

OBTENÇÃO DE UMA LIGA Ti-Ni-Cu COM MEMÓRIA DE FORMA: COMPARAÇÕES COM A LIGA Ti-Ni EQUIATÔMICA¹

Marcos Mesquita da Silva²
Niédson José da Silva²
Antônio Aristófares C. Gomes³
Carlos José de Araújo⁴
Marco Antonio dos Santos⁴

Resumo

Este trabalho tem como objetivo geral fabricar uma liga Ti-Ni-Cu com memória de forma, e fazer comparações com a liga Ti-Ni equiatômica. Assim, uma liga de composição nominal Ti-45,0Ni-5,0Cu (% at), foi produzida via fusão por plasma e conformação pelo método *Skull Push-Pull*. Em seguida, amostras desta liga foram submetidas a tratamento de homogeneização a 840°C em um patamar de 2.400 s com posterior resfriamento rápido em água a temperatura ambiente. Em seguida, as amostras foram caracterizadas utilizando-se técnicas de microscopia ótica, calorimetria diferencial de varredura (DSC), microdureza, variação de resistência elétrica e geração de força em função da temperatura. Os resultados mostraram que a Liga com Memória de Forma (LMF) Ti-Ni-Cu apresentou uma histerese em temperatura estreita em comparação com a LMF Ti-Ni equiatômica produzida pela mesma técnica. A dureza média da LMF equiatômica foi superior à liga Ti-Ni-Cu. Os testes de geração de força de restituição em função da temperatura mostraram que a liga Ti-Ni-Cu foi capaz de gerar esforços mais elevadas quando comparada com a LMF Ti-Ni equiatômica.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; Fusão à plasma; Ligas Ti-Ni e Ti-Ni-Cu; Geração de força.

PRODUCTION OF A Ti-Ni-Cu SHAPE MEMORY ALLOY: COMPARISONS WITH THE EQUIATOMIC Ti-Ni

ABSTRACT

This work aim to melting and casting a Ti-Ni-Cu shape memory alloy (SMA), and to make comparisons with the equiatomic Ti-50Ni SMA. Therefore, a Ti-45Ni-5Cu (%at) was melted and cast by the Plasma Skull Push-Pull (PSPP) method. Afterwards, samples of this alloy were heated to 1113K with holding time of 2400s and water quenched. The specimens obtained were analyzed by optical microscopy, microhardness, differential scanning calorimetry (DSC), electrical resistance as a function of temperature, and force generation tests. The results showed that Ti-Ni SMA presented thermal hysteresis larger than the Ti-Ni-Cu SMA hysteresis. It was also observed lower levels of hardness and larger generated forces for Ti-Ni-Cu SMA, as compared to the equiatomic Ti-Ni SMA.

Key-words: Shape memory alloys; Plasma melting; Ti-Ni and Ti-Ni-Cu alloys; Force generation.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Aluno de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFCG, e-mails: marcos_m_silva@yahoo.com.br; niedsonjs@yahoo.com.br*

³ *Aluno do Curso Graduação em Eng. Mecânica, UFCG, e-mail: antonioaristofanes@yahoo.com.br*

⁴ *Engº Mecânico, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia Mecânica, UFCG, e-mails: carlos@dem.ufcg.edu.br; santos@dem.ufcg.edu.br*

1 INTRODUÇÃO

Desde as Eras primitivas, a história do Homem está interligada aos materiais. Ao longo dos tempos, o Homem sempre buscou melhorar e inventar materiais para facilitar e/ou garantir sua sobrevivência. Assim, a evolução dos materiais sempre foi constante.⁽¹⁾

Dentre os diversos materiais já criados, existe uma classe relativamente nova denominada de materiais inteligentes, tais como as Ligas com Memória de Forma (LMF). As LMF 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 mecânica. Logo, estes materiais são considerados intrinsecamente como atuadores termomecânicos.^(2,3) No entanto, o Efeito de Memória de Forma (EMF) é uma propriedade peculiar de algumas ligas que apresentam transformações de fase martensítica reversíveis.⁽³⁾ Estas ligas apresentam deformações recuperáveis, através do EMF, que podem alcançar até 8% em tração uniaxial. Alternativamente, forças consideráveis podem ser geradas se estas deformações reversíveis forem restringidas de alguma forma durante a ativação do EMF. Esta capacidade de geração de força confere a estas ligas o potencial de aplicação em dispositivos de acoplamento.⁽²⁻⁴⁾

Em geral, existem três grandes grupos de LMF que estão comercialmente disponíveis: Ti-Ni, Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni. Devido a sua excelente resistência à corrosão e melhores propriedades de memória de forma, as ligas base-Ti-Ni são as mais encontradas nas aplicações comerciais, principalmente como atuadores termomecânicos nos mais diversos setores da Engenharia em geral, assim como no campo médico-odontológico.^(3, 5)

A liga binária equiatômica Ti-Ni é largamente empregada em dispositivos comerciais. Nesta liga, a transformação martensítica pode ser precedida por uma transformação intermediária, dita pré-martensítica. Esta fase intermediária, designada por fase R, possui uma estrutura romboédrica. A sua estrutura pode ser vista como uma distorção da rede cúbica segundo uma das diagonais principais da célula unitária cúbica da austenita. Além disso, outra característica desta liga é a sua histerese em temperatura relativamente larga, quando comparada às ligas base cobre.⁽³⁾ No entanto, em algumas circunstâncias de projeto, adiciona-se um elemento ternário a estas ligas binárias Ti-Ni para se obter mudanças nas suas temperaturas de transformação de fase, mas buscando manter a ductilidade em fase martensítica e as boas propriedades de EMF verificadas nas ligas binárias. Um dos elementos que pode ser adicionado a estas ligas binárias Ti-Ni é o cobre, obtendo-se as ligas Ti-Ni-Cu. Por sua vez, as ligas Ti-Ni-Cu não possuem a fase intermediária R, e apresentam uma histerese em temperatura relativamente estreita.⁽³⁾

Assim, o objetivo geral deste trabalho é obter uma LMF do sistema Ti-Ni-Cu (Ti-45Ni-5Cu, % at), pela técnica de fusão e conformação *Plasma Skull Push-Pull* (PSPP), e realizar comparações com a LMF Ti-Ni equiatômica, obtida pelo mesma técnica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As LMF de composições nominais 50Ti-50Ni (% at) e Ti-45,0Ni-5,0Cu (% at), correspondentes a 55,0Ni-45,0Ti (% peso) e 49,4Ni-44,7Ti-5,9Cu (% peso), foram obtidas através da tecnologia de fusão e conformação pelo método *Plasma Skull*

Push Pull (PSPP) disponível na máquina de fusão a plasma modelo Discovery All, da EDG Equipamentos e Controles. Esta técnica utiliza o processo *Skull* de fusão, em que o material é fundido sobre uma fina camada dele mesmo. Neste trabalho, cada LMF foi fundida cinco vezes para garantir uma melhor homogeneidade do produto final. Além disso, as ligas foram aquecidas até a 840°C – permanecendo num patamar de 2400s – com posterior têmpera em água a temperatura ambiente. As fusões foram realizadas no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UFCG.

Após a obtenção das LMF, ambas foram caracterizadas por microscopia ótica aplicando-se os métodos convencionais de metalografia (lixamento e polimento com alumina), empregando-se o reagente *Kroll* (2mlHF, 4mlHNO₃ e 100mlH₂O) para a realização do ataque químico. A captura das micrografias foi realizada utilizando-se um analisador de imagens da marca Olympus, modelo BX51M. Após a metalografia, realizou-se os testes de microdureza utilizando-se um microdurômetro Future-Tech, modelo FM-700. Neste ensaio empregou-se uma carga de 2,94 N, um tempo de penetração de 15 segundos e espaçamento de 10⁻³ m (1 mm) entre impressões.

Para a determinação das temperaturas de transformação de fase, bem como da histerese em temperatura das ligas Ti-Ni e Ti-Ni-Cu, realizaram-se ensaios de variação da resistência elétrica em função da temperatura e calorimetria diferencial de varredura (DSC – *Differential Scanning Calorimeter*).

O teste de geração de força para a LMF Ti-Ni foi realizado em uma prensa mecânica de bancada com sistema hidráulico. A Figura 1a mostra a montagem realizada para o teste de geração de força na amostra desta LMF em forma de lâmina. Neste teste, primeiramente a lâmina da LMF Ti-Ni foi deformada a uma temperatura inferior a temperatura M_f , em torno de - 40°C. A lâmina foi deformada de uma flecha central (y) em modo de flexão três pontos (detalhe da Figura 1a), a qual foi quantificada através de um sensor de deslocamento LVDT, marca Solartron, modelo DF-5. Após a deformação, a lâmina foi aquecida por meio de um fluxo de ar quente para a ativação do EMF e, conseqüentemente, a geração de força. Para a medição da força gerada utilizou-se uma célula de carga da marca Excel, modelo MS-50, de capacidade nominal de 500 N. Um microtermopar tipo K, de 80 μ m de diâmetro, foi soldado na amostra da liga Ti-Ni para a medição da temperatura durante o ensaio. Os sinais da célula de carga e do termopar foram captados por um sistema de aquisição de dados da Agilent, modelo 34970A. No caso da LMF Ti-Ni-Cu, o teste de geração de força foi realizado em uma máquina universal de ensaios da marca Instron, modelo 5582 (Figura 1b). Esta máquina trabalha acoplada a um computador e é controlada pelo programa Bluehill[®]2. Este ensaio foi análogo ao realizado para a liga Ti-Ni, entretanto a flecha (y) e a força gerada foram obtidas diretamente do programa Bluehill[®]2. Um microtermopar tipo K, de 80 μ m de diâmetro, foi soldado na amostra da liga Ti-Ni-Cu para o monitoramento e aquisição da temperatura durante o ensaio de geração de força. A Tabela 1 apresenta as dimensões das lâminas Ti-Ni e Ti-Ni-Cu (comprimento L , largura b e espessura e), a flecha central obtida (y) e a distância dos apoios (d), no ensaio de flexão em três pontos.

Tabela 1 - Dimensões das lâminas Ti-Ni e Ti-Ni-Cu utilizadas nos testes de geração de força.

	L (mm)	b (mm)	e (mm)	d (mm)	y (mm)
Lâmina Ti-Ni	23,8	5,2	1,0	18,6	1,0
Lâmina Ti-Ni-Cu	24,23	5,21	1,29	18,6	1,0

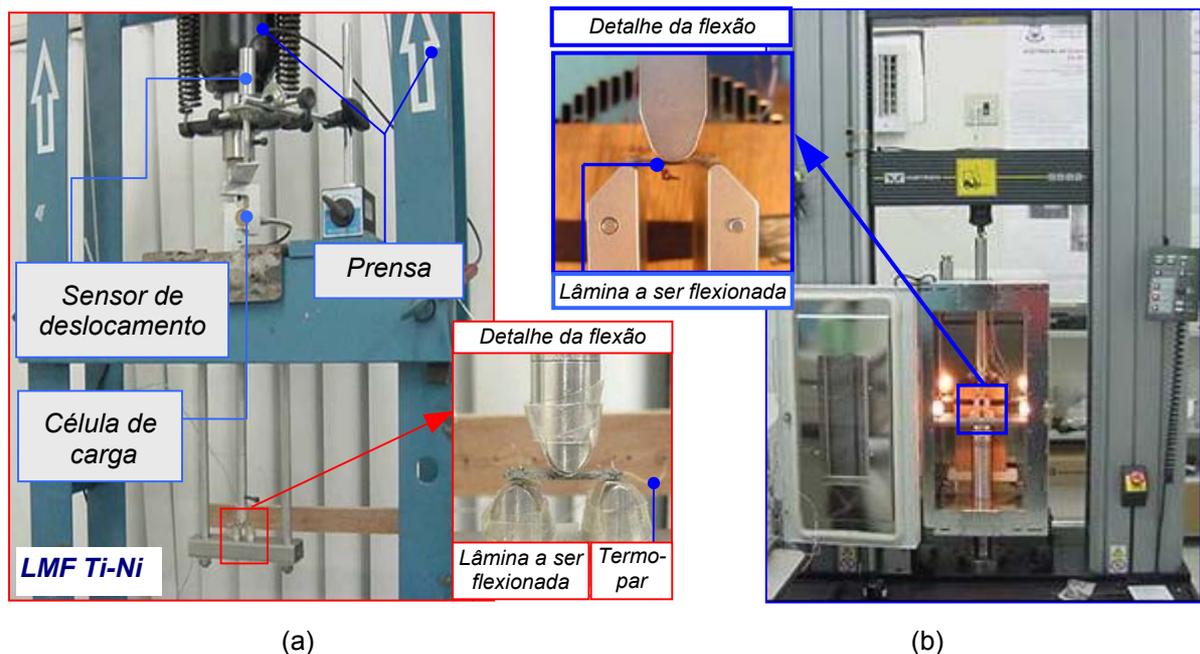


Figura 1 – Montagens realizadas para os ensaios de geração de força em modo de flexão 3 pontos. (a) Teste na lâmina Ti-Ni em uma prensa hidráulica. (b) Teste na lâmina Ti-Ni-Cu na máquina Instron 5582. Ver detalhes.

3 RESULTADOS

As Figuras 2a e 2b mostram as microestruturas das LMF Ti-Ni e Ti-Ni-Cu obtidas por fusão a plasma pela técnica PSPP, em atmosfera protetora de argônio.

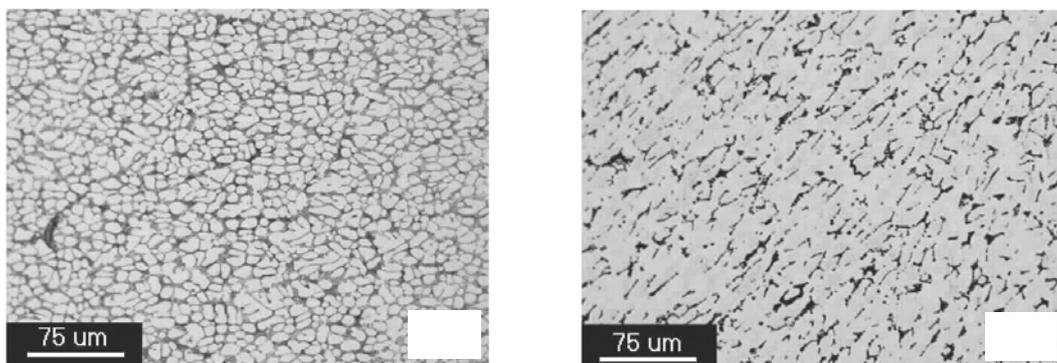


Figura 2 – (a) Microestrutura da liga Ti-Ni. (b) Microestrutura da liga Ti-Ni-Cu.

Os perfis de dureza para estas LMF são apresentados na Figura 3. A partir dos comportamentos obtidos, nota-se que a liga Ti-Ni (perfil 1) apresentou níveis de dureza mais elevados. A Tabela 2 resume os valores médios de dureza destas LMF.

Tabela 2 – Valores de microdureza das LMF Ti-Ni e Ti-Ni-Cu.

Unidades	LMF Ti-Ni		LMF Ti-Ni-Cu	
	Dureza média	Desvio	Dureza média	Desvio
GPa	2,27	0,17	1,96	0,12
HV	231,08	17,23	199,46	12,53

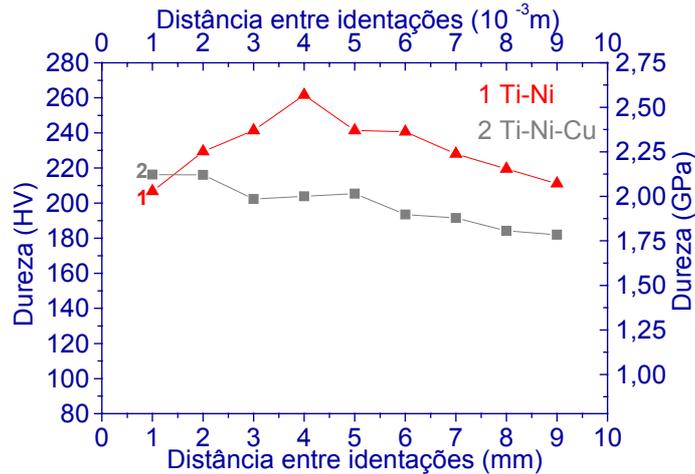


Figura 3 – Perfis de dureza obtidos nas ligas TiNi e TiNiCu.

As temperaturas de transformação de fase das ligas produzidas neste trabalho foram determinadas por ensaios de DSC, conforme mostrado na Figura 4. A Figura 4a mostra a curva obtida para a LMF Ti-Ni, com suas respectivas temperaturas de transformação de fase determinadas pelo método das tangentes. De forma similar, a Figura 4b mostra a curva de DSC obtida para a LMF Ti-Ni-Cu.

Na Tabela 3 mostra-se um resumo de todas as temperaturas de transformação de fase obtidas a partir dos termogramas das Figuras 4a e 4b. Na Tabela 3 lista-se também, para ambas as ligas, a Histerese em Temperatura (H_T), definida como sendo a diferença entre as temperaturas de picos da transformação ($A_P - M_P$).

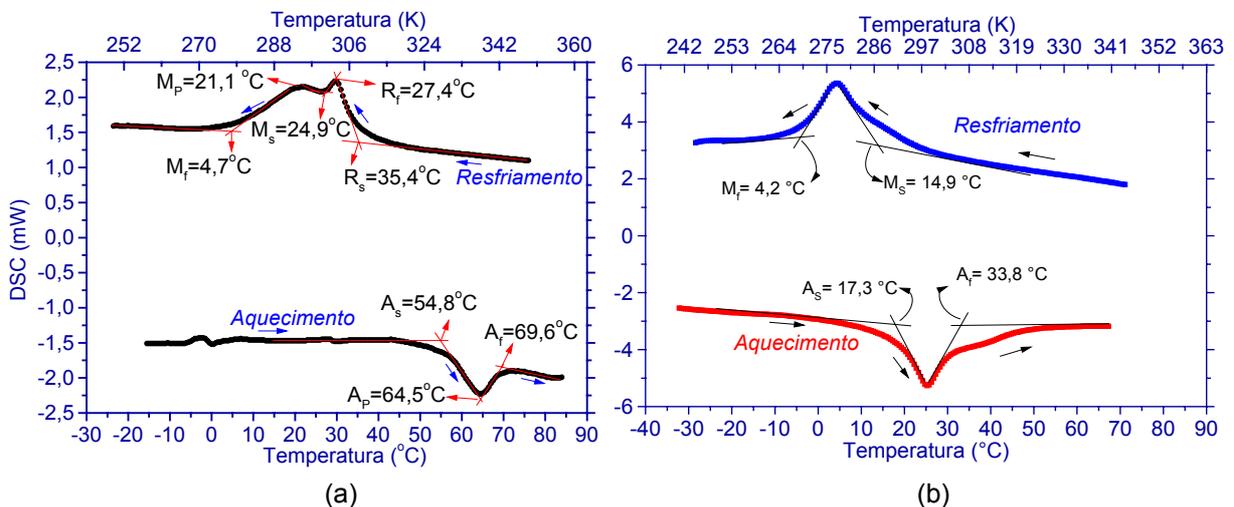


Figura 4 – Termogramas DSC. (a) Temperaturas de transformação de fase da LMF Ti-Ni, (b) Temperaturas de transformação de fase da LMF Ti-Ni-Cu.

Tabela 3 – Temperaturas de transformação de fase e histerese em temperatura das LMF Ti-Ni e Ti-Ni-Cu.

	Temperaturas de Transformação de Fase			
	LMF Ti-Ni		LMF Ti-Ni-Cu	
	(° C)	(K)	(° C)	(K)
A _s	54,8	327,8	17,3	290,3
A _f	69,6	342,6	33,8	306,8
M _s	24,9	297,9	14,9	287,9
M _f	4,7	277,7	4,2	277,2
R _s	35,4	308,4	-	-
R _f	27,4	300,4	-	-
H _T	43,4	43,4	21,1	21,1

As Figuras 5a e 5b apresentam as curvas de resistência elétrica em função da temperatura das LMF obtidas neste trabalho, bem como a influência da ciclagem térmica sobre a transformação de fase reversível.

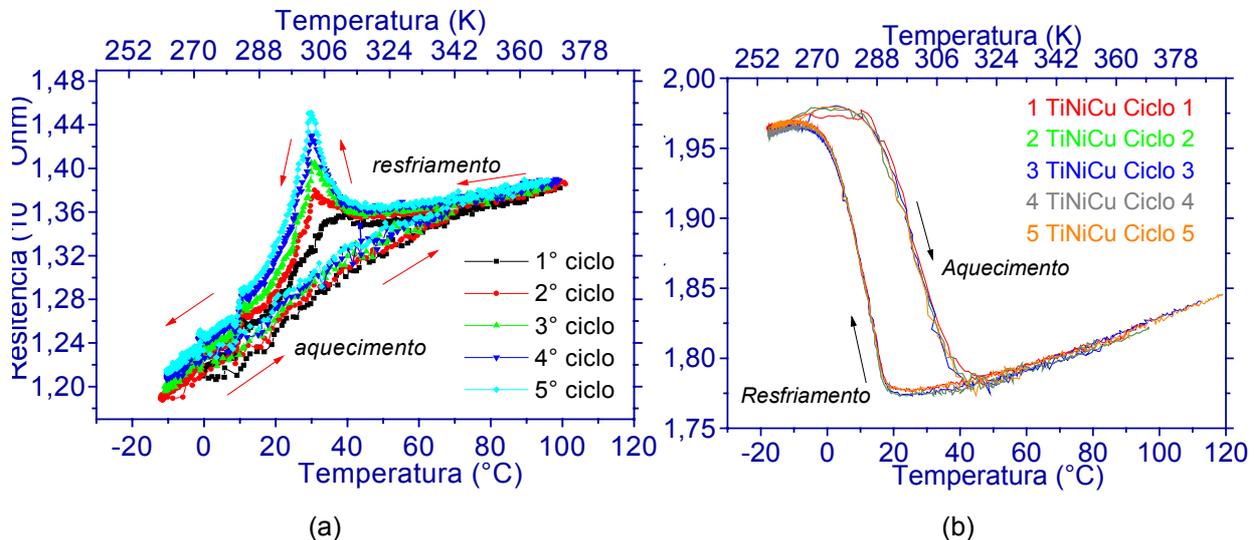


Figura 5 – Ensaio de Resistência Elétrica vs Temperatura: 5 ciclos térmicos. (a) Curvas R – T para a LMF Ti-Ni equiatômica. (b) Curvas R – T para a LMF Ti-Ni-Cu.

Os resultados dos ensaios de geração de força podem ser investigados através das Figuras 6a e 6b.

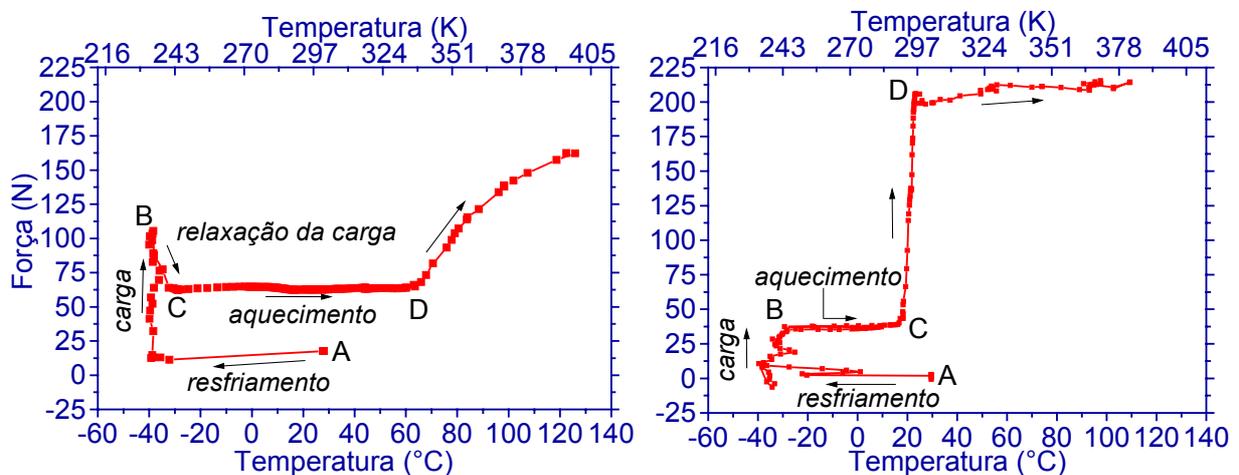


Figura 6 – Ensaio de Geração de força nas LMF (a) Ti-Ni e (b) Ti-Ni-Cu.

4 DISCUSSÃO

Comparando-se as Figuras 2a e 2b, observa-se que a adição de cobre em substituição ao Ni produz uma mudança na morfologia da microestrutura da liga binária Ti-Ni, antes equiatômica. Nota-se também a ausência de martensita em ambas as LMF. Isto ocorre devido às temperaturas de início e fim da transformação austenita-martensita (M_s e M_f) em ambas as ligas estarem situadas abaixo da temperatura ambiente. Na realidade, apesar da liga binária Ni-Ti ser de composição equiatômica e ter sido realizada uma têmpera em água a partir de 840°C, a microscopia da Figura 2a indica a presença de precipitados, provavelmente do tipo Ti_3Ni_4 . Esse fato é apoiado pela detecção da presença da fase R no termograma DSC da Figura 4a, já que essa fase aparece também devido ao campo de tensões internas originado em torno desses precipitados.⁽⁶⁾ Por outro lado, o aparecimento desses precipitados é inibido pela adição de cobre nas ligas Ti-Ni,⁽³⁾ justificando a morfologia da Figura 2b, que corresponde quase que totalmente à fase austenítica da liga Ti-Ni-Cu, uma vez que $A_s = 17,3$ °C e $A_f = 33,8$ °C.

Analisando-se as curvas obtidas na Figura 3, verifica-se que a liga Ti-Ni (perfil 1) apresentou níveis de dureza mais elevados. A dureza média obtida na liga Ti-Ni foi de $2,27 \pm 0,17$ GPa ($231,08 \pm 17,23$ HV), enquanto a LMF Ti-Ni-Cu apresentou uma dureza média menor, da ordem de $1,96 \pm 0,12$ GPa ($199,46 \pm 12,53$ HV). Esta mudança, ou redução de dureza, da liga Ti-Ni-Cu em relação à liga Ti-Ni pode estar associada à eliminação dos precipitados mencionados anteriormente e a conseqüente mudança de morfologia de microestrutura causada pela adição do cobre. Da Silva *et al*⁽⁷⁾ obteve uma dureza média de $424,58 \pm 6,44$ HV, para a liga 55,8Ni-44,2Ti (% at), bastante superior aquela da liga equiatômica obtida neste trabalho. No entanto, sabe-se que os fios são produzidos, além da fusão, por processos de conformação mecânica tais como trefilação e extrusão. Isto justifica a dureza e microestrutura obtidas por Da Silva *et al*.⁽⁷⁾

Os valores das temperaturas de transformação de fase de uma LMF dependem essencialmente do controle rigoroso de sua composição química e dos processos de conformação e/ou fabricação das mesmas. Por exemplo, na literatura encontra-se para LMF Ti-Ni equiatômicas ou de composições próximas a esta, valores de M_s que variam desde -27°C a 54°C.^(3, 8) E para as ligas Ti-Ni-Cu encontra-se valores de M_s na faixa de 9 °C a 46 °C.^(8, 9) Observando-se as Figuras 4a e 4b, ou a Tabela 3, constata-se que as temperaturas de transformação de fase obtidas neste trabalho estão de acordo com a literatura.

Na Figura 4a verifica-se também a presença da fase R intermediária que ocorre na liga equiatômica Ti-Ni como um pico sobreposto ao pico da transformação austenita – martensita durante o resfriamento. Conforme mencionado anteriormente, uma das influências da adição de cobre em substituição ao níquel, é a inibição da formação de precipitados com conseqüente eliminação dessa transformação intermediária (fase R),⁽³⁾ como pode ser visto na Figura 4b.

Pela Tabela 3 nota-se que a histerese em temperatura (H_T) da LMF Ti-Ni-Cu é praticamente a metade daquela observada na LMF Ti-Ni. Esta redução de H_T pela adição de cobre ocorre devido à eliminação da transformação intermediária durante o resfriamento (austenita–fase R). A histerese em temperatura estreita é uma característica própria das LMF Ti-Ni-Cu, tornando-as boas candidatas a aplicações onde se exige uma resposta rápida do EMF. Assim, as ligas Ti-Ni-Cu despertam interesses no campo de aplicações como sensores e/ou atuadores.⁽¹⁰⁾ Segundo Cai *et al*,⁽¹¹⁾ a H_T ainda pode ser reduzida através de treinamentos termomecânicos

apropriados. Já as LMF com histereses largas – a liga equiatômica Ti-Ni, por exemplo – são as preferidas para aplicações de acoplamentos tais como juntas aparafusadas e conexões de tubos, onde o elemento em LMF é deformado a baixa temperatura, instalado no sistema mecânico e aquecido para gerar força.⁽²⁻⁴⁾

A adição de cobre às ligas equiatômicas Ti-Ni também influencia as curvas de *Resistência Elétrica versus Temperatura (R-T)*. A Figura 5a mostra as curvas *R - T* obtidas para a LMF Ti-Ni, enquanto a Figura 5b apresenta os resultados para a LMF Ti-Ni-Cu. Constata-se que o cobre é capaz de modificar a forma da curva *R-T* apresentada pelas LMF Ti-Ni equiatômicas, levando a forma clássica (em “S”), como pode ser visto na Figura 5b. Ainda na Figura 5a verifica-se a influência do número de ciclos térmicos nas curvas *R-T* da LMF Ti-Ni equiatômica. Nota-se que, com o aumento do número de ciclos térmicos, o pico da curva de resfriamento (fase R) torna-se mais evidenciado. À medida que se eleva o número de ciclos térmicos (N) para valores bem mais acentuados, por exemplo, $N = 100$, espera-se que as temperaturas M_s e M_f diminuam, sem que ocorram alterações significativas nas temperaturas R_s , R_f , A_s e A_f .⁽³⁾ Como pode ser observado na Figura 5b, os ciclos térmicos não produzem alterações significativas no comportamento *R-T* da LMF Ti-Ni-Cu, já que as curvas ficaram praticamente superpostas.

A Figura 6a apresenta o resultado obtido do experimento de geração de força em função da temperatura com o sistema da Figura 1a, para a LMF Ti-Ni. O ponto A na curva indica o início do resfriamento da lâmina, a qual foi deformada da flecha central (y, Tabela 1) quando a temperatura atingiu o valor de -40°C , valor esse inferior ao da temperatura M_f da liga. A força aumenta à medida que a lâmina é deformada, atingindo um valor de aproximadamente 115 N (ponto B). Quando se interrompe a aplicação de carga nota-se um relaxamento de força até alcançar o valor aproximado de 62 N (ponto C). A força registrada pela célula de carga volta a aumentar quando se inicia a ativação do EMF (ponto D) durante o aquecimento da amostra. Assim, a força gerada pela LMF Ti-Ni (FG_{NT}) em modo de flexão 3 pontos alcança o valor de aproximadamente 100 N ($162\text{ N} - 62\text{ N}$). Um comportamento semelhante foi observado por Queiroga⁽¹²⁾ quando do estudo de uma LMF Cu-Al-Ni.

Alguns estudos de geração de força semelhantes ao da Figura 6a servem como uma análise prévia para geração de força em peças de geometrias mais complexas do que uma lâmina. Por exemplo, os dispositivos de pré-carga do tipo arruelas fabricados a partir de LMF Ti-Ni, demonstram capacidade de gerar forças de recuperação bem mais elevadas, quando deformados em compressão e depois aquecidos, em relação àquela força gerada pela lâmina no ensaio de flexão em três pontos.^(2,4) Antonios et al.⁽⁴⁾ obtiveram forças de recuperação da ordem de 1750 N com uma arruela de Ti-Ni com altura de 5,8 mm, diâmetro interno de 9,6 mm e diâmetro externo de 10,4 mm. Como foi citado anteriormente, esse nível de força é bastante superior aquele verificado na Figura 6a, pois a lâmina testada no corrente trabalho é muito menos robusta que o dispositivo utilizado por de Antonios et al.⁽⁴⁾ Além disso, ainda existe o fato da deformação introduzida não ser homogênea no caso da flexão 3 pontos, em comparação com a deformação compressiva.

A Figura 6b apresenta o resultado da geração de força para a LMF Ti-Ni-Cu, obtido com a máquina Instron (Figura 6b). O ensaio para a LMF Ti-Ni-Cu foi conduzido de modo análogo ao da LMF Ti-Ni. Assim, da Figura 6b, a força gerada pela LMF Ti-Ni-Cu (FG_{NTC}), através do EMF, alcança o valor de aproximadamente 166,0 N ($205,5\text{ N} - 39,5\text{ N}$).

Dos resultados de geração de força verifica-se que $FG_{NTC} > FG_{NT}$ (da ordem de 66%). Esse resultado indica uma melhor capacidade de geração de força –

através do EMF, em modo de flexão 3 pontos, por parte da LMF Ti-Ni-Cu em comparação com a liga Ti-Ni equiatômica, mesmo considerando que os ensaios foram realizados em equipamentos distintos.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre as LMF Ti-50Ni (% at) e Ti-45Ni-5Cu (% at), ambas fabricadas através da técnica *Plasma Skull Push-Pull* (PSPP). Verificou-se que a adição de cobre à liga Ti-Ni equiatômica – em substituição ao níquel – além de modificar a morfologia da microestrutura, foi capaz de reduzir em aproximadamente 14 % a dureza média da liga, antes equiatômica. Outra característica observada na liga Ti-Ni-Cu foi à eliminação da transformação de fase intermediária (austenita - fase R) durante o resfriamento, com a conseqüente redução da histerese em temperatura. Assim, confirmou-se que as LMF Ti-Ni-Cu são promissoras para aplicações no campo de sensores e/ou atuadores onde uma frequência de ativação mais rápida seja relevante. Por outro lado, a liga Ti-Ni apresentou uma histerese em temperatura maior, quando comparada à liga Ti-Ni-Cu. Este comportamento confere a LMF Ti-Ni equiatômica o potencial de aplicações em dispositivos de acoplamentos. Além disso, demonstrou-se, através de medidas de resistência elétrica, que a ciclagem térmica pode alterar significativamente a transformação de fase na liga Ti-Ni, enquanto não promove alterações relevantes na liga Ti-Ni-Cu. Finalmente, foi constatada também uma melhor capacidade de geração de força, através do EMF, em modo de flexão três pontos por parte da LMF Ti-Ni-Cu em comparação com a liga Ti-Ni equiatômica, mesmo considerando que os ensaios foram realizados em equipamentos distintos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento dos projetos 550325/2005-0 (CT-Energ) e 504365/2004-5 (CT-Petro) durante o tempo de realização das pesquisas.

REFERÊNCIAS

- 1 Navarro, R. F.. A Evolução dos Materiais. Parte 1: da Pré-história ao Início da Era Moderna. Revista Eletrônica de Materiais e Processos – REMAP, Vol. 1, p. 1-11, 2006.
- 2 Hesse, T.; Ghorashi, M.; Inman, D. J. Shape Memory Alloy in Tension and Compression and its Application as Clamping-force Actuator in a Bolted Joint: Part 1 – Experimentation. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 15, pgs 577 – 587, 2004.
- 3 Otsuka, K.; Wayman, C.M. Shape Memory Materials. Cambridge University Press, Cambridge, England, 1998.
- 4 Antonios, C.; Inman, D. J.; Smaili, A. Experimental and Theoretical Behavior of Self-healing Bolted Joints. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.17, p. 499–509, 2004.
- 5 Machado, L. G., Savi, M.A. Medical applications of shape memory alloys. Brazilian Journal of Medical and Biological, Vol. 36, pgs 683-391, 2002.

- 6 NURVEREN, K.; AKDOGAN, A.; HUANG, W.M.. Evolution of transformation characteristics with heating/cooling rate in NiTi shape memory alloys. *Journal Of Materials Processing Technology*, Istanbul, p. 129-134, 2007.
- 7 Da Silva, L. B.; Oliveira, R. C.; Vearick, S. B.; Michelon, M. D. O.; Schaeffer, L. Caracterização de Fios Nitinol, In: 61° Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, pgs 4254 – 4260, 2006.
- 8 Zu, X.T.; Wang, Z.G.; Dai, J.Y; Fub, P; Feng, X.D. Effect of thermomechanical training temperature on the two-way shape memory effect of TiNi and TiNiCu shape memory alloys springs. *Materials Letters*, Vol. 57, p. 1501–1507, 2003.
- 9 Fu, Y.; Du, H. RF magnetron sputtered TiNiCu shape memory alloy thin film. *Materials Science and Engineering*, pgs 10-16, 2003.
- 10 Colombo, S.; Cannizzo, C.; Gariboldi, F.; Airoldi, G.. Electrical resistance and deformation during the stress-assisted two-way memory effect in Ni45Ti50Cu5 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 422, p. 313-320, 2005.
- 11 Cai, W.; Meng, X. L.; Zhao, L.C. Recent development of TiNi-based shape memory alloys. *Solid State and Materials Science*, Vol 9, p. 296-302, de 2005.
- 12 QUEIROGA, S. L. M.; ARAÚJO, C. J.; GOMES, A. A. C. Comportamento Termo-Mecânico de uma Liga Cu-Al-Ni com Efeito Memória de Forma. In: 61° Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, pgs 2933 – 2941, 2006.