

Estudo comparativo das propriedades dinâmicas de uma liga NiTi com memória de forma e materiais estruturais clássicos

SILVA, N. J. ^I, DE ARAÚJO, C. J. ^{II}, GONZALEZ, C. H. ^I, GRASSI, E. N. D. ^{II}, OLIVEIRA, C. A. N. ^I

^I Laboratório de Materiais Inteligentes - LMI – DEM/CTG/UFPE: 50740-530, Recife, PE.

e-mail: niedsonjs@yahoo.com.br ; cano.oliveira@gmail.com ; cezarchg@yahoo.com

^{II} Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas - LaMMEA – UAEM/CCT/UFMG: 58429-140, Campina Grande, PB.

e-mail: carlos@dem.ufcg.edu.br ; end.grassi@hotmail.com

RESUMO

As ligas com memória de forma (LMF) são materiais ativos que têm atraído atenção devido às suas superiores propriedades de amortecimento quando comparadas aos materiais estruturais convencionais. Esses materiais apresentam uma alta capacidade de amortecimento, tanto durante a transformação de fase quanto na fase martensítica, em baixas temperaturas. Neste trabalho a LMF NiTi, alumínio comercial, aço inoxidável e latão foram submetidos à análise dinâmico-mecânica (DMA) em modo de viga simplesmente engastada. Pequenas amostras na forma de lâminas foram fabricadas para a realização dos testes. A LMF NiTi estudada apresentou um pico de capacidade de amortecimento durante a transformação de fase, levando o amortecimento a valores muito superiores àqueles apresentados pelos materiais convencionais. Além disso, foi observado que a liga NiTi apresenta um aumento do módulo de armazenamento durante a transição da fase de baixa temperatura para a fase de alta temperatura, o que abre uma extensa diversidade de opções para aplicações tecnológicas para essas ligas, enquanto um decréscimo quase linear da rigidez foi verificado para os materiais convencionais estudados.

Palavras chaves: Ligas com Memória de Forma, Materiais estruturais, Capacidade de amortecimento, Temperatura de transformação.

Comparative study of dynamic properties of a NiTi alloy with shape memory and classical structural materials

ABSTRACT

Shape Memory Alloys (SMA) are active materials that have been attracting attention due to their superior damping properties when compared to the usual structural materials. Those materials present a high damping capacity, during the phase transformation as well in martensitic phase, on low temperatures. In this work a NiTi SMA, commercial aluminum, stainless steel and brass were submitted to dynamic mechanical analysis (DMA) in single cantilever mode. Small samples in beam form were manufactured for the accomplishment of the tests. NiTi SMA studied presented a peak of damping capacity during the phase transformation, taking the damping superior values to that presented by the conventional materials. Furthermore, it was observed that the NiTi alloy presents an increase of the storage modulus during the phase transition from low temperature phase to high temperature phase, what provides a great diversity of options for technological applications for those alloys, while an almost linear decrease of stiffness was verified for the studied conventional materials.

Keywords: Shape Memory Alloy, Structural materials, Damping capacity, Transformation temperature.

1 INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma são materiais funcionais que possuem a capacidade de recuperar deformações aparentemente plásticas através de acondicionamento térmico adequado. Esse efeito está intimamente relacionado às transformações de fase do tipo martensítica termoelástica que acontecem no interior do material. Recentemente vem surgindo um interesse tecnológico pelas propriedades dinâmicas de

LMF, principalmente aquelas das ligas de base Ni-Ti, as quais demonstram propriedades de amortecimento superiores às das LMF de base cobre [1]. A capacidade que o material possui de absorver vibrações é particularmente importante no que diz respeito à integridade de sistemas mecânicos. A alta capacidade de amortecimento apresentada pelas LMF está relacionada ao movimento de interfaces martensíticas e contornos de maclas. O amortecimento também depende diretamente de variáveis externas, como a taxa de aquecimento e resfriamento, além da frequência e amplitude de oscilação imposta. Algumas variáveis internas também influenciam na capacidade de amortecimento do material, a exemplo do tamanho de grão, densidade de variantes martensíticas e defeitos estruturais [2]. Nas LMF se espera uma alta capacidade de amortecimento e baixo módulo de elasticidade em seu estado martensítico. Durante a transformação de fase se verifica a presença de um pico da capacidade de amortecimento e um aumento do módulo de elasticidade ou rigidez [1].

A técnica utilizada para coletar dados das propriedades dinâmicas é a Análise Dinâmico-Mecânica (DMA – *Dynamic Mechanical Analysis*), a qual estuda o comportamento dos materiais sob cargas dinâmicas. Como resposta a uma carga senoidal aplicada, tem-se por medida uma curva de deslocamento (deformação) também senoidal, pela qual se obtém a capacidade de amortecimento representada pela tangente do ângulo de fase ($\tan \delta$) entre os dois sinais. O módulo de armazenamento, representado pela componente elástica e relacionado à rigidez do material, também pode ser medido. Nos ensaios dinâmicos, uma carga é imposta repetidamente ao sistema, de forma que o módulo pode ser obtido cada vez que a tensão é aplicada. A varredura através de uma temperatura ou faixa de frequência permite determinar o valor do módulo de elasticidade a cada segundo em função dos parâmetros de ensaio [3].

Alguns metais reportados na literatura são denominados de *Hidamets (High Damping Metals)* devido a sua elevada capacidade de amortecimento, correspondente a valores de $\tan \delta$ da ordem de 0,01 [4]. Nesse contexto, apesar do conhecimento existente sobre alta capacidade de amortecimento das LMF [1, 2], não são encontrados na literatura, em um mesmo trabalho, resultados comparativos entre esses materiais termicamente ativos e ligas metálicas convencionais.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é fabricar uma LMF da família NiTi, por meio da técnica *Plasma Skull Push-Pull*, e fazer um comparativo de suas propriedades dinâmicas com as de alguns materiais estruturais clássicos (alumínio, aço inoxidável e latão), visando aplicações em situações reais de utilização de equipamentos e estruturas. Portanto, pretende-se demonstrar as superiores propriedades de amortecimento da liga que apresenta o efeito de memória de forma, assim como a transformação martensítica reversível durante o aquecimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A fabricação da liga do sistema NiTi foi realizada no equipamento de fusão Discovery All da EDG Equipamentos, que utiliza o plasma térmico como meio de transmissão de energia para fundir a maioria dos metais, inclusive titânio, níquel, cromo e cobalto. Os elementos utilizados na fabricação foram níquel comercialmente puro (>99,9%) e titânio biomédico ASTM F67-00 (grau 2) na proporção de 54,7% de níquel e 45,3% de titânio (em peso). O material foi empilhado em um cadinho de cobre, o qual se localiza imediatamente abaixo de um eletrodo de tungstênio que, por sua vez, origina uma tocha de plasma em atmosfera protetora, provocando a fusão dos elementos puros. Após a fusão, a liga é injetada automaticamente em uma coquilha de alumínio, obtendo a forma de barra. Esse processo foi validado recentemente por De Araújo *et al* [5] para fabricação de LMF dos sistemas NiTi e CuAl. O material injetado foi homogeneizado a 800 °C por 2 horas no vácuo, com o intuito de garantir a uniformidade estrutural em todos os pontos da barra, seguindo-se seu corte em máquina de corte de precisão. Assim, as amostras utilizadas foram lâminas de espessuras uniformes e delgadas (aproximadamente 0,85 mm) com comprimento de 40 mm e largura de 5 mm. Os materiais clássicos foram obtidos já na forma de lâminas, comercialmente disponíveis, com dimensões próximas às da liga fabricada.

Os ensaios dinâmicos foram realizados no equipamento DMA Q800 da TA Instruments (Figura 1), instalado no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e estruturas Ativas (LaMMEA) da UFCG. A Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) consiste na aplicação de uma força oscilatória em uma amostra e o estudo da resposta do material a esta carga aplicada. Segundo a literatura, no caso de LMF NiTi e visando o mínimo de dependência dos resultados obtidos em função das condições de medição, os parâmetros padronizados para a realização dos ensaios dinâmicos em materiais metálicos são: frequência de 1 Hz, taxa de aquecimento de 5 °C/min e amplitude de oscilação de 5 μm [2]. O estudo de sensibilidade paramétrica realizado por Silva [6] confirmou que estes valores fornecem picos de amortecimento de melhor qualidade, sendo ideais para os ensaios de LMF NiTi. Portanto, os ensaios dinâmicos realizados foram do tipo rampa de temperatura com os parâmetros recomendados e no modo de viga simplesmente engastada (*single cantilever*), como visualizado na Figura 2. Um estudo semelhante a esse foi realizado por Silva *et al* [7], no entanto com a LMF sendo

submetida ao processo de laminação a quente, demonstrando capacidade de amortecimento inferior aos resultados mostrados nesse trabalho.

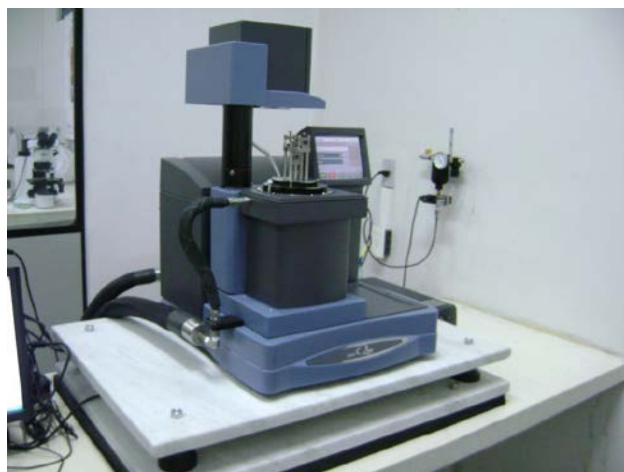


Figura 1: Analisador dinâmico-mecânico (DMA) Q800 da TA Instruments.

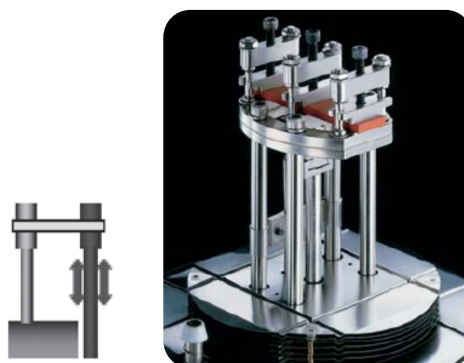


Figura 2: Modo de carregamento do tipo viga simplesmente engastada (single cantilever).

Fonte: TA Instruments [8].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento da capacidade de amortecimento para todas as amostras pode ser observado na Figura 3, onde a liga NiTi, o alumínio, aço inoxidável e latão foram submetidos a ensaios dinâmicos do tipo rampa de temperatura com parâmetros otimizados [6], correspondentes a uma taxa de 5 °C/min, com frequência de 1Hz e amplitude de oscilação de 5 μ m.

Conforme mencionado anteriormente, os *Hidamets* (*High Damping Metals*) possuem elevada capacidade de amortecimento, correspondentes a valores de $\text{Tan } \delta$ da ordem de 0,01. Como se pode constatar da Figura 3, a capacidade de amortecimento da LMF NiTi na fase martensítica (~30 °C) é superior aquela reportada para os *Hidamets*, enquanto a dos metais convencionais é bastante inferior. Esse comportamento permanece desde a temperatura ambiente até temperaturas intermediárias (em torno de 80 °C). Durante o aquecimento se percebe um aumento de $\text{Tan } \delta$ quase linear nos materiais clássicos, sendo mais suave para as amostras de aço inoxidável e latão. Para se ter uma quantificação desse comparativo, segundo a literatura, para o alumínio alcançar capacidade de amortecimento de 0,01, um onze avos do encontrado no pico de transformação da liga NiTi, precisa-se elevar a temperatura até 250 °C [9]. Os resultados obtidos para esses materiais também estão em concordância com a literatura, inclusive em valores absolutos.

Durante a transformação de fase, devido ao movimento das interfaces martensíticas, pode ser observado um pronunciado pico de amortecimento na LMF NiTi, enquanto os materiais clássicos apresentam tendência de crescimento, porém discreto. Em altas temperaturas, após a transformação de fase, a LMF apresenta um decréscimo em sua capacidade de amortecimento pelo fato de a fase austenita caracterizar-se por absorver menos energia mecânica, enquanto o alumínio demonstra maiores valores de $\text{Tan } \delta$. Portanto, o

alumínio apresenta maior absorção de energia que a LMF, o aço inoxidável e o latão em temperaturas mais elevadas (a partir de 100 °C).

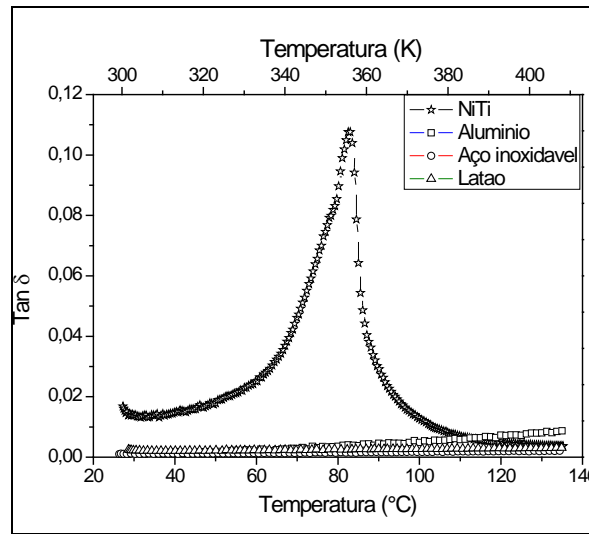
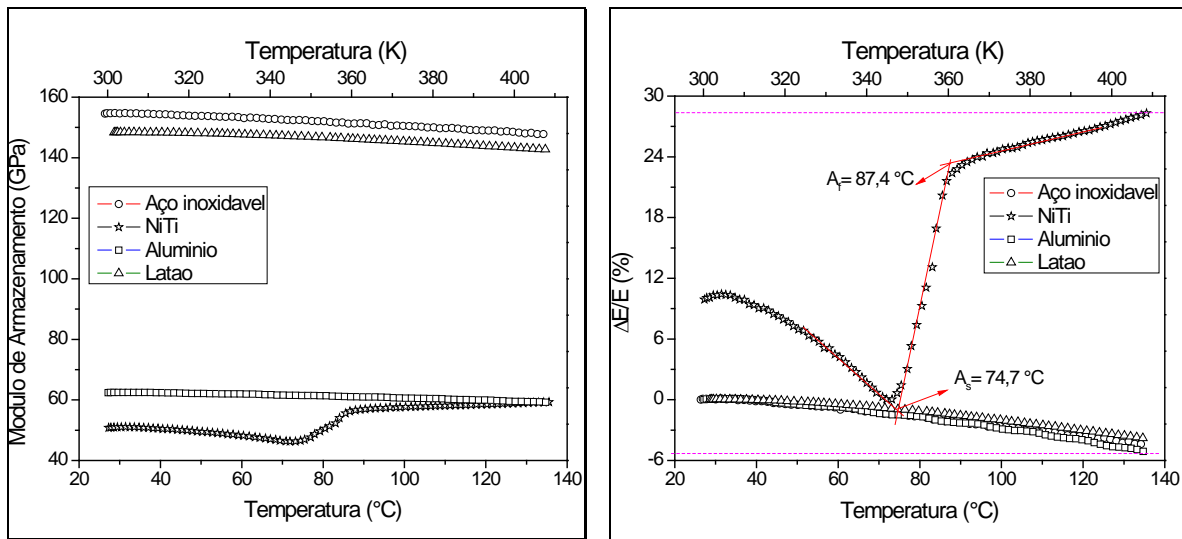


Figura 3: Capacidade de amortecimento em função da temperatura para a LMF NiTi, alumínio, aço inoxidável e latão.



(a)

(b)

Figura 4: Variação do módulo de armazenamento em função da temperatura para as amostras de NiTi, alumínio, aço inoxidável e latão. (a) Valores absolutos e (b) Percentual de variação.

Na Figura 4, visualiza-se o comportamento do módulo de armazenamento com o aumento da temperatura nas amostras estudadas. A Figura 4(a) mostra os módulos em seus valores absolutos, enquanto na Figura 4(b) é ilustrada a variação percentual do módulo.

Percebe-se que os materiais clássicos apresentam redução dos seus módulos, enquanto a LMF demonstra comportamento oposto, mostrando aumento durante a transformação de fase. Os valores dos módulos à temperatura ambiente estão compatíveis aos encontrados na literatura [10], assim como o seu comportamento com a elevação da temperatura [11, 12]. A partir da Figura 4(b) verifica-se um decréscimo percentual do módulo de armazenamento em torno de 5 % para os materiais clássicos, enquanto a LMF NiTi experimenta um acréscimo em torno de 28 %, que se dá devido ao aumento da rigidez do material com a transformação de fase. Essa progressão do módulo na LMF é um comportamento bem conhecido e relatado

na literatura [13, 14]. A partir dessas curvas, pode-se também obter as temperaturas de transformação de fase martensítica reversa (martensita→austenita) através do método das tangentes, como se pode visualizar o $A_s=74,7$ °C e $A_f=87,4$ °C. Em comparação às temperaturas obtidas por meio de outros ensaios térmicos, como calorimetria exploratória diferencial (DSC) e resistência elétrica, estes resultados de A_s e A_f em DMA apresentam temperaturas mais elevadas. Esse retardo da transformação ocorre porque existe uma diferença entre a estabilização das propriedades mecânicas e a transformação de fase instantânea do material, observação que é bastante importante para aplicações práticas envolvendo cargas dinâmicas ou vibrações mecânicas. Batalu et al [15] obtiveram resultados semelhantes durante a realização de estudo comparativo entre a técnica de DMA e DSC com uma LMF NiTi. Por outro lado, uma análise realizada por Chang & Wu [16] apresenta resultados bastante semelhantes entre as técnicas de DSC e DMA quando a taxa de aquecimento/resfriamento é reduzida a valores tão baixos quanto possível (se aproxima de zero), fornecendo maior tempo para a estabilização das propriedades mecânicas.

A Figura 4(b) mostra mais claramente o aumento de rigidez da LMF NiTi durante o aquecimento, contrariamente ao comportamento dos metais convencionais. Esse ganho de rigidez pode ser usado para atenuar e controlar vibrações mecânicas em estruturas inteligentes que incorporem componentes mecânicos fabricados com LMF [13], correspondendo a aplicações de alta tecnologia de interesse principalmente do setor aeronáutico.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma comparação entre as propriedades dinâmicas de uma liga da família NiTi com efeito de memória de forma e materiais estruturais clássicos, com o intuito de demonstrar, em um mesmo estudo, o grande efeito da transformação de fase sobre a rigidez e o amortecimento destes metais termicamente ativos. De acordo com os resultados alcançados usando a técnica de DMA, constatou-se que a liga NiTi estudada apresenta uma capacidade de amortecimento muito superior a dos materiais clássicos e dos *hidamets*, tanto na região martensítica quanto durante a transformação de fase, resultado da absorção de energia pelos contornos de maclas e mobilidade da interface martensítica, respectivamente. No entanto, na região austenítica, em altas temperaturas, constata-se um aumento na rigidez do material, o que leva a uma diminuição da absorção de energia e, conseqüentemente, da capacidade de amortecimento da LMF. Apenas a altas temperaturas, superiores a 110 °C, o alumínio passa a apresentar amortecimento superior aos outros materiais estudados nesse trabalho.

De uma forma geral, os comportamentos evidenciados demonstram claramente o potencial aplicativo em projetos de estruturas mecânicas que necessitem de controle de vibrações. Estes projetos podem ser beneficiados pelo uso de LMF em detrimento de ligas metálicas convencionais, tendo em vista o aumento de rigidez e amortecimento proporcionados pelo aquecimento controlado de componentes fabricados a partir desses materiais ativos.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento dos projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo nº 574001/2008-5), Casadinho UFCG-ITA (Processo nº 620091/2008-8), além da CAPES pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor por meio do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] CAI, W., LU, X.L., ZHAO, L.C., “Damping behavior of TiNi-based shape memory alloys”, *Materials Science and Engineering*, A 394, pp. 78–82, 2005.
- [2] VAN HUMBEECK, J., “Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 355, pp. 58-64, 2003.
- [3] MENARD, K.P., *Dynamic mechanical analysis - A practical introduction*, Florida, USA, CRC Press, 1999.
- [4] VANDEURZEN, U., VERELST, H., SNOEYS, R., *et al*, “Dynamic properties of high damping metals”, *Journal de Physique*, v. 10, pp. 1169-1174, October 1981.

- [5] DE ARAÚJO, C.J., GOMES, A.A.C., SILVA, J.A., *et al.*, “Fabrication of shape memory alloys using the plasma skull push-pull process”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, pp. 3657-3664, April 2009.
- [6] SILVA, N.J., *Estudo do comportamento termomecânico de uma liga Ni-Ti com memória de forma usando análise dinâmico-mecânica (DMA)*. Dissertação de M.Sc., UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2009.
- [7] SILVA, N.J., GRASSI, E.N.D., ARAÚJO, C.J., “Dynamic properties of NiTi shape memory alloy and classic structural materials: a comparative analysis”, *Materials Science Forum*, v. 643, pp. 37-41, 2010.
- [8] TA Instruments, *Thermal analysis*, Utah, USA, Manual do equipamento, pp.104, 2008.
- [9] ZHANG, Y., MA, N., LI, X., *et al.*, “Study on damping capacity of aluminum composite reinforced with in situ TiAl₃ rod”, *Materials and Design*, v. 29, n. 5, pp. 1057-1059, 2008.
- [10] CALLISTER JR., W.D., *Fundamentals of materials science and engineering*, 5 ed., USA, Von Hoffmann Press, 2001.
- [11] CHIAVERINI, V., *Tecnologia mecânica – estrutura e propriedades das ligas metálicas*, 2 ed., São Paulo, McGraw-Hill, 1986.
- [12] MONTEIRO, S.N., MENEZES, G.W., SKURY, A.L.D., *et al.*, “Propriedades mecânicas e termomecânicas de compósitos com partículas de diamante dispersas em matriz epoxídica modificada na razão resina/endurecedor”, *Revista Matéria*, v. 11, pp. 385-394, 2006.
- [13] OTSUKA, K., WAYMAN, C.M., *Shape memory materials*, Cambridge, England, Cambridge University Press, 1998.
- [14] LAGOUDAS, D.C., *Shape memory alloys – modeling and engineering applications*, USA, Ed. Springer, Texas, 2008.
- [15] BATALU, D., GUOQIU, H., ALOMAN, A., *et al.*, “Determination of some mechanical properties of TiNi (50.6 at. % Ni) shape memory alloy using dynamic mechanical analysis and tensile tests”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, v. 8, n. 2, pp. 694 – 698, April 2006.
- [16] CHANG, S.H., WU, S.K., “Effect of cooling rate on transformation temperature measurements of Ti₅₀Ni₅₀ alloy by differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis”, *Materials Characterization*, v. 59, pp. 987-990, August 2008.