Capa de proteção dos ajustes
- ⑦ Parafuso de ajuste da corrente nominal do motor
- ⑧ Terminal da bobina (para montagem direta no contator)
- ⑨ Terminal do contato auxiliar (para montagem direta no contator)

Os relés de sobrecarga 3RU11 podem proteger as cargas contra sobrecarga e falta de fase. A proteção contra curto-circuito (vide "Proteção contra curto-circuito") deverá ser feita por fusíveis ou disjuntores.

Os relés de sobrecarga 3RU11 são ecológicos (vide "Meio-ambiente") e atendem todas as principais normas e aprovações válidas mundialmente (vide "Normas" e "Proteção a prova de explosão - Proteção extrema" EEx").

Na escolha dos acessórios para os relés de sobrecarga 3RU11 (vide "Acessórios") foi dada especial atenção para que, com poucas execuções, toda a linha do relé fosse coberta.

Aplicações

Os relés de sobrecarga bimetálicos 3RU11 foram concebidos para a proteção de motores trifásicos e monofásicos em CA, e para motores em CC.

Se os relés de sobrecarga 3RU11 forem aplicados para a proteção de cargas monofásicas em CA ou cargas em CC, os elementos bimetálicos de todas as fases deverão estar com corrente. Assim sendo, todos os terminais principais do relé deverão ser ligados em série.

Relés de sobrecarga em partida estrela-triângulo

Na aplicação de relés de sobrecarga em partida estrela-triângulo deverá ser observado que, pelo contator de rede, passará uma corrente correspondente a $1/\sqrt{3}$ da corrente do motor. O relé de sobrecarga acoplado ao contator de rede deverá ser ajustado então a 0,58 vezes a corrente do motor.

Um segundo relé de sobrecarga pode ser acoplado ao contator da ligação em estrela, para que a carga seja protegida, também na partida.

A corrente em estrela é de 1/3 da corrente do motor. O relé de sobrecarga deverá ser ajustado a este valor de corrente.

Proteção contra curto-circuito

Para a proteção contra curto-circuito deverão ser utilizados fusíveis ou disjuntores. Os dispositivos de proteção contra curto-circuito para os relés de sobrecarga 3RU11 com/sem contator podem ser encontradas em "Dados técnicos" ou "Tabela de escolha".

Condições climáticas

Os relés de sobrecarga bimetálicos 3RU11 deverão ter compensação de temperatura conforme a norma IEC 60 947-4-1/DIN VDE 0660 Parte 102, na faixa de temperatura entre -20°C e $+60^{\circ}\text{C}$. Para temperaturas acima de $+60^{\circ}\text{C}$ até $+80^{\circ}\text{C}$ o valor superior da faixa de ajuste deverá ser reduzido por um fator, de acordo com a tabela abaixo.

Temperatura ambiente em $^{\circ}\text{C}$	Fator de redução do valor de ajuste superior
+65	0,94
+70	0,87
+75	0,81
+80	0,73

Classes de disparo

Os relés de sobrecarga 3RU11 estão preparados para condições de partida normal de classe de disparo-CLASSE 10.

Curva de disparo

A curva de disparo fornece a relação entre tempo de disparo e a corrente de disparo na forma de múltiplos da corrente de ajuste I_n e são indicadas para cargas trifásicas simétricas e para cargas bifásicas (falta de fase) a partir do estado a frio.

A menor corrente na qual haverá um desligamento é chamada de corrente limite de disparo. Ela deverá se situar, segundo as normas IEC 60 947-4-1/DIN VDE 0660 Parte 102 em limites pré-determinados. Os limites da corrente de disparo se situam, nos relés de sobrecarga bimetálicos 3RU11 para cargas trifásicas simétricas, entre 105% e 120% da corrente de ajuste.

Partindo-se da corrente limite de disparo, as correntes de disparo elevam-se, em função das classes de disparo (CLASSE 10, CLASSE 20, etc.). As classes de disparo descrevem os intervalos de tempo, dentro dos quais os relés de sobrecarga deverão atuar, quando sujeitos a uma carga trifásica simétrica, partindo do estado a frio, de 7,2 vezes a corrente de ajuste I_n .

Os tempos de disparo são de:

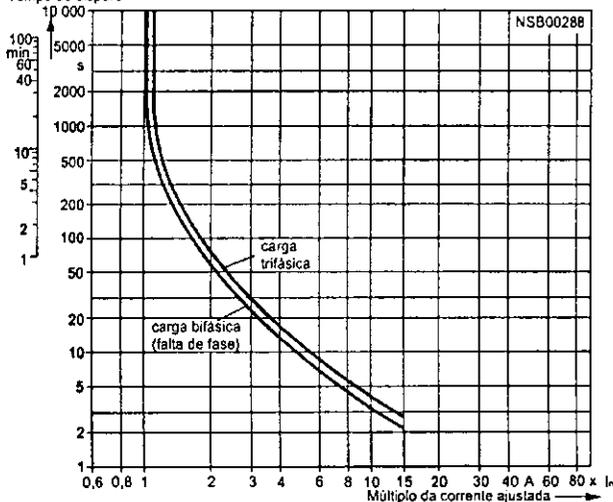
Classe de disparo	Tempos de disparo
CLASSE 10A	2 s a 10 s
10	4 s a 10 s
20	6 s a 20 s
30	9 s a 30 s



Descrição

Esta é uma curva característica de disparo típica. A curva própria dos relés de sobrecarga bimetalícos 3RU11 podem ser solicitadas no setor de assistência técnica no endereço de e-mail: nst.technical-assistance@siemens.de

Tempo de disparo



A curva de disparo de um relé de sobrecarga 3RU11 (vide curva para carga trifásica simétrica a partir do estado a frio) é válida quando os elementos bimetalícos das três fases estejam sob a mesma intensidade de corrente. Se ocorrer uma falta de fase e somente dois elementos bimetalícos estiverem com corrente, estes dois elementos deverão atuar sobre o mecanismo de disparo, necessitando, ou de um tempo mais longo ou de um valor maior de corrente para produzir atuação. Essas correntes, durante um longo tempo, acarretarão danos à carga. Para se evitar isso, os relés de sobrecarga bimetalícos 3RU11 estão equipados com um sensor de falta de fase, que acelera a atuação das duas fases ativas sobre o mecanismo de disparo, mantendo desta forma a curva de disparo adequada a partir do estado a frio.

Comparado com uma carga a frio, uma carga em estado aquecido possuirá obrigatoriamente uma menor reserva de calor. Este comportamento é levado em consideração pelo relé de sobrecarga 3RU11. O relé, após um longo período de carga com corrente I_n , terá seu tempo de atuação reduzido em aproximadamente um quarto.

Proteção de falta de fase

Os relés de sobrecarga bimetalícos 3RU11 estão equipados com um sensor de falta de fase (vide "Curva de disparo"), para minimizar o sobreaquecimento da carga no caso da falta de uma fase.

Ajuste

O relé de sobrecarga bimetalíco 3RU11 é ajustado para a corrente nominal do motor através de um parafuso de ajuste.

Rearme manual ou automático

Pressionando-se e girando-se o botão azul (botão de rearme - RESET) pode-se selecionar entre rearme automático ou manual. Na posição manual, pode-se rearmar diretamente no relé, pressionando-se o botão de rearme - RESET. Pode-se rearmar o relé à distância com auxílio de acessórios do relé (vide "Acessórios"). Pressionando o botão azul (rearme automático), haverá um rearme automático do relé.

O rearme do relé somente será possível após decorrido o tempo de rearme (vide "Tempo de rearme").

Tempo de rearme

Os relés de sobrecarga bimetalícos 3RU11 necessitam, após o disparo, de um determinado tempo para resfriamento dos elementos bimetalícos. Somente após decorrido este tempo o relé poderá ser rearmado. Este intervalo de tempo (tempo de rearme) será função da curva de disparo e da intensidade da corrente de disparo.

Após atuação do relé por sobrecarga, a carga terá condição de se resfriar durante o intervalo de tempo de rearme do relé.

Função de teste - TEST

O correto funcionamento do relé de sobrecarga 3RU11 poderá ser verificado com auxílio da chave deslizante (função de teste - TEST).

Acionando-se a chave, será feita uma simulação de disparo do relé. Com esta simulação, o contato NF (95-96) será aberto e o contato NA (97-98), fechará. Desta forma, poderá ser verificado o correto funcionamento dos contatos do relé. Se o relé de sobrecarga 3RU11 estiver ajustado em rearme automático, haverá um rearme automático do relé quando a chave de teste - TEST retornar. O relé deverá ser rearmado através do botão de rearme - RESET, quando o relé estiver na posição rearme manual.

Função desliga - STOP

Acionando-se o botão desliga - STOP, o contato NF se abrirá, desligando o contator de potência e com isso a carga. A carga será novamente ligada quando o botão de desliga - STOP for liberado.

Indicação de estado

O estado do relé de sobrecarga 3RU11 será sinalizado através da marca indicativa, na chave deslizante de teste "Função de TEST/Indicação de estado". A chave estará na posição "0" após atuação do relé por sobrecarga ou por falta de fase, e na posição "1" em regime nominal.

Contatos auxiliares

O relé de sobrecarga 3RU11 está equipado com um contato NA para indicação de relé disparado e um contato NF para desligamento do contator.

Terminais de ligação

Os relés de sobrecarga bimetalícos 3RU11 possuem terminais de ligação por parafuso nos contatos principais e auxiliares. Para terminais de potência dos relés 3RU11 46, podem ser conectadas barras após retirada do bloco terminal. Alternativamente estão disponíveis relés com terminais de ligação Cage Clamp. Para estes relés, os terminais do circuito auxiliar estão equipados com técnica de ligação Cage-Clamp, e para o relé 3RU11 16 também os terminais de potência.

Montagem

Os relés de sobrecarga bimetalícos 3RU11 podem ser montados diretamente nos contadores 3RT1. Os relés podem também ser montados individualmente, com o auxílio do suporte de montagem individual.

Operação com inversores de frequência

Os relés de sobrecarga bimetalícos 3RU11 podem operar com inversores de frequência. Dependendo da frequência de operação do inversor, deverá ser feito um ajuste de corrente maior do que a nominal do motor, em função de correntes parasitas e de efeitos superficiais de corrente.

Meio-ambiente

Os relés de sobrecarga são fabricados de forma ecologicamente correta, com utilização de materiais ecológicos e reciclados.

Normas

Os relés de sobrecarga bimetalícos 3RU11 atendem às normas

- IEC 60 947-1/
DIN VDE 0660 Parte 100
- IEC 60 947-4-1/
DIN VDE 0660 Parte 102
- IEC 60 947-5-1/
DIN VDE 0660 Parte 200
- IEC 60801-2, -3, -4, -5 e
- UL 508/CSA C 22.2.

Os relés de sobrecarga 3RU11 são também protegidos contra toque acidental conforme DIN VDE 0106 Parte 100 e à prova de intempéries conforme IEC 721.

Proteção a prova de explosão „Proteção extrema“ EEx

Os relés de sobrecarga 3RU11 atendem às normas de proteção de sobrecarga de motores à prova de explosão de categoria „Proteção extrema“ EEx e IEC 50 019/DIN VDE 0165, DIN VDE 0170, DIN VDE 171, Certificado KEMA Ex-97.Y.3235, DMT 98 ATEX G001, EN 50 019: 1977 + A1 ... A5, Proteção extrema „e“: Apêndice A, Normas de supervisão de temperatura de motores com rotor em curto-circuitado em operação.

Acessórios

Para os relés de sobrecarga 3RU11 estão disponíveis:

- para cada execução de relé existe um suporte de montagem individual próprio
- um módulo de acionamento para rearme elétrico à distância independente da execução do relé em três tensões usuais
- um botão de acionamento direto para rearme mecânico - RESET independente da execução do relé
- um acionador por cabo para rearme independente da execução do relé, para relés com difícil acesso
- capa de proteção dos terminais de ligação.

Os acessórios poderão também ser utilizados para os relés de sobrecarga eletrônicos 3RB10.