

CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA PARA O USO NO CONTROLE PASSIVO DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO

Bruno Bianchini^{1*}, João Henrique S. Mota², Piter Gargarella¹, Conrado R. M. Afonso², e Armando I. S. Antonialli²

1 - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.

2 - Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.

bruno.bianchini@estudante.ufscar.br

RESUMO

Processos de fabricação que necessitam do uso de ferramentas de corte esbeltas, tais como furação, fresamento de topo e mandrilamento estão sujeitos a altas vibrações em razão da alta razão entre comprimento e diâmetro da ferramenta. Para a redução da vibração do processo de fresamento de topo, é sugerida a utilização de ligas de memória de forma para o controle passivo do processo. Este artigo tem como intuito apresentar a caracterização mecânica de duas dessas ligas. As ligas utilizadas no estudo são compostas por 55.8 wt% Ni 44.2 wt% Ti e por Cu + 14.0wt% Al + 4%wt Ni. A caracterização foi feita por meio da realização de testes ultrassônicos, e de dureza Vickers HV. Para além dos testes, a caracterização também realizou a microscopia óptica, para identificação das fases presentes, bem como da porcentagem de cada uma delas, e a microscopia eletrônica de varredura, para visualização de precipitados e microanálise química. Os testes foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Com base nos ensaios realizados pode-se inferir que as ligas com memória de forma são adequadas para a aplicação proposta.

Palavras-chave: *Caracterização, Ligas de memória de forma, Controle Passivo.*

INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores que influenciam a qualidade da superfície de peças usinadas é a vibração envolvida em seu processo de fabricação. Processos onde há a necessidade da utilização de ferramentas esbeltas, ou seja, com alta razão entre comprimento e diâmetro, estão mais sujeitos a vibração, e conseqüentemente a uma pior qualidade na superfície usinada. Tendo isso em vista, diversas soluções são propostas para a redução da vibração nos processos de usinagem. Dentre tais possibilidades, a utilização de materiais inteligentes, como as ligas de memória de forma, se mostra uma solução promissora.

Ligas de memória de forma são amplamente utilizadas para o amortecimento em diversas áreas tecnológicas, como aeronáutica, robótica e biomedicina⁽¹⁾. Sua utilização em micro-rotors para aplicação em processos de micro-usinagem foi estudada⁽²⁾. Os autores criaram um protótipo para a fixação de ferramenta de corte feito de liga de memória de forma para o processo de microfresamento. Foi validado que o protótipo sofreu influência das forças centrífugas, podendo assim ser utilizado para a redução de vibração nos processos de microusinagem.

Caracterização de ligas de memória de forma

A partir de ensaios de tração-compressão, uma liga de memória de forma de Cu-Zn-Al-Ni teve suas propriedades dinâmicas obtidas, principalmente quanto ao amortecimento focado na absorção de energia sísmica⁽³⁾. Os ensaios foram aplicados em duas ligas, uma feita por meio de laminação a quente, e uma feita por meio de extrusão. Histereses de tensão e deformação foram analisadas e pode se concluir que a presença da fase de martensita absorve energias em altas deformações; o amortecimento é uma função da deformação e que a forma de manufatura das ligas não apresenta influência no amortecimento.

Fitas feitas de ligas de nitinol (Ni-Ti) tiveram suas propriedades mecânicas determinadas por Mehrabi et al⁽⁴⁾. As fitas foram produzidas por meio da fundição por sucção, diferentes concentrações de cobre nas ligas foram utilizadas. Quando prontas foram expostas a ciclos térmicos e ensaios de flexão utilizando uma roda de cobre polido como ponto de apoio para a flexão. Após os ensaios as fitas foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura. Os autores puderam concluir que a adição de cobre acaba estreitando a curva de histerese da liga.

Visando a redução da vibração do processo de fresamento de topo de aços ferramentas H13 para trabalho a quente, duas novas ferramentas são propostas. As ferramentas, feitas de aço H13 endurecido, terão uma cavidade interna para serem preenchidas com ligas de memória de forma. As ligas atuarão fazendo o controle passivo do processo de fresamento. A primeira ferramenta será preenchida com Nitinol (55.8 wt% Ni 44.2 wt% Ti) e a segunda com uma liga de composição Cu+ 14.0wt% Al + 4%wt Ni. A caracterização mecânica das ligas foi realizada e é exposta neste trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram fabricados, por meio de um processo de fundição por sucção, cilindros de 5 mm de diâmetro em cada uma das ligas (55.8 wt% Ni + 44.2 wt% Ti e Cu + 14.0wt% Al + 4%wt Ni), dos quais foram retiradas amostras nas extremidades denominadas A (superior, mais próxima ao arco elétrico) e B (inferior, mais distante do arco elétrico) para análise metalográfica. Ambas as ligas foram primeiramente submetidas a um ensaio ultrassônico para a caracterização mecânica, mais especificamente para a obtenção dos valores de rigidez e de amortecimento, considerando as ligas em flexão. Tal consideração foi feita pois para suas aplicações - preenchimento interno de ferramentas de fresamento vertical - as ligas podem ser modeladas como vigas engastadas.

Em paralelo, ambas as ligas foram submetidas a análise metalográfica por microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Para tanto, foram lixadas até 2000 *mesh* e polidas com alumina (granulometria 3 μ m), e então atacadas quimicamente – com reagente Kroll, por 30s, para a liga de Ni-Ti, e com uma solução de H₂O-HNO₃ (2:1), por 30s, para a liga de

Cu-Al-Ni. Adicionalmente, as amostras A e B de cada liga foram submetidas a ensaio de dureza Vickers, com carga de 0.3 kgf e manutenção por 15s. Por fim, foram retiradas amostras para ensaio de difração de raios-X (DRX) na secção longitudinal a fim de identificar as fases presentes, e calorimetria de varredura diferencial (DSC) para identificação das temperaturas de transformação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização mecânica

O teste ultrassônico realizado utilizando o sistema *sonelastic* obteve os valores apresentados na Tab. 1 para rigidez (K), coeficiente de amortecimento (ζ) e frequência natural (f_n). Vale ressaltar que por *default* o sistema considera as amostras sendo isotrópicas e lineares. Pode-se notar uma discrepância de uma ordem de grandeza nos valores obtidos para a frequência natural de ambas as amostras, o que não é esperado. Tal discrepância será discutida com base nos resultados obtidos pela análise metalográfica.

Tabela 1: Características dinâmicas das ligas

Liga	NiTi	CuAlNi
K [N/m]	1,92476e5	1,77121e6
ζ	0,00166	0,0036
f_n [Hz]	1474	11936

Outro ensaio mecânico realizado foram os testes de dureza. A Tab. 2 exibe os resultados dos testes de dureza Vickers. Para a liga de Cu-Al-Ni, observaram-se resultados próximos em ambas as regiões, enquanto para a liga de Ni-Ti, observa-se uma diferença entre os valores das duas amostras, ainda que os valores estejam relativamente próximos.

Tabela 2: Resultados das medições de dureza Vickers nas amostras.

Liga	Amostra A (média – HV _{0.3})	Amostra B (média – HV _{0.3})
Ni-Ti	258±16	209±9
Cu-Al-Ni	242±9	251±6

Caracterização do material

A Fig. 1 mostra as imagens aferidas no microscópio ótico (MO) (a-d), além das imagens de MEV (e-f) obtidas para as amostras de Cu-Al-Ni. Com base nas características do processo de fundição, pode-se inferir que as amostras B, por serem parte do material vazado antes para dentro do molde de cobre e, conseqüentemente, solidificarem em local mais distante do arco elétrico, sofrem uma taxa de resfriamento mais alta, sendo assim mais propícias à formação de martensita ou, no caso de formação de fase B₂, terem uma microestrutura mais refinada. No caso da liga de Cu-Al-Ni, houve coerência com essa previsão, na medida em que a amostra A apresentou uma microestrutura composta principalmente de fase B₂, com grãos alongados que se nucleiam na parede do molde e crescem na direção do centro da amostra. Por outro lado, na amostra B, observa-se uma microestrutura predominantemente martensítica, composta tanto de β_1' (mais refinada) quanto γ_1' (mais grosseira).

A Fig. 2 mostra as micrografias para a liga de Ni-Ti. Como é possível ver pelas imagens, a amostra não aparenta possuir fase martensítica na sua condição após ser retirada do molde, sendo a sua microestrutura predominantemente composta por fase B2. Inicialmente, observa-se que a microestrutura da amostra A parece extremamente refinada, diferentemente da amostra B, o que não seria condizente com a as diferentes taxas de resfriamento para ambas as regiões. Ao analisar a amostra por MEV, no entanto, pode-se ver pela Fig. 2(c) que as marcas mais escuras são muito grosseiras e não representam contornos de grão, sendo possivelmente marcas provocadas pelo ataque químico. Mesmo na análise por MEV, não foi possível observar fase martensítica nas amostras de Ni-Ti.

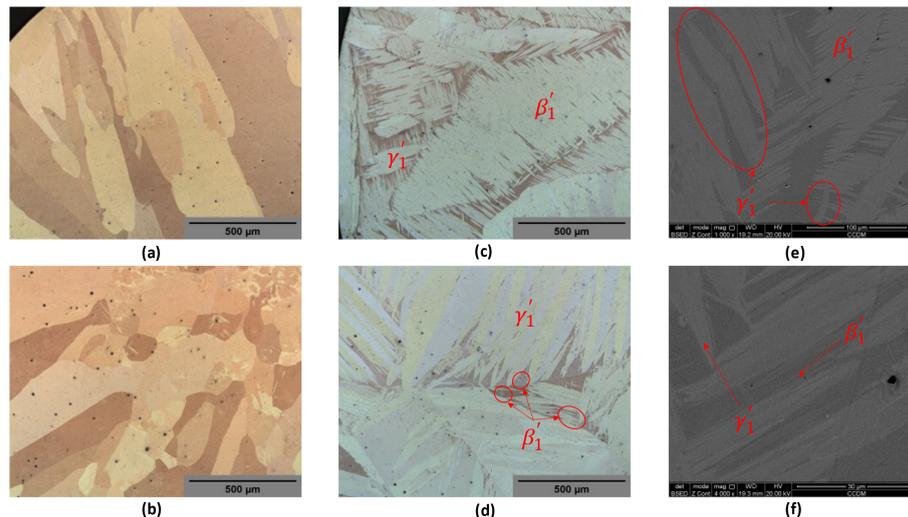


Figura 1: Micrografias da liga de Cu-Al-Ni: (a) MO, amostra A – borda (100x); (b) MO, amostra A – centro (100x); (c) MO, amostra B – borda (100x); (d) MO, amostra B – centro (100x); (e) MEV, amostra B (1000x, escala no canto inferior direito 100 μm); (f) MEV, amostra B (4000x, escala no canto inferior direito 30 μm). Reagente H₂O:HNO₃ (2:1), ataque por 30s.

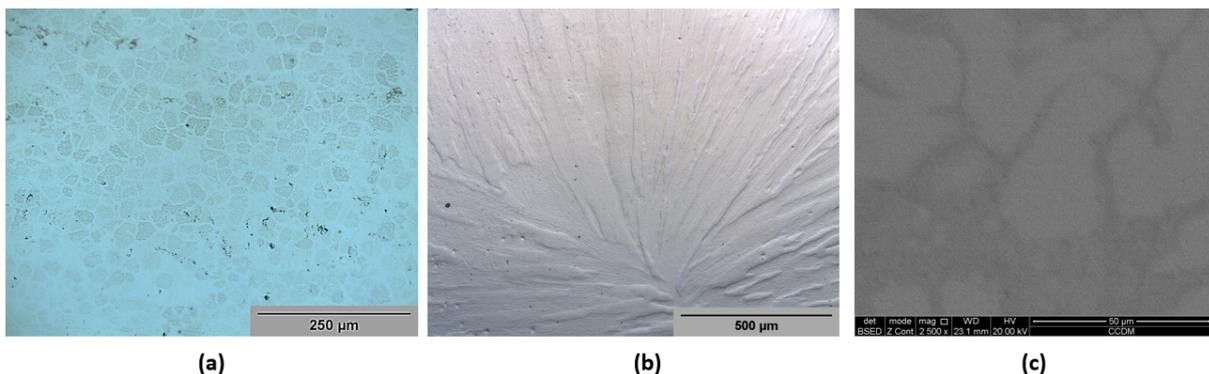


Figura 2: Micrografias da amostra de Ni-Ti: (a) MO, amostra A (200x); (b) MO, amostra B (200x); (c) MEV, amostra A (2500x). Reagente Kroll, ataque por 30s.

A Fig. 3 mostra os gráficos obtidos no ensaio de difração de raios-X para as ligas de Ni-Ti (a) e Cu-Al-Ni (b). Na liga de Ni-Ti, o ensaio revelou uma predominância de fase B2 (austenítica), com apenas um pico mais discreto indicando uma possível formação de fase B19' (martensítica). Por outro lado, a liga de Cu-Al-Ni apresentou uma maior quantidade de picos de difração que podem-se atribuir às fases martensíticas β_1' (estrutura 18R) e γ_1' (estrutura 2H).

A Fig. 4 mostra imagens de MEV feitas sobre indentações de dureza Vickers feitas em regiões predominantemente austeníticas de ambas as ligas (a,b), bem como as curvas obtidas pelo ensaio DSC (c). Pode-se notar que, na liga de Cu-Al-Ni, quando a deformação foi aplicada na região austenítica, observou-se a transformação martensítica nas redondezas, enquanto na liga de Ni-Ti não se pode afirmar o mesmo. Sendo assim, possivelmente a liga Cu-Al-Ni se encontra completamente no campo de estabilidade da martensita, quando em temperatura ambiente.

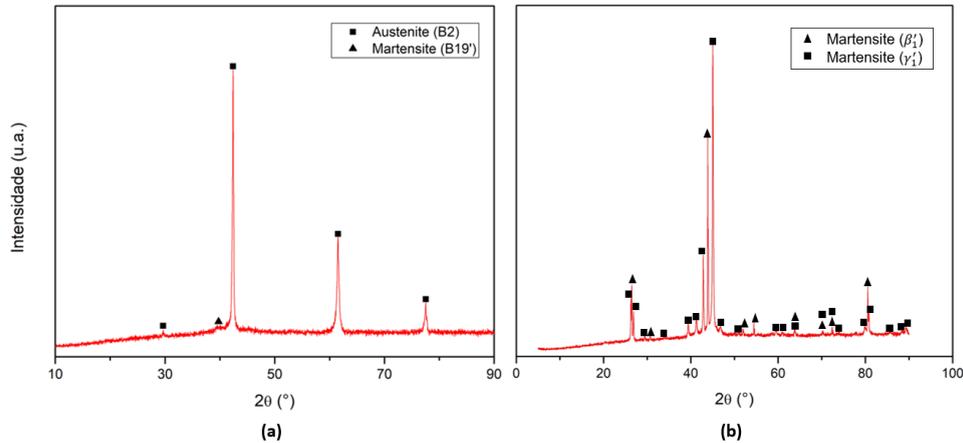


Figura 3: Padrões de difração obtidos no ensaio de DRX para as ligas (a) Ni-Ti; e (b) Cu-Al-Ni

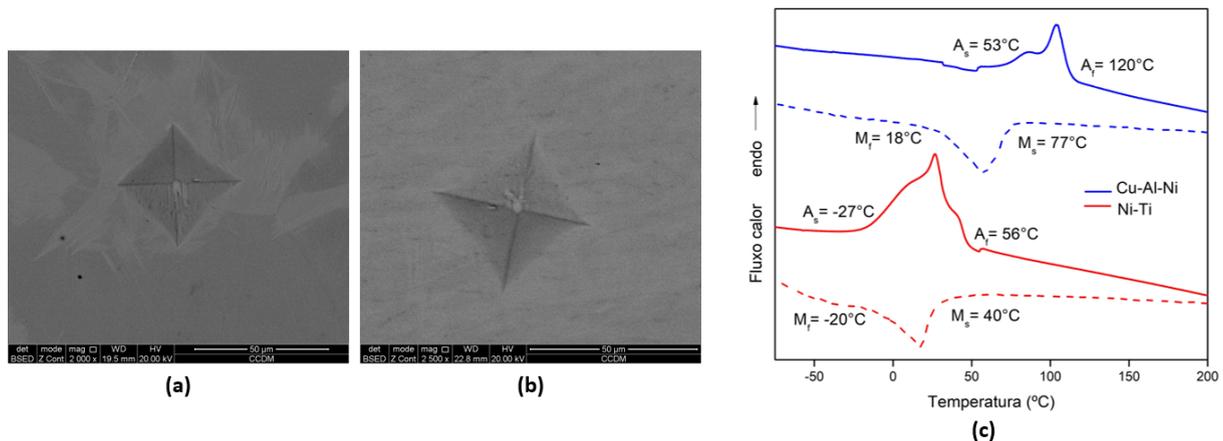


Figura 5: Imagens de MEV evidenciando indentações de dureza em regiões austeníticas para as ligas (a) Cu-Al-Ni, amostra A (2000x); (b) Ni-Ti, amostra B (2500x); (c) Curvas de DSC.

As curvas de DSC mostram que a liga de Cu-Al-Ni está no campo de martensita completamente (abaixo de $A_s=53^\circ\text{C}$) à temperatura ambiente, o que pode explicar a transformação que ocorreu nos arredores das endentações de microdureza. A liga NiTi, por outro lado, se encontra dentro do pico ou do campo de transformação (entre $A_s=-27^\circ\text{C}$ e $A_f=56^\circ\text{C}$), o que indica que pode haver uma mistura de austenita e martensita à temperatura ambiente. A análise metalográfica apontou para diferentes configurações microestruturais entre as amostras A e B para ambas as ligas, devido às variações de taxa de resfriamento, o que pode explicar os resultados discrepantes do ensaio ultrassônico.

CONCLUSÕES

Com base nos ensaios realizados e na caracterização microestrutural, pode se aferir algumas conclusões sobre as ligas de memória de forma estudadas:

- O ensaio ultrassônico juntamente com a análise metalográfica e de composição de fase apontaram para uma aptidão na utilização das ligas como amortecedores passivos no processo de fresamento
- Apesar da composição de fases apontada por Chang, S⁽⁵⁾ ser bem definida para a liga de Cu-Al-Ni, na medida em que a composição com 14 wt% Al favorece a formação de martensita do tipo γ_1 em detrimento à fase β_1 , aumentando assim o amortecimento da liga, a microestrutura da amostra fabricada por fundição por sucção não se mostra homogênea por todo o comprimento, o que pode explicar a discrepância no resultado do teste ultrassônico.
- O ataque químico com o reagente Kroll pode ter sido ineficaz em revelar alguns aspectos da microestrutura da liga Ni-Ti, sendo recomendado refazer o ataque químico com outro reagente em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao DEMa-UFSCar e ao DEMEC-UFSCar pelo uso das instalações para ensaios, além da FAPESP pelos projetos 2020/09343-1 e 2019/09381-3, cujos financiamentos possibilitaram a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

1. MOHD JANI, J., LEARY, M., SUBIC, A. and GIBSON, M.A.,. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 1078–1113, 2014.
2. HIN, W.-C., RO, S.-K., PARK, H.-W., and PARK, J.-K. Development of a micro/meso-tool clamp using a shape memory alloy for applications in micro-spindle units. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(7):579–585, 2009.
3. MORONI, M. O., SALDIVIA, R., SARRAZIN, M., and SEPÚLVEDA, A. Damping characteristics of a CuZnAlNi shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 335(1):313–319, 2002.
4. MEHRABI, K., BRUNCKO, M., and KNEISSL, A. Microstructure, mechanical and functional properties of NiTi-based shape memory ribbons. *Journal of Alloys and Compounds*, 526:45–52, 2012
5. CHANG, S. Influence of chemical composition on the damping characteristics of Cu–Al–Ni shape memory alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 125(3):358–363, 2011.

CHARACTERIZATION OF SHAPE MEMORY ALLOYS FOR USE ON THE PASSIVE CONTROL OF FACE MILLING PROCESS

ABSTRACT

Manufacturing processes which needs slender tools such as drilling, face milling, and boring are subject to high level of vibration due to the high ratio between tool length and tool diameter. In order to reduce the vibration in the face milling process, the use of shape memory alloys as passive vibration dampers is proposed. This work intends to present the mechanical characterization of two of these alloys. The alloys used in the study are composed by 55.8 wt% Ni + 44.2 wt% Ti and Cu + 14.0wt% Al + 4%wt Ni. The characterization was made by ultrasonic tests and Vickers HV hardness test. Furthermore, material characterization was also performed through optical microscopy, in order to identify the phases and their fractions,

and scanning electronic microscopy, in order to visualize precipitates and microanalysis of chemical composition. The tests were performed at the Department of Materials Engineering (DEMa) of Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Based on the tests performed, it can be inferred that these shape memory alloys are adequate for the proposed application.

Keywords: *Characterization, Shape memory alloy, Passive control.*