

EFEITO DO REPROCESSAMENTO POR PLASMA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UMA LIGA CU-AL-NI COM MEMÓRIA DE FORMA¹

Marcos Mesquita da Silva²
Niédson José da Silva³
Marco Antonio dos Santos⁴
Carlos José de Araújo⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência do reprocessamento por plasma, com subsequente conformação pelo método *Skull Push-Pull*, nas propriedades físicas e mecânicas de uma liga Cu-Al-Ni com efeito memória de forma. Uma liga Cu-13,5Al-4,0Ni (% peso) passível de apresentar o fenômeno de memória de forma foi produzida via fusão ao ar em forno de indução. Os lingotes obtidos foram seccionados visando obter amostras com peso médio equivalente a 20g para refusão por plasma e conformação pelo método *Skull Push-Pull* usando a máquina Discovery da EDG equipamentos. Os tarugos obtidos por esse processo foram analisados utilizando técnicas de microscopia ótica, microdureza e resistência elétrica em função da temperatura. Comparações entre o material com e sem reprocessamento por plasma foram realizadas para explicar os resultados obtidos. Constatou-se uma redução do tamanho de grão da liga quando reprocessada e conformada pelo método *Skull Push-Pull*, modificando suas propriedades físicas e mecânicas. Observaram-se também maiores níveis de dureza na liga fundida por indução, quando comparada com as reprocessadas. As ligas fundidas por indução, reprocessadas e conformadas, apresentaram pequenas diferenças nas temperaturas de transformação de fase, quando temperadas. Entretanto, a liga reprocessada, mas não conformada, apresentou maiores temperaturas de transformação de fase.

Palavras-chave: Liga Cu-13,5Al-4,0Ni; Fundição por indução; Refusão por plasma; *Skull Push-Pull*.

EFFECT OF PLASMA REPROCESSING IN THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF A CU-AL-NI SHAPE MEMORY ALLOY

Abstract

This work has as general objective to analyze the influence of the plasma reprocessing, with subsequent conformation by the Skull Push-Pull method, in the physical and mechanical properties of a Cu-Al-Ni shape memory alloy (SMA). The Cu-13,5Al-4,0Ni (% weigh) alloy susceptible to Shape Memory Effect (SME) was produced through melting in air induction furnace. The obtained ingots were sectioned to obtain samples with equivalent medium weight of 20g for plasma remelting and conformation by Skull Push-Pull method, using the Discovery machine of the EDG equipments. The specimen obtained were analyzed by metallographic techniques, microhardness test, and electric resistance in function of the temperature. Comparisons among the material with and without plasma reprocessing were accomplished to explain the obtained results. A reduction of the grain size of the alloy was verified when reprocessed and conformed by the Skull Push-Pull method, modifying the physical and mechanical properties of the studied alloy. It was also observed larger levels of hardness in the induction melted alloy, when compared with those reprocessed. The induction melted alloys, reprocessed and conformed, presented small differences in the transformation temperatures, when quenched. However, the reprocessed alloy, but non conformed, presented larger transformation temperatures.

Key words: Cu-Al-Ni alloy; Induction melting; Plasma reprocessing; Skull push-pull.

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

² Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Depto. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: marcos.m.silva@yahoo.com.br

³ Aluno do Curso de Engenharia Mecânica, Depto. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: niedsonjs@yahoo.com.br

⁴ Engenheiro Mecânico, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, Email: santos@dem.ufcg.edu.br

⁵ Engenheiro Mecânico, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, Email: carlos@dem.ufcg.edu.br

1 INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (LMF) são ligas metálicas que possuem a capacidade de retornar à sua forma original quando submetidas a um processo termomecânico apropriado, ou seja, quando submetidas a variações de temperaturas e/ou tensão.⁽¹⁾ Os materiais metálicos que apresentam este fenômeno de memória de forma são considerados intrinsecamente como atuadores termomecânicos em virtude da capacidade que apresentam de produzir um deslocamento importante, associado a uma recuperação de deformação aparentemente plástica, quando submetidos a uma variação de temperatura.⁽²⁾ Este deslocamento pode corresponder a uma deformação introduzida, e recuperável por simples aquecimento, de até 8%. Alternativamente, uma força considerável pode ser gerada se a deformação recuperável por efeito memória de forma (EMF) é restringida de alguma forma quando o material é aquecido. Vale ressaltar que estes fenômenos de memória de forma estão intimamente relacionados a uma transformação de fase do tipo martensítica reversível, ocorrendo no interior do material em função da temperatura.

Dentre as LMF, as ligas a base de cobre mais empregadas são aquelas das famílias do Cu-Zn-Al e do Cu-Al-Ni. As ligas Cu-Al-Ni possuem a desvantagem de apresentarem deformações reversíveis relativamente pequenas (~4%), entretanto, elas são menos dispendiosas do que as ligas Ni-Ti, e, em geral, são a única opção para aplicações onde se exigem altas temperaturas de transformação.⁽³⁾

As LMF podem ser obtidas por fundição por indução magnética, fusão por feixe de elétrons, fusão a plasma ou ainda através de técnicas de solidificação rápida (obtenção de fitas de LMF). As LMF obtidas por fusão a indução, são obtidas em fornos de indução, onde os metais que compõem a LMF são aquecidos e fundidos indutivamente. Este aquecimento e fusão por indução só são possíveis com materiais condutores de eletricidade. Assim, as correntes parasitas induzidas nos metais (ou carga) são responsáveis pelo aquecimento inicial. A grande vantagem desta técnica em relação às outras é que o calor é produzido diretamente na carga. Entretanto, possui a desvantagem de muitas vezes ser realizada ao ar. Já na fusão por plasma, a carga é fundida pelo calor gerado pelo plasma. Esta técnica de fundição é especialmente útil para fundir ligas que contém elementos químicos altamente reativos com a atmosfera comum, pois geralmente, esta técnica utiliza atmosfera controlada com gases inertes (em geral, argônio), permitindo, desta forma, fundir metais e suas ligas totalmente livres de contaminações.^(4,5)

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência do reprocessamento por plasma, com subsequente conformação pelo método *Skull Push-Pull*, nas propriedades físicas e mecânicas de uma liga Cu-Al-Ni com efeito memória de forma obtida inicialmente via fusão ao ar em forno de indução.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente realizou-se o processo de fusão em forno de indução, obtendo-se lingotes (Figura 3a) de uma liga Cu-13,5Al-4,0Ni (% peso) a partir de elementos químicos comercialmente puros (Cu, Al e Ni) e em forma de barras (Figura 1a).



Figura 1. (a) Forma dos materiais utilizados para a obtenção da liga Cu-Al-Ni no forno de indução, (b) Carga de 20g de liga Cu-Al-Ni obtida no forno de indução, para reprocessamento em forno a plasma.

O equipamento de fusão por indução é uma instalação INDUCTOTHERM modelo VIP POWER TRACK PT 9,6 KHz composta de conversor e forno de mesa conforme ilustra a Figura 2a. O material da Figura 1a, correspondente a uma carga de 200g, foi pesado em uma balança de precisão marca Marte, modelo AL-200C e colocado para fusão em um cadinho de grafite da marca Morganite, modelo CI-1. O produto obtido da fusão e vazamento na lingoteira de aço foi uma barra de aproximadamente 20 cm de comprimento, da qual se retirou amostras para caracterização.

A Figura 2b mostra o forno a plasma, modelo *Discovery Plasma*, marca EDG Equipamentos, juntamente com o cilindro de argônio. Gás inerte utilizado para controle da atmosfera no processo.

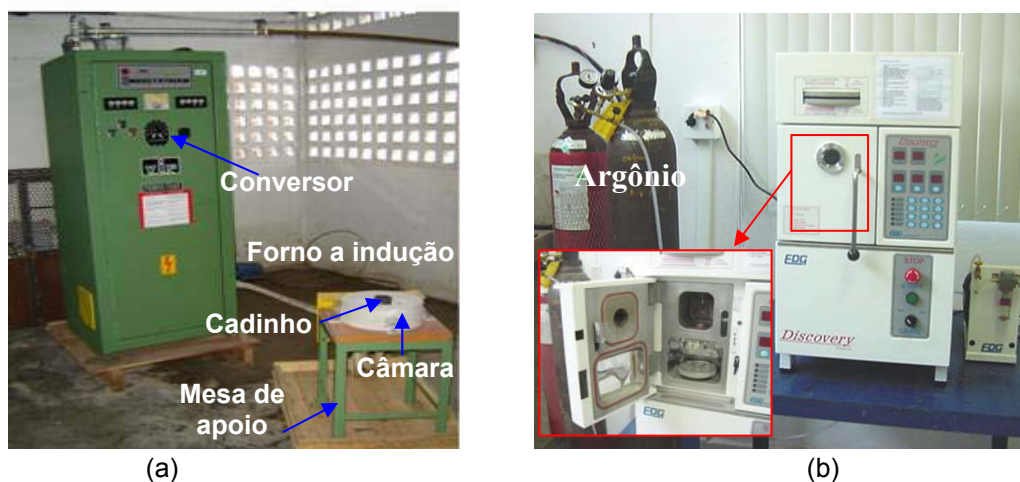


Figura 2. (a) Conjunto de equipamentos que forma a instalação de fusão por indução do DEM/CCT/UFCG. (b) Equipamento *Discovery Plasma*, para refusão a plasma.

A liga foi fundida, primeiramente no forno de indução (Figura 2a) sem adição de qualquer elemento ou produto refinador de grão. O vazamento foi feito em lingoteira metálica pré-aquecida a uma temperatura de 500°C. Sendo as fusões realizadas ao ar, utilizou-se um fluxo redutor de oxidação COPERPAL LT, correspondendo a 1% da massa da liga. Amostras foram retiradas do lingote obtido (Figura 3a), para as análises de resistência elétrica, metalografia (medição de tamanho de grão) e microdureza. Em seguida, duas cargas (Figura 1b) de 20g da

liga obtida no forno a indução, foram pesadas e levadas para refusão por plasma e conformação pelo método *SKULL PUSH-PULL*,⁽⁴⁾ utilizando o equipamento mostrado na Figura 2b. A primeira carga foi refundida na máquina *Discorey Plasma*, mas não foi submetida à conformação pelo método acima citado, obtendo-se dessa forma um botão (Figura 3b). A segunda carga também foi reprocessada na máquina *Discorey*, e logo após foi conformada pelo método *SKULL PUSH-PULL*, na mesma máquina, conseguindo-se desta maneira uma pastilha de base circular (Figura 3c). Amostras do botão e pastilha foram obtidas para posterior análises de resistência elétrica, microscopia e microdureza.



Figura 3. (a) Lâminas confeccionadas na Oficina Mecânica do DEM/CCT/UFMG a partir dos lingotes obtidos no forno a indução (b) botão e (c) pastilha obtidos no forno a plasma.

Os testes de resistência elétrica em função da temperatura foram feitos em lâminas (Figura 3c) das ligas obtidas. Para isso, utilizou-se um sistema instalado no LaMMEA (Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas) que pode ser visualizado na Figura 4. O método consiste em aquecer e resfriar controladamente uma amostra de lâmina, imersa em um banho termo-regulável que pode fazer variar a temperatura de um óleo silicone na faixa de -40°C a 200°C . A amostra é conectada por quatro fios elétricos a um sistema de aquisição de dados que capta as variações de resistência elétrica do material à medida que a temperatura varia. Uma fonte de alimentação CC estabilizada, marca Agilent, modelo E3633A, foi acoplada ao sistema para passar uma corrente elétrica constante pela lâmina enquanto o sistema de aquisição de dados armazena as variações de resistência e a temperatura da amostra.



Figura 4. Bancada de teste para medição da variação de resistência elétrica em função da temperatura nas LMF.

Na metalografia, visando identificar a microestrutura das ligas, após lixamento e polimento, utilizaram-se os seguintes reagentes: nital (25%) e uma solução contendo 2g $K_2Cr_2O_7$, 8 ml H_2SO_4 , 4 ml NaCl (sol. saturada). Os exames metalográficos foram realizados utilizando um microscópio marca Olympus, modelo BX51M, acoplado a um computador. Utilizou-se o programa de análises de imagens MSQTM Express, versão 6.51, a fim de capturar imagens micrográficas e medir o tamanho de grão, com base nas normas ASTM E112-88 e E1382. Já os ensaios de microdureza foram efetuados em um microdurômetro da marca FUTURE-TECH, modelo FM-700. Este ensaio foi realizado com uma carga de 300 gf, tempo de penetração de 15 segundos e espaçamento de 1 mm entre impressões. Após a realização dos ensaios nas amostras brutas de fabricação, estas foram posteriormente submetidas a um tratamento térmico de betatização a 900°C por 15 minutos seguido de têmpera em água para se obter a transformação martensítica reversível que origina os fenômenos de memória de forma. O equipamento utilizado para realizar o tratamento térmico foi um forno marca EDG, modelo TITAN Platiniun Quartz. Em seguida, repetiram-se todos os ensaios acima citados, para essa nova condição das amostras temperadas.

3 RESULTADOS

Para se verificar a influência do reprocessamento a plasma e da conformação pelo método *Skull Push-Pull*, mediu-se o tamanho médio de grão da liga fundida por indução (lingote, Figura 3a), da liga apenas reprocessada (botão, Figura 3b), e da liga reprocessada e conformada (pastilha, Figura 3c). As medidas foram realizadas antes e após o tratamento térmico de têmpera.

As Figuras 5a e 5b mostram, respectivamente, as microestruturas do lingote e pastilha, no estado bruto de fabricação, isto é, sem o tratamento térmico de têmpera. As Figuras 6a e 6b mostram a microestrutura destas amostras no estado temperado.

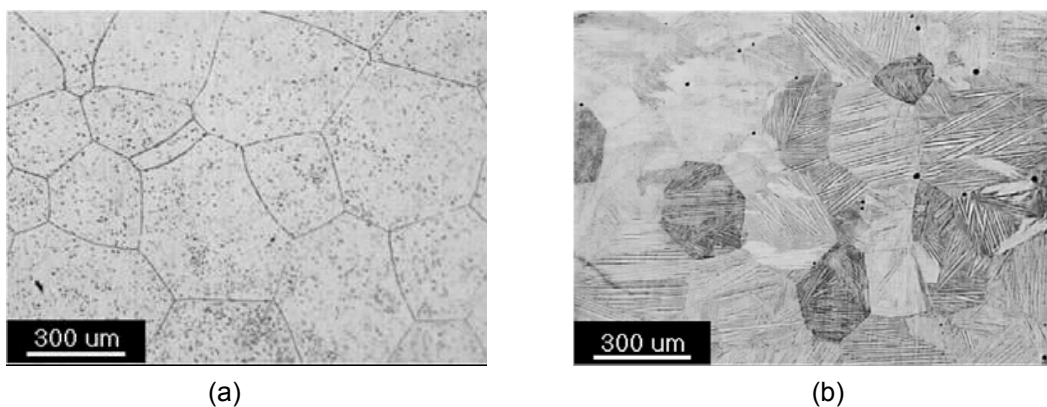


Figura 5. (a) Microestrutura do lingote e (b) da pastilha no estado bruto de fabricação.

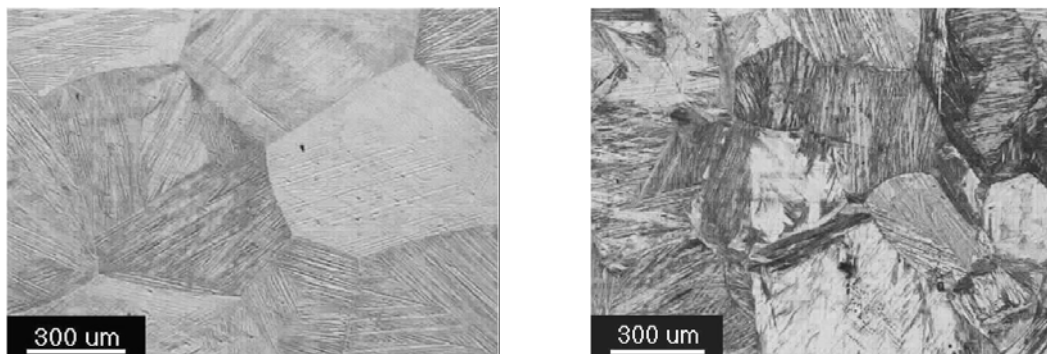


Figura 6. (a) Microestrutura do lingote e (b) da pastilha no estado temperado.

A Tabela 1 resume os resultados obtidos com relação aos tamanhos de grão para as amostras estudadas, antes e após a têmpera.

Tabela 1. Tamanho de grãos obtidos por microscopia ótica.

AMOSTRAS	Amostras no Estado Bruto de Fabricação		Amostras no Estado Temperado	
	Tam. médio de grão (μm)	Desvio (μm)	Tam. médio de grão (μm)	Desvio (μm)
Lingote	348,70	68,00	577,40	104,40
Botão	299,00	49,52	352,00	50,23
Pastilha	232,60	25,93	279,83	35,20

Tem-se, nas Figuras 7a e 7b, os perfis de dureza para as amostras no estado bruto de fabricação e temperadas, respectivamente.

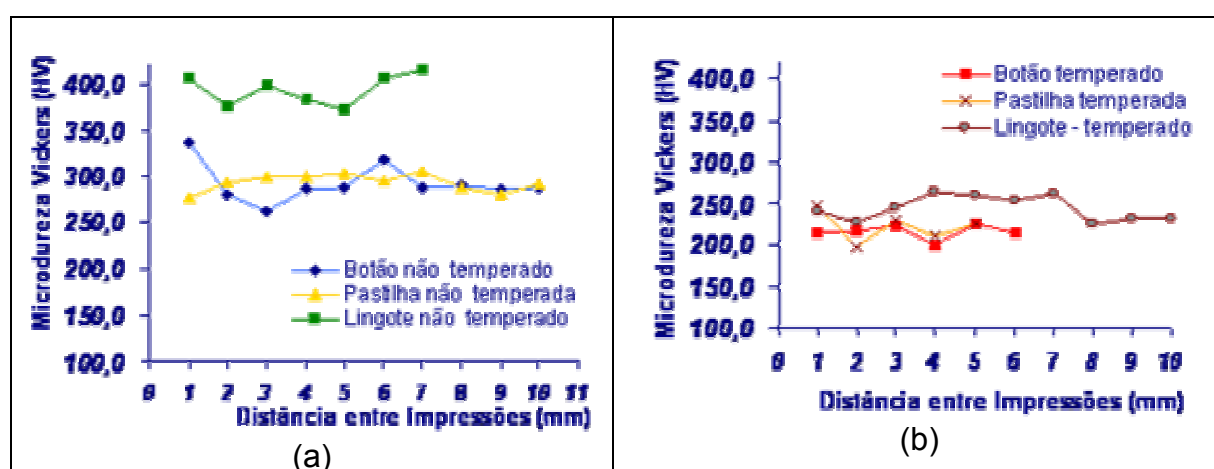


Figura 7. Perfis de microdureza nas amostras (a) bruta de fabricação, não temperadas e (b) temperadas.

Os valores médios de dureza das amostras bruta de fabricação e temperadas podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado dos ensaios de microdureza nas amostras.

AMOSTRAS	Amostras no Estado Bruto de Fabricação		Amostras no Estado Temperado	
	Dureza média (HV)	Desvio (HV)	Dureza média (HV)	Desvio (HV)
Lingote	386,99	14,33	245,33	12,03
Botão	292,72	17,63	223,48	12,35
Pastilha	294,06	8,37	223,96	17,66

As Figuras 8 e 9 mostram as curvas de *Resistência – Temperatura* obtidas para duas das amostras analisadas. As temperaturas da transformação direta durante resfriamento (M_S e M_f) assim como aquelas da transformação reversa durante aquecimento (A_S e A_f) para todas as amostras foram determinadas pelo método das tangentes. A Tabela 3 apresenta os valores das temperaturas de transformação de fase (TTF) para cada amostra.

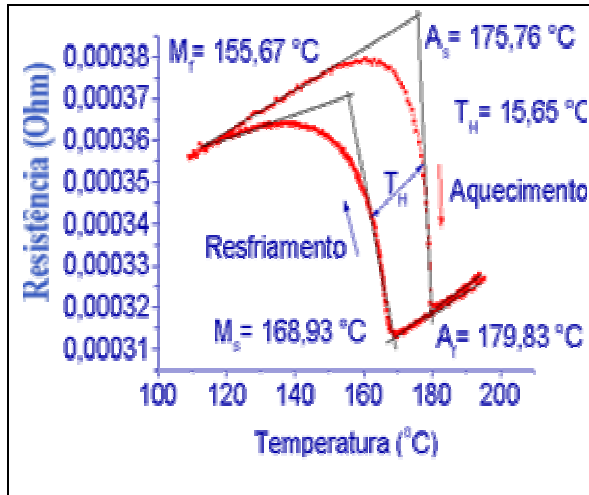


Figura 8. Curva Resistência – Temperatura para a pastilha não temperada

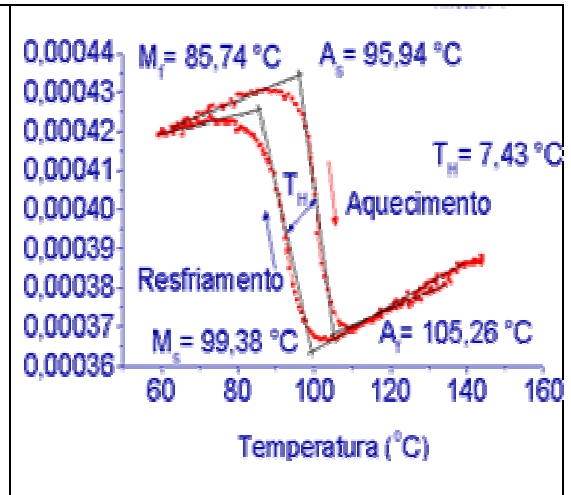


Figura 9. Curva Resistência – Temperatura para a pastilha temperada

Tabela 3. Temperaturas medidas a partir dos laços de histerese em resistência elétrica.

Temperaturas de Transformação de Fase (TTF)				
	Lingote	Botão Temperado	Pastilha não temperada	Pastilha
A_s	93,37°C	97,48°C	175,76°C	95,94°C
A_f	113,61°C	110,27°C	179,83°C	105,26°C
M_s	106,57°C	104,91°C	168,93°C	99,38°C
M_f	84,25°C	87,11°C	155,67°C	85,74°C
T_H	8,40°C	7,78°C	15,65°C	7,43°C

4 DISCUSSÃO

Um exame comparativo das Figuras 5a e 5b revela a ausência de estrutura martensítica na amostra fundida em forno a indução (lingote) no estado bruto, enquanto que a amostra reprocessada a plasma e conformada pelo método *Skull Push-Pull* (pastilha), no estado bruto, já apresenta claramente variantes de martensita devido ao próprio processo de conformação. Nesse processo, a liga é fundida por uma tocha de plasma e depois injetada em um molde de alumínio, de modo que esse processo proporciona um resfriamento relativamente rápido que pode originar estruturas martensíticas nas ligas de cobre com memória de forma, conforme mostra a Figura 5b.

Conforme indicam as Figuras 5a e 5b e a Tabela 1, comparando-se os resultados para o lingote e a pastilha, ambas no estado bruto, constata-se que houve uma redução do tamanho médio de grão da liga estudada da ordem de 33,33%, devido ao reprocessamento por plasma seguido de injeção em molde metálico. Observa-se através das Figs 6a e 6b, e dos valores da Tabela 1, que após o tratamento térmico de têmpera houve um crescimento de grão em todas as amostras. Este fenômeno ocorreu devido às amostras passarem por um tratamento térmico de betatização antes da têmpera, onde permanecem em um patamar de 15 minutos na temperatura de 900°C. De toda forma, os valores globais do tamanho médio de grão ficaram situados na faixa de 200 a 600 μm . A literatura indica que a

faixa de valores de tamanho de grão em LMF da família Cu-Al-Ni estão situados na faixa de 150 a 1000 μm e, se forem adicionados elementos químicos refinadores de grão, como o titânio, estes valores podem ser reduzidos para a faixa de 15 a 50 μm .^(2,3,6) Queiroga,⁽⁷⁾ estudando a mesma LMF Cu-Al-Ni deste trabalho, encontrou valores de tamanho de grão na faixa de 400 a 600 μm . O método *Skull Push-Pull* de conformação, além de se comportar como um agente refinador de grãos, produziu uma liga com grãos de tamanhos mais homogêneos, pois o desvio padrão das medidas efetuadas na pastilha foi menor em relação às outras amostras, Tabela 1.

Quanto aos níveis de dureza, as amostras do lingote apresentaram maiores valores de dureza tanto para a condição bruta quanto para a condição temperada, conforme indicam, respectivamente, as Figuras 7a e 7b. Isto ocorreu devido o lingote ter sido obtido em lingoteira pré-aquecida a 500° C, gerando uma menor taxa de resfriamento que leva a uma maior formação de fase γ , a qual é dura e frágil. Pode-se observar, da Tabela 2, que a dureza média da estrutura martensítica foi reduzida após a têmpera (224 a 244 HV) com relação à estrutura bruta de fusão (294 a 386 HV), devido a martensita das LMF ser relativamente dúctil, quando comparada com a martensita dos materiais ferrosos clássicos. Este fenômeno ocorre devido os átomos solutos, das ligas não-ferrosas, ocuparem posições substitucionais na estrutura da liga, ao contrário do que ocorre na martensita das ligas ferrosas, em que os átomos solutos ocupam posições intersticiais.⁽⁸⁾ Os valores de dureza mais baixos para as amostras reprocessadas por plasma e conformadas pelo processo *Skull Push-Pull* são atribuídos ao fato dessa técnica levar a formação imediata da estrutura martensítica dúctil (Figura 5b).

Os valores de dureza das amostras obtidas pela refusão a plasma (224 a 245 HV, Tabela 2), no estado temperado, foram ligeiramente menores em relação à dureza média de 250HV obtida por Queiroga⁽⁷⁾ em uma mesma LMF Cu-Al-Ni obtida por fusão a indução e submetida ao mesmo tratamento térmico empregado nesse trabalho. Além disso, Queiroga⁽⁷⁾ ainda verificou um gradiente de dureza (280 a 208 HV) do centro para o contorno do grão.

A Figura 8 apresenta as TTF e a histerese em temperatura (T_H) para a pastilha não temperada. Os valores observados na Figura 8 foram mais elevados que aqueles obtidos com a pastilha temperada, conforme mostra a Figura 9, bem como que aqueles verificados para as outras amostras, os quais estão resumidos na Tabela 3. O fato de a pastilha apresentar a transformação martensítica reversível que origina o efeito de memória de forma sem a necessidade de realização de têmpera é devido à natureza do método de conformação *Skull Push-Pull* após a fusão a plasma.⁽²⁾ Conforme discutido anteriormente, neste processo a liga fundida é injetada diretamente em um molde de alumínio que se encontra numa temperatura relativamente baixa, implicando no surgimento de estruturas martensíticas na liga. As amostras do lingote, botão e pastilha, no estado temperado apresentaram TTF e T_H bastante semelhantes, conforme mostra a Tabela 3. Recarte et al.⁽⁹⁾ indicam, através de equações empíricas, que uma LMF de composição nominal em peso de 82,5Cu-13,5Al-4,0Ni deverá apresentar uma temperatura M_s em torno de 63° C, entretanto, neste trabalho obteve-se temperaturas M_s , após têmpera, da ordem de 100 °C. Como as amostras foram fundidas primeiramente ao ar em forno a indução, este incremento nas TTF certamente ocorreu devido a perdas de elementos de liga, principalmente o alumínio, por oxidação.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho verificou-se que o reprocessamento por plasma seguido da conformação pelo método *Skull Push-Pull*, além de ser capaz de reduzir o tamanho de grão médio de uma LMF Cu-13,5Al-4Ni em até 33%, produziu uma granulometria mais homogênea. Quanto à dureza, as amostras (botão e pastilha) reprocessadas a plasma com e sem conformação pelo método supra citado apresentaram menores níveis de dureza, quando comparadas com aquelas obtidas via fusão ao ar em forno a indução (lingote).

Todas as amostras submetidas ao tratamento térmico de betatização (900 °C / 15 min) seguido de têmpera apresentaram valores semelhantes de temperaturas de transformação e histerese em temperatura, quando comparadas entre si.

Agradecimentos

Os autores agradecem os apoios financeiros recebidos dos Fundos Setoriais CTENERG e CTPETRO por meio do CNPq através, respectivamente, dos projetos 550325/2005-0 e 504365/2004-5. Um agradecimento especial é dedicado ao apoio do PRH-25 da ANP/UFMG devido à concessão de bolsas de graduação ao primeiro e segundo autor.

REFERÊNCIAS

- 1 LA CAVA, C. A. P. L., SILVA, E. P., MACHADO, L. G., PACHECO, P. M. C. L., SAVI, M. A. **Modelagem de um Dispositivo de Pré-Carga com Memória de Forma para Juntas Flangeadas**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CD-ROM), Natal – RN, p. 1- 8, 2000.
- 2 OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. **Shape Memory Materials**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. 284p.
- 3 LOJEN, G.; ANZEL, I.; KNEISSL, A.; KRIZMAN, A.; UNTERWEGER, E.; KOSEC, B.; BIZJAK, K. **Microstructure of rapidly solidified Cu-Al-Ni shape memory alloy ribbons**. Journal of Materials Processing Technology, v.327-328, p. 291-294, 2005.
- 4 **DISCOVERY Plasma: Manual de Instalação, Operação e Manutenção**. EDG Equipamentos e Controles Ltda, 2004. 15p.
- 5 **INDUCTOTHERM Manual de Operações e Manutenção: Manual do sistema VIP POWER TRAK e POWER MELT**. 2004.
- 6 AZEVEDO, T. A. **Metalografia de Não-Ferrosos: Análise e Prática**. Editora Edgard Blucher Ltda, 1980. 128p.
- 7 QUEIROGA, S. L. M. **Estudo de uma liga Cu-Al-Ni com Memória de Forma Visando Aplicações em Sistemas de Proteção contra Sobrecargas Elétricas**. 2006. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2006.
- 8 ASM – American Society for Metals: **“Metals Handbook, Vol 9 – Metallography and Microstructures”**, ASM, 1985.
- 9 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.