

COMPORTAMENTO TERMO-MECÂNICO DE UMA LIGA CUALNI COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA ¹

Sandro Lino Moreira de Queiroga²

Carlos José de Araújo³

Antônio Aristófaes da Cruz Gomes⁴

Resumo

Este trabalho tem por objetivo a determinação da capacidade de geração de esforço mecânico em função da temperatura, em modo de flexão três pontos, de uma liga 82,5Cu-13,5Al-4,0Ni (% peso), obtida por fusão em forno de indução ao ar. O lingote obtido foi homogeneizado e usinado para obtenção de lâminas prismáticas, as quais foram temperadas para posterior realização de ensaios de variação de resistência elétrica e geração de força em função da temperatura. Os ensaios termo-mecânicos foram realizados em uma plataforma experimental onde as amostras de lâminas são submetidas a carregamento de flexão três pontos com medição da carga gerada em função da temperatura durante a transformação de fase. A microestrutura do material foi observada por microscopia ótica para verificação do tamanho de grão e em seguida medida da microdureza. A liga após tratamento térmico de homogeneização e têmpera apresentou temperaturas de início e fim da transformação martensítica e austenítica, respectivamente: $M_s = 128\text{ °C}$, $M_f = 115\text{ °C}$, $A_s = 122\text{ °C}$ e $A_f = 135\text{ °C}$. O tamanho de grão médio observado foi da ordem de $600\text{ }\mu\text{m}$ e a microdureza média apresentou valor em torno de HV250. Para uma deformação de 1 mm imposta a lâmina no carregamento de flexão por 3 pontos foi obtida uma geração de carga mecânica da ordem de 120N. Esses valores foram comparados com uma liga de fabricação industrial, não havendo grandes variações, exceto para a carga gerada que foi inferior devido à diferença de deformação imposta às amostras.

Palavras-chave: Efeito memória de forma; Ensaios termo-mecânicos; Temperaturas de transformação.

THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF A CUALNI SHAPE MEMORY ALLOY ¹

Abstract

This work aims to determine the mechanical effort generation capacity as a function of temperature of a 82,5Cu-13,5Al-4,0Ni (% wt) alloy in the three point flexion mode. The ingots obtained by induction melting were homogenized and machined to obtain prismatic sheets that were water quenched for subsequent tests of electrical resistance change and force generation as a function of temperature. The thermomechanical tests were performed using an experimental test bench where sheet samples are submitted to a plastic deflection in three flexion mode and heated for measurement of the mechanical effort generated during the shape memory recover due to the phase transformation. The microstructure of the material was observed by optical microscopy to verify grain size. After homogenization and quenching the following transformation temperatures for the studied Cu-Al-Ni alloy were verified: $M_s = 128\text{ °C}$, $M_f = 115\text{ °C}$, $A_s = 122\text{ °C}$ e $A_f = 135\text{ °C}$. The medium grain size observed was $600\text{ }\mu\text{m}$ and the average hardness was of the order of HV250. For a deflection of 1 mm in the middle of sheet sample in the three point flexion mode, mechanical forces of about 120 N were measured during heating. These results were compared with the ones for the same alloy supplied by Societé Tréfirmétaux (France).

Key words: Shape memory effect; Thermomechanical tests; Transformation temperatures.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia de Materiais, PPG-CEMat, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: linoqueiroga@yahoo.com.br

³ Engenheiro Mecânico, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: carlos@dem.ufcg.edu.br

⁴ Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Depto. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: antonioaristofanes@yahoo.com.br

1 INTRODUÇÃO

O efeito memória de forma é a capacidade que possuem alguns materiais de recuperarem uma deformação plástica, induzida na fase martensítica, através de um aquecimento acima de uma temperatura crítica.⁽¹⁾ 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. A deformação é induzida na fase martensítica, abaixo de uma temperatura crítica onde a liga é maleável. Esta deformação é recuperada com um aquecimento posterior acima da temperatura crítica onde o material muda para a fase austenítica, sem ocorrer difusão atômica.

Algumas ligas clássicas, das famílias dos bronzes e dos latões, são capazes de desenvolver esse fenômeno. 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). As ligas à base de cobre são de baixo custo, possuem uma relativa facilidade de obtenção podendo ser fundidas, extrudadas ou laminadas ao ar, apresentando também um leque mais abrangente de potenciais temperaturas de transformação.⁽²⁾

Estes sistemas de ligas com efeito memória de forma podem ser ativados termicamente de diferentes formas: por efeito Joule, por meio de convecção natural ou forçada, por radiação solar e a distância por laser. A mudança da fase martensítica para a fase austenítica é acompanhada de uma variação de resistência elétrica, dentre outras propriedades, e da recuperação da forma original, que pode levar a uma geração de força. Essa geração de força potencializa o material para diversas aplicações como elemento atuador termomecânico que pode realizar um trabalho de conversão de energia térmica ou elétrica em energia mecânica.

Este trabalho tem por objetivo geral a determinação da capacidade de geração de esforço mecânico em função da temperatura, em modo de flexão três pontos, de uma liga 82,5Cu-13,5Al-4,0Ni (% peso) de origem laboratorial em comparação com o mesmo material de origem industrial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga estudada tem composição nominal 82,5Cu-13,5Al-4,0Ni (% peso), passível de apresentar o fenômeno memória de forma. A matéria prima utilizada tem a forma de barras maciças de cada elemento comercialmente puro, correspondendo a uma massa total da liga, em cada fusão, de 200g. A liga foi fundida em forno de indução ao ar e o lingote obtido foi homogeneizado a 900 °C por 24h e usinado para obtenção de lâminas prismáticas, as quais foram aquecidas a 900 °C durante 15 min e temperadas em água a temperatura ambiente. As lâminas foram caracterizadas por ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura para determinar a existência da transformação de fase que origina o efeito memória de forma. Para realização desse ensaio de resistência elétrica, as lâminas foram testadas em um equipamento específico desenvolvido por Silva.⁽³⁾

Para realização do ensaio de geração de carga em função da temperatura foi montada no LaMMEA (Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas) uma plataforma experimental a partir da estrutura rígida de uma prensa de bancada de 15 toneladas da marca MARCON, modelo MPH-15. Nesse ensaio a amostra é apoiada nos barramentos da própria prensa enquanto uma força é aplicada para defletir-la em modo de flexão por três pontos, utilizando-se do sistema hidráulico da

própria prensa. Após a amostra deformada na temperatura ambiente, são soldados fios finos de cobre em sua superfície para realização do ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura sob carga, utilizando-se o método dos quatro fios. Para medição da temperatura das lâminas, um termopar tipo K é instalado em contato com a amostra de teste. Uma célula de carga é fixada ao fuso da prensa e age contra um parafuso que fica em contato direto com a amostra. A Figura 1 mostra o detalhe dessa montagem.

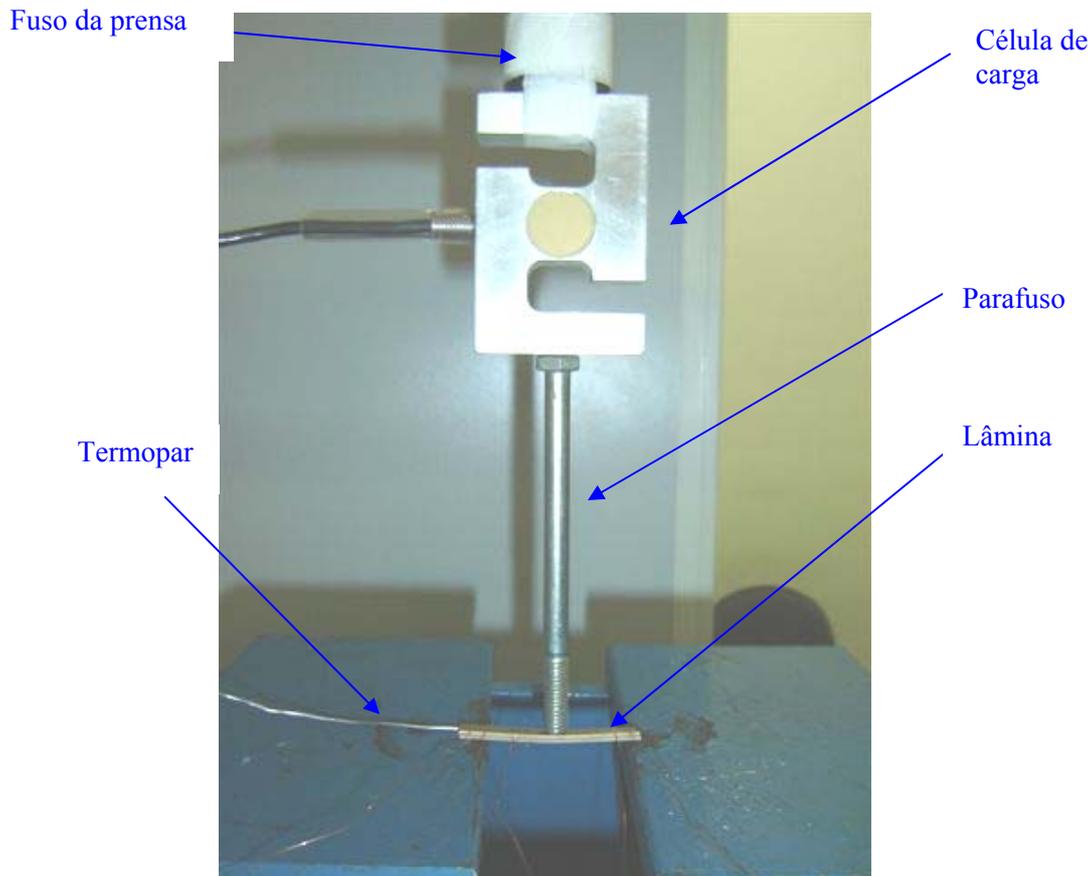


Figura 1. Montagem da lâmina – parafuso – célula de carga na plataforma experimental.

Inicialmente é aplicada uma pré-carga para manter a rigidez no conjunto lâmina – 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 exercendo uma força sobre a célula de carga que está fixa. A aquisição dos dados de temperatura, força, e resistência elétrica é feita pelo sistema de aquisição de dados Agilent 34970.

Para complementar o estudo, técnicas de caracterização clássicas foram também utilizadas, como a microscopia ótica e microdureza. 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 microdureza foi medida com um microdurômetro da marca Future-Tech, modelo FM – 700. Foram analisadas amostras da liga CuAlNi embutidas em resina acrílica apropriada, com carga de 25 gf e tempo de penetração de 15s.

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos com a liga produzida no LaMMEA foram comparados com uma liga de mesma composição nominal fornecida pela empresa francesa Trefimétaux, fabricada por um processo industrial de fusão e conformação mecânica. Essa comparação tem o objetivo de demonstrar o potencial do material de laboratório em relação ao produto industrial.

3.1 Ensaio de Variação de Resistência Elétrica em Função da Temperatura

As Figuras 2(a) e 2(b) mostram as curvas de resistência elétrica em função da temperatura para a liga LaMMEA (LL) e Trefimetaux (LT), respectivamente. Os valores das temperaturas de transformação obtidos pelo método das tangentes estão resumidos na Tabela 1.

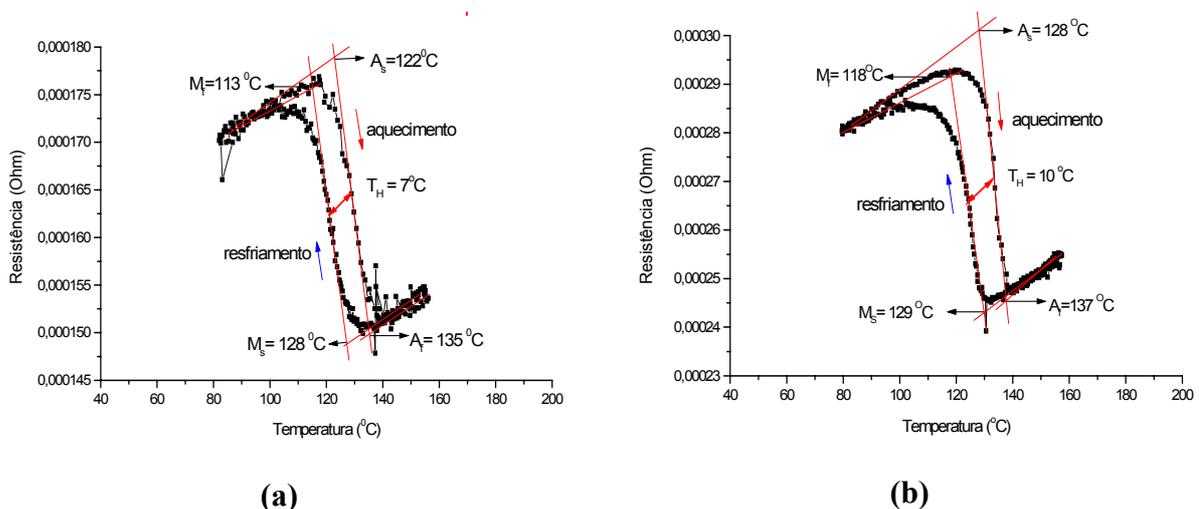


Figura 2. Ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura. (a) Liga LL. (b) Liga LT.

Tabela 1. Temperaturas de transformação e histerese térmica das ligas LL e LT.

| Ligas | Temperaturas de Transformação | | | | |
|-------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | A_s (°C) | A_f (°C) | M_s (°C) | M_f (°C) | T_H (°C) |
| LL | 122 | 135 | 128 | 113 | 7 |
| LT | 128 | 137 | 129 | 118 | 10 |

3.2 Geração de Força em Modo de Flexão Três Pontos

Cada amostra de lâmina foi deformada para uma flecha y e simplesmente apoiada e submetida a 15 ciclos de aquecimento e resfriamento. A Figura 3 mostra as dimensões das lâminas as quais estão resumidas na Tabela 2. A base b é uma dimensão perpendicular à espessura (e).

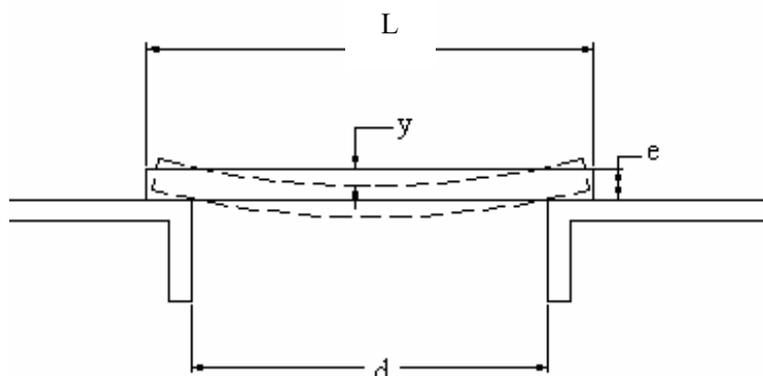


Figura 3. Dimensões das lâminas submetidas a uma deformação plástica de flecha y .

Tabela 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 | 1,6 |
| LL | 47,00 | 4,07 | 5,24 | 39,85 | 1,0 |

O nível de temperatura máximo atingido nos ensaios situou-se em torno de 250 °C. Nas Figuras 4(a) e 4(b) verifica-se um resultado típico da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo para as lâminas LT e LL, respectivamente.

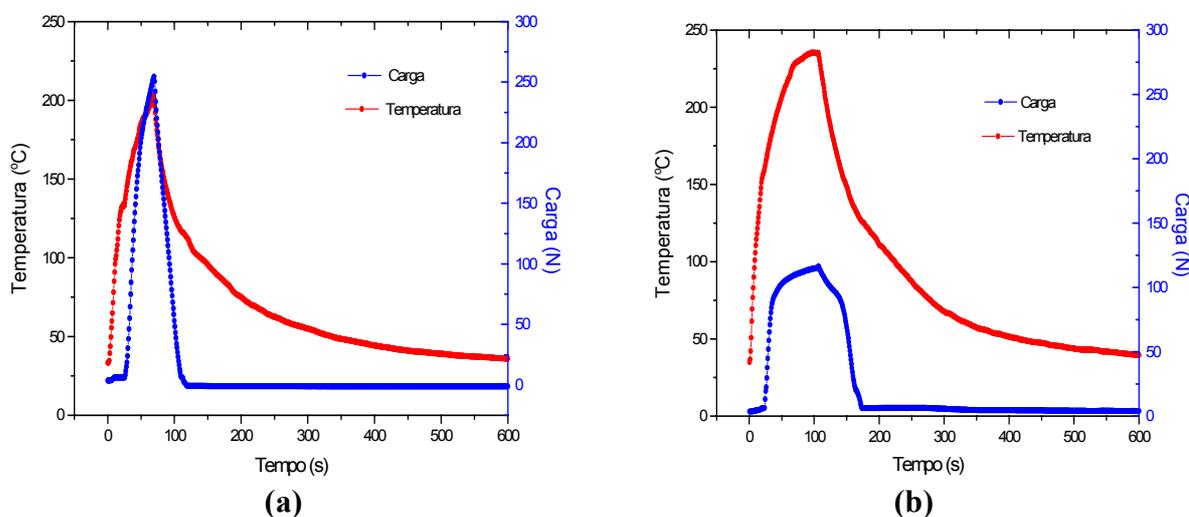
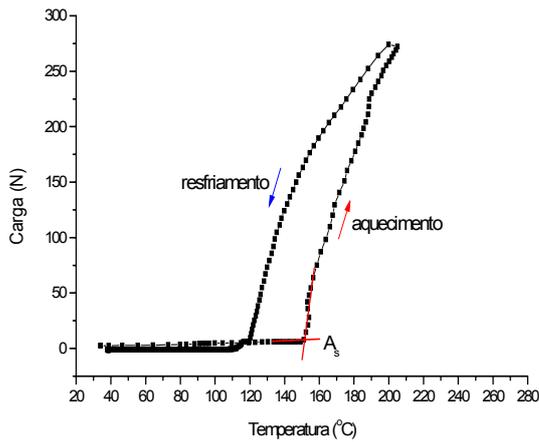
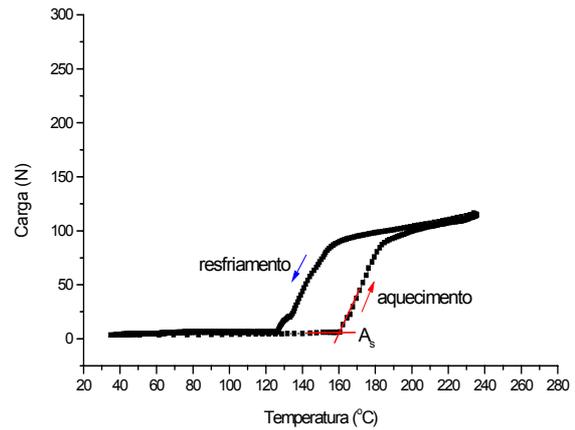


Figura 4. Curva da variação da temperatura e da carga gerada em função do tempo. (a) 6º ciclo para a lâmina LT. (b) 10º ciclo para a lâmina LL.

A Figura 5 mostra o comportamento da carga gerada em função da temperatura para diferentes ciclos nas lâminas LT e LL. Constata-se um comportamento histerético semelhante aos das curvas de resistência elétrica mostradas na Figura 2.



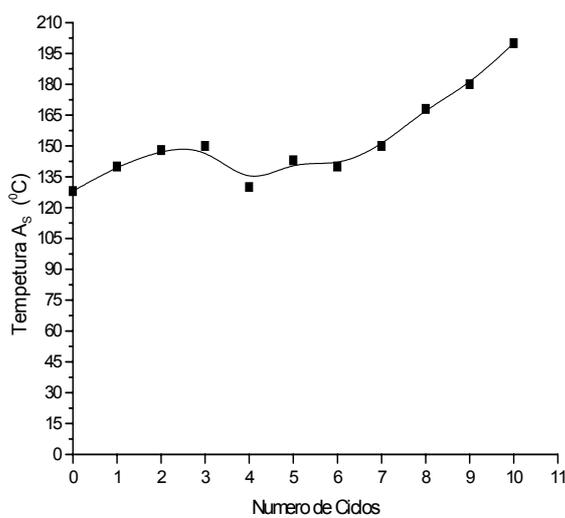
(a)



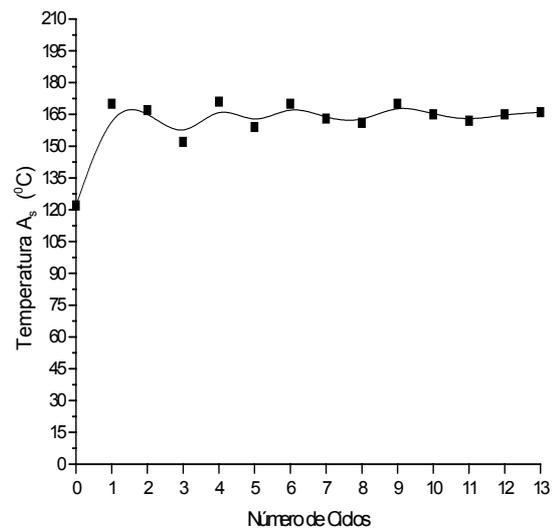
(b)

Figura 5. Curva de geração de força de recuperação em função da temperatura. (a) 7º ciclo de força da lâmina LT. (B) 10º ciclo de força da lâmina LL.

A Figura 6 exibe o comportamento da temperatura de transformação A_s definida como ilustrado na Figura 5 em função do número de ciclos. Verifica-se que estes são superiores aos valores medidos no ensaio de resistência elétrica em função da temperatura na ausência de carga (Tabela 1).



(a)



(b)

Figura 6. Temperatura de transformação A_s em função do número de ciclos, (a) lâmina LT, (b) lâmina LL.

A Figura 7 mostra o resultado de um ensaio de variação de resistência elétrica em função da temperatura sob carga. Estas medidas são difíceis de realizar durante o aquecimento porque o fluxo de ar quente perturba os contatos elétricos dos fios soldados na amostra.

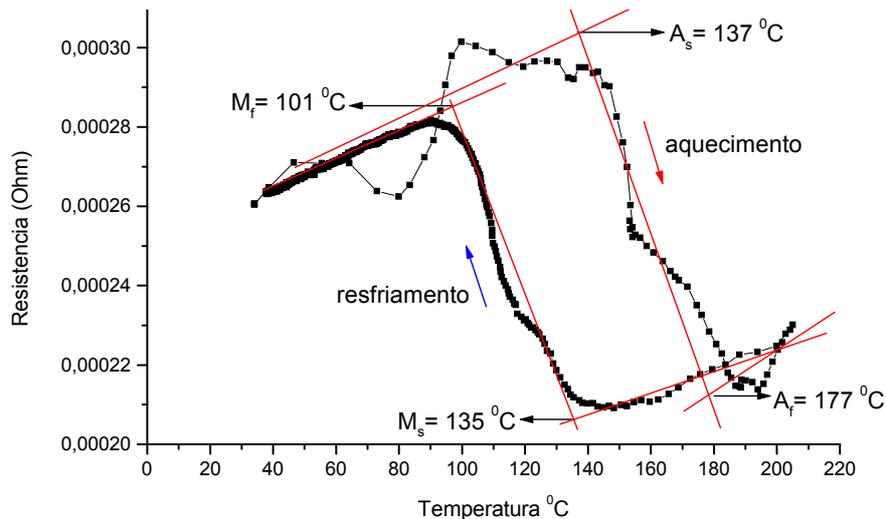


Figura 7. Ensaio de variação de resistência em função da temperatura sob carga, lâmina LL.

3.3 Microscopia Ótica

Os resultados de microscopia ótica estão apresentados na Figura 8. Esta figura permite constatar a presença de plaquetas de martensita orientadas aleatoriamente no interior dos grãos relativamente grandes, de tamanho médio da ordem de 600 μm .

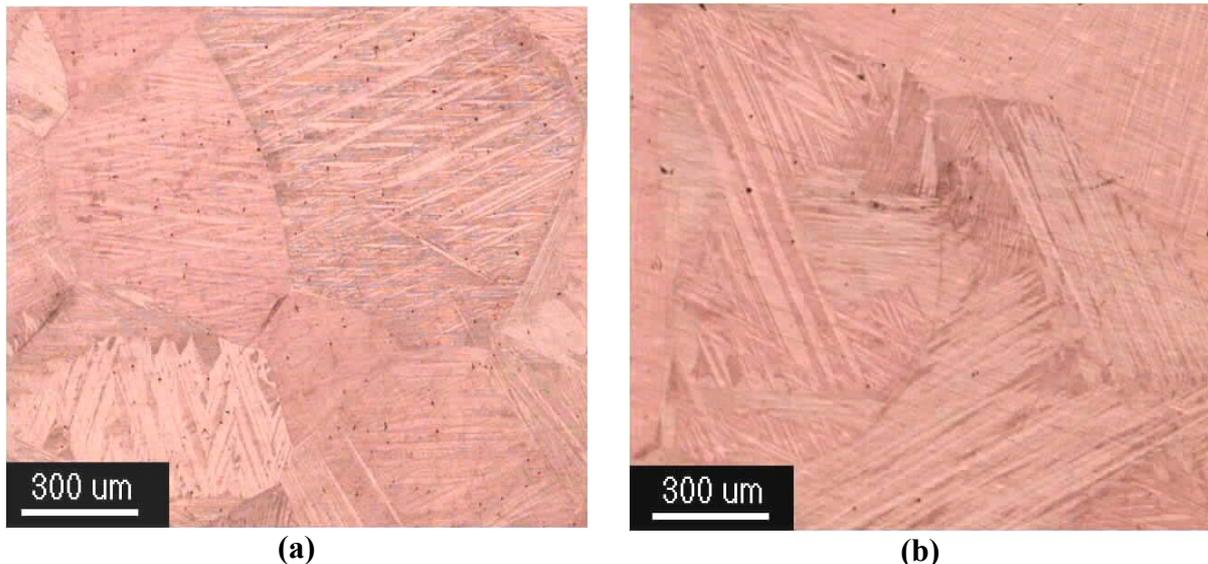


Figura 8. Estrutura martensítica das ligas CuAlNi: Aumento 50 X. (a) Lâmina LT. (b) Lâmina LL.

3.4 Ensaio de Microdureza

Foram realizadas medidas de microdureza Vickers nas lâminas LT e LL, em regiões correspondentes ao centro do grão, próximo ao contorno e exatamente no contorno de grão. A lâmina LT apresentou dureza média de HV 245 e a lâmina LL apresentou dureza média de HV 250. Para ambas as ligas a dureza diminui à medida que se aproxima do contorno do grão e cai drasticamente atingindo valores da ordem de HV 78 exatamente no contorno do grão.

4 DISCUSSÕES

Para ambas as ligas, de origem laboratorial (LL) e industrial (LT), a Figura 2 e a Tabela 1 revelam que os valores das temperaturas de transformação foram bastante semelhantes. A maior variação foi observada para a temperatura A_S da liga LL que foi aproximadamente 6 °C inferior ao da liga LT, indicando que, independentemente do processo de fabricação, após betatização (900 °C) e têmpera é a composição química da liga que determina suas temperaturas características de transformação de fase. Esse fato é reforçado pela semelhança das estruturas martensíticas e tamanhos de grão observados na Figura 8, assim como pelos valores de microdureza praticamente idênticos para os dois materiais estudados.

As Figuras 4 e 5 demonstram a maior capacidade de geração de força em função da temperatura da lâmina LT de origem industrial, no entanto a Tabela 2 revela que a flecha imposta a esta lâmina foi superior aquela da lâmina LL de origem laboratorial. Em geral, na mesma faixa de temperatura, o nível de carga gerada pela lâmina LT, para uma flecha inicial de 1,6 mm, correspondeu ao dobro da carga gerada pela lâmina LL, com uma flecha de 1,0 mm. Um aumento da carga gerada pela lâmina LT foi observado durante a repetição dos ciclos térmicos. Isso ocorreu devido a um aumento da flecha com a ciclagem, fenômeno que não foi observado na lâmina laboratorial LL. Esse fato explica o aumento da temperatura A_S em função do número de ciclos observado na Figura 6(a) para a lâmina LT, bem como a estabilidade dessa temperatura na Figura 6(b) para a lâmina LL. Em primeiro lugar, vale ressaltar que os valores de A_S obtidos dos laços de histerese da Figura 5 são superiores aqueles obtidos a partir dos laços de histerese de resistência elétrica mostrados na Figura 2. Porém, isso é esperado pois sob a presença de carregamento mecânico as temperaturas de transformação das ligas com memória de forma aumentam segundo uma lei de Clausius-Clayperon modificada.⁽¹⁾

Conforme mostra a Figura 7, o acompanhamento da variação de resistência elétrica das lâminas concomitantemente com a geração de força em função da temperatura é uma tarefa difícil principalmente porque durante o aquecimento o fluxo de ar quente perturba os contatos elétricos dos fios finos de cobre microsoldados sobre a superfície da amostra. No entanto, quando o soprador térmico é desligado para o resfriamento a carga é relaxada e a transformação é bem detectada. Observa-se na Figura 7 que o valor $M_S = 135$ °C é superior aquele medido com a amostra não submetida à ciclagem termomecânica (Tabela 1). Esse aumento da temperatura M_S sem carga após ciclagem termomecânica pode ser atribuído a introdução de defeitos na estrutura cristalina (discordâncias) que cria um campo de tensões internas responsável pelo aumento de M_S .^(4,5)

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se um estudo termomecânico de uma liga 82,5Cu-13,5Al-4,0Ni (% peso) com memória de forma de origem laboratorial em comparação com o mesmo material de origem industrial. Constatou-se que ambos os materiais após tratamento de betatização a 900 °C durante 15 minutos seguido de têmpera em água a temperatura ambiente, apresentam microestruturas martensíticas semelhantes, com tamanho de grão médio da ordem de 600 µm e microdureza Vickers em torno de HV250 no centro do grão. A transformação martensítica reversível detectada através de medidas de resistência elétrica em função da temperatura confirmou valores de temperaturas de transformação bastante

semelhantes para ambos os materiais. No entanto, 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. Esse fato foi 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 laboratorial.

Agradecimentos

Os autores agradecem os apoios financeiros recebidos dos Fundos Setoriais CTENERG e CTPETRO por meio do CNPq através, respectivamente, dos projetos 400724/2003-0 e 504365/2004-5.

REFERÊNCIAS

- 1 OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. **Shape Memory Materials**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- 2 ZENGIN, R.; OZGEN, S.; CEYLAN, M. Oxidation behaviour and kinetic properties of shape memory CuAl_xNi_4 ($x = 13.0$ and 13.5) alloys. **Thermochimica Acta**, v.414, p.79–84, 2004.
- 3 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.
- 4 DE ARAUJO, C. J.; MORIN, M.; GUÉNIN, G. Martensitic transformation in Ti-Ni-Cu shape memory wires broken by thermal cycling under constant load. **Journal de Physique IV**, v. 11, p. 375-380, 2001.
- 5 DE ARAUJO, C. J.; MORIN, M.; GUÉNIN, G. Estimation of internal stresses in shape memory wires during thermal cycling under constant load: a macromechanical approach. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 11, n. 7, p. 516-524, 2000.