



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

INFLUÊNCIA DA LAMINAÇÃO A QUENTE NA CAPACIDADE DE AMORTECIMENTO DE UMA LIGA NiTi COM MEMÓRIA DE FORMA

Niédsen José da Silva, niedsonjs@yahoo.com.br¹
Estephannie Nobre Dantas Grassi, ed.grassi@hotmail.com²
Cezar Henrique Gonzalez, gonzalez@ufpe.br¹
Carlos José de Araújo, carlos@dem.ufcg.br²

¹ Laboratório de Materiais Inteligentes, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária - CEP 50740-530 - Recife-PE, Brasil

² Laboratório de Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande. Caixa Postal: 10069, Cep: 58429-900, Campina Grande – PB, Brasil

Resumo: Ligas com memória de forma (LMF) são materiais que tem forte potencial aplicativo como atuadores termomecânicos em diversos setores, como o aeroespacial, automobilístico, médico-odontológico, entre outros. Recentemente, tem surgido o interesse por suas propriedades dinâmicas devido ao seu alto grau de capacidade de amortecimento. Este potencial está relacionado à capacidade do material absorver energia através de movimentos internos na microestrutura. Neste trabalho, realizou-se um estudo comparativo entre a capacidade de amortecimento apresentada por uma lâmina de uma LMF NiTi como fabricada com outras conformadas mecanicamente por laminação à quente. O resultado desse estudo foi a observação dos efeitos da laminação sobre as propriedades dinâmicas desse material. A lâmina que não passou pelo processo de laminação a quente demonstrou capacidade de amortecimento muito superior com relação àquelas que sofreram deformações severas por esse processo de conformação. A análise é bastante importante quanto ao uso do material em aplicações reais, principalmente onde se observam carregamentos dinâmicos ou impactos mecânicos.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; Amortecimento; Análise Dinâmico-Mecânica, Materiais inteligentes

1. INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) são reconhecidas como materiais inteligentes principalmente por sua capacidade de converter energia térmica em trabalho mecânico. Esta capacidade está relacionada aos fenômenos de Efeito Memória de Forma (EMF) e Superelasticidade (SE). O primeiro efeito é observado quando uma LMF recupera totalmente uma deformação plástica por meio de aquecimento até uma temperatura adequada. A superelasticidade ocorre quando a LMF se encontra em temperaturas relativamente altas e consegue-se recuperar totalmente uma deformação após o simples descarregamento mecânico. As regiões de temperatura em que esses fenômenos ocorrem dependem principalmente da composição química e do processamento termomecânico do material. Estes efeitos, unicamente observados nestas ligas, aparecem graças a uma transformação de fase, do tipo martensítica termoelástica que ocorre sem difusão. Esta transformação de fase, que é reversível, ocorre em estado sólido e em uma faixa de temperatura relativamente estreita. Isto permite que o material se apresente em duas fases sólidas diferentes bastando uma variação relativamente pequena de temperatura ou de um carregamento mecânico para induzir sua ativação. Numa faixa de temperatura mais alta a liga se apresenta no estado austenítico. Esta fase, de mais alta temperatura, possui elevada rigidez em relação à fase apresentada em baixas temperaturas, a martensita, que possui baixa rigidez e por isso é facilmente deformável (Otsuka e Wayman, 1998). Além do EMF e da SE, nos últimos anos as LMF, principalmente aquelas a base de NiTi, vêm chamando atenção também por suas propriedades dinâmicas diferenciadas. A capacidade de amortecimento e o módulo de armazenamento apresentado por estas ligas, tanto em termos de valores absolutos quanto pelo seu comportamento singular, fazem com que estes materiais apresentem forte potencial para aplicações de amortecimento de vibrações mecânicas (Van Humbeek, 2003). Em temperaturas mais baixas, onde a estrutura presente é a martensita foi observado um valor de amortecimento até cinco vezes maior que o de metais clássicos como alumínio e aço inox, na mesma faixa de temperatura (Silva et al, 2009; Silva et al, 2010). Em temperaturas mais elevadas a LMF se transforma em austenita onde, pela elevada rigidez da estrutura cristalina, possui baixos níveis de amortecimento.

Durante a transformação de fase observa-se um pico de amortecimento, que aumenta a capacidade de absorção de energia do material a valores muito mais elevados que em sua fase martensítica de baixa temperatura.

Sabe-se que o amortecimento observado nas LMF em sua fase martensítica e durante a transformação de fase tem a contribuição de duas importantes parcelas: o movimento das interfaces de variantes de martensita e a presença de discordâncias na microestrutura. A primeira depende principalmente da mobilidade atômica, enquanto a segunda parcela é diretamente proporcional à densidade de discordâncias na estrutura (Cai et al, 2005). Isto indica que deve existir um ponto ótimo para a densidade de discordâncias onde o amortecimento será maximizado.

Sabendo disto, o presente estudo se propõe a investigar a influência da laminação à quente, que introduz defeitos microestruturais no material, sobre as propriedades dinâmicas de uma LMF a base de NiTi. Para tanto, serão fabricadas amostras de uma LMF NiTi para serem laminadas à quente, com variação de espessura. Para a análise das propriedades dinâmicas serão realizados ensaios em um analisador dinâmico-mecânico comercial. Neste equipamento as amostras foram testadas em modo de viga simplesmente engastada com aplicação de carregamento mecânico com uma frequência oscilatória em uma de suas extremidades, com aquecimento simultâneo para promover a transformação de fase. O amortecimento e o módulo de armazenamento, propriedades dinâmicas de bastante interesse para aplicações em sistemas mecânicos, são analisados em função da condição de processamento de cada amostra.

2. ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA (DMA)

A Análise Dinâmico-Mecânica (*DMA – Dynamic Mechanical Analysis*) é uma técnica usada para avaliar o comportamento dos materiais sob carregamento dinâmico, relacionando estrutura molecular, condições de trabalho e geometria (Perkin Elmer, 2007). Na caracterização dos materiais esta técnica tem a vantagem de testar as amostras sob condições que são similares àquelas de trabalho. De forma simplificada pode-se dizer que o método consiste na aplicação de um estímulo oscilatório à amostra, geralmente senoidal, e na observação da resposta do material a esse estímulo (Menard, 1999). Este princípio de funcionamento torna a técnica interessante para a análise de materiais que mostrem alguma diferença entre uma força aplicada e a resposta em deformação do material. Esse comportamento é denominado de viscoelástico e são os materiais que apresentam esse comportamento os principais alvos da técnica de DMA.

A Figura (1) mostra um ciclo de carregamento e descarregamento mecânico de um material viscoelástico (Fig. 1a) e compara com o ciclo de um material puramente elástico (Fig. 1b). No primeiro caso é observada uma histerese (mostrada como a área sombreada) no interior do ciclo. Essa histerese representa a energia dissipada durante o ciclo e, portanto, o amortecimento. Para o caso de um material puramente elástico toda energia fornecida é devolvida e não há diferença entre as curvas de carregamento e descarregamento. O comportamento viscoelástico é mais pronunciado em materiais poliméricos e por isso a técnica DMA é tradicionalmente usada para o estudo desses materiais. No caso de metais esse comportamento é observado apenas em altas temperaturas. Porém, as LMF apresentam esse comportamento durante a transformação de fase e, em razão disto, a análise dinâmico-mecânica tem sido cada vez mais aplicada na caracterização destes materiais.

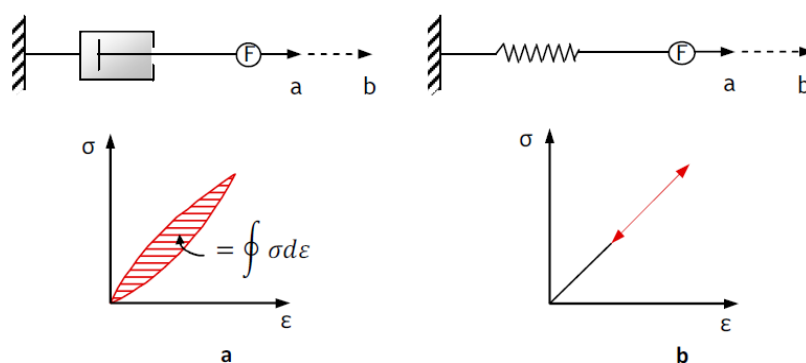


Figura 1. Ciclos de carregamento e descarregamento mecânico em materiais (a) viscoelásticos e (b) elásticos.

A técnica DMA é realizada na região elástica dos materiais e por isso quando uma tensão mecânica (ou deformação) é aplicada de forma cíclica senoidal à amostra uma resposta em deformação (ou deslocamento) será medida também em forma senoidal. Para esta situação existem dois casos extremos: o puramente elástico e o puramente viscoso. No primeiro caso tensão e deformação estão em fase. Assim, o ângulo de fase entre os dois sinais será igual a zero. No segundo caso o sinal de resposta estará defasado de 90° em relação ao sinal aplicado e diz-se que eles estão fora de fase. A Figura (2) mostra estas duas situações e ainda o caso intermediário viscoelástico. Neste caso o ângulo de fase entre os sinais será $0^\circ < \delta < 90^\circ$. Este ângulo, identificado como δ , é medido e as parcelas elástica e viscosa do material são calculadas.

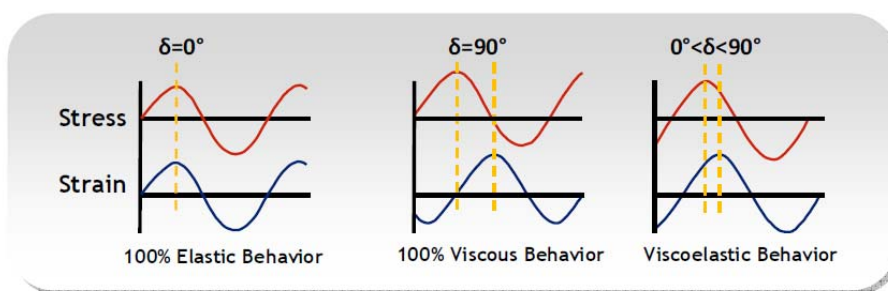


Figura 2. Diferença do ângulo de fase (δ) para o caso de materiais puramente elásticos, puramente viscosos e o caso intermediário viscoelástico.

Na análise dinâmica o módulo obtido é o módulo complexo (E^*), que possui duas componentes: módulo de armazenamento, representado por E' e o módulo de perda, representado por E'' . O módulo complexo e suas componentes estão representados na Fig. (3). O módulo de armazenamento está relacionado à rigidez do material. O módulo de perda está relacionado à energia que é dissipada durante o ciclo. A tangente do ângulo de fase δ representa matematicamente o amortecimento do material. Como esperado, o amortecimento é diretamente proporcional ao módulo de perda e inversamente proporcional ao módulo de armazenamento. Assim, para materiais puramente elásticos o amortecimento será zero, pois $\delta = 0^\circ$. Por outro lado, para materiais puramente viscosos o amortecimento será máximo, pois $\delta = 90^\circ$.

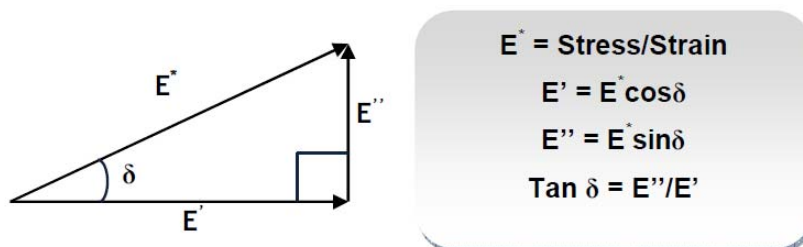


Figura 3. Módulo complexo e suas componentes: módulo de armazenamento (E') e módulo de perda (E'').

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Tendo por base uma LMF comercial da família NiTi, foi selecionada a composição de 54,7Ni-45,3Ti (% peso) para a realização desse estudo. Optou-se por esta composição em razão das temperaturas de transformação mais altas, dispensando a necessidade de resfriamento abaixo de zero para se observar a transformação de fase durante os ensaios. Os materiais utilizados foram níquel puro comercial (>99,9%) e titânio biomédico ASTM F67-00 (grau 2). As matérias-primas foram fundidas pelo processo Plasma Skull Push Pull (PSPP), descrito por De Araújo et al (2009). Uma barra prismática com aproximadamente 25 gramas foi obtida. Esta barra foi então cortada em lâminas para o posterior processo de laminação, visando à redução da espessura das amostras. Três amostras foram laminadas à quente até que se obtivessem lâminas de 0,4 mm, 0,3 mm e 0,2 mm de espessura, e comprimento e largura aproximados de 17 mm e 5 mm, respectivamente. As três lâminas foram recozidas por 15 minutos a 450°C e temperadas em água a temperatura ambiente para o surgimento da fase martensítica. Outra lâmina foi mantida apenas cortada para ser usada como referência nos ensaios, por apresentar densidade de defeitos cristalinos reduzida se comparada às que passaram pelo processo de laminação.

Os ensaios para a avaliação das propriedades dinâmicas foram realizados no equipamento comercial DMA Q800 da TA Instruments, mostrado na Fig. (4). O modo de carregamento utilizado foi o *single cantilever*, onde a lâmina é bi-engastada, sendo submetida à aplicação de um deslocamento dinâmico em uma das extremidades. A frequência de excitação usada foi de 1Hz com 5 μ m de amplitude de oscilação. Sob estas condições, a temperatura foi elevada de 25 °C até cerca de 135 °C, com uma taxa de aquecimento de 5 °C /min. Estes parâmetros foram escolhidos com base em um estudo de otimização de parâmetros realizado por Silva (2009). Dados de amortecimento ($\tan \delta$) e Módulo de Armazenamento foram coletados de todas as amostras para efetuar o comparativo de suas propriedades dinâmicas.

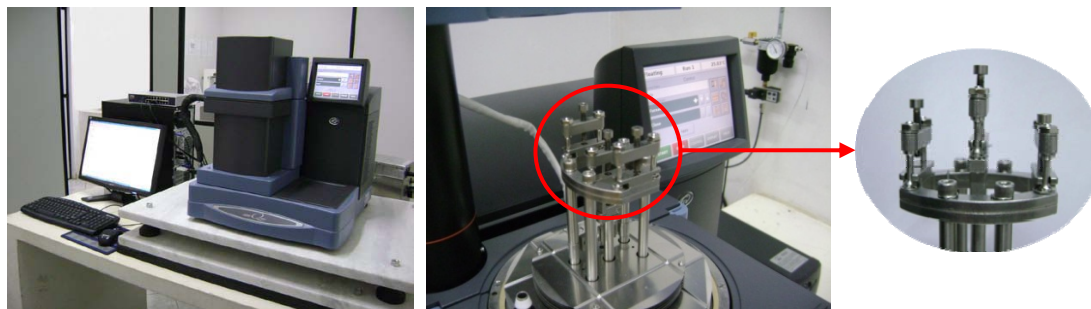


Figura 4. Analisador Dinâmico-Mecânico (DMA) do modelo Q800 da TA Instruments e detalhe do *clamp single cantilever* usado nos ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as amostras foram testadas utilizando o modo de carregamento *single cantilever*, com frequência de 1Hz, amplitude de 5 μm e taxa de aquecimento de 5°C/min. Na Fig. 5 se observa o comportamento da capacidade de amortecimento ($\text{Tan } \delta$) das amostras laminadas nas três regiões de interesse da LMF NiTi: a região martensítica, a transformação de fase e a região austenítica. Como esperado, a região martensítica apresentou valores elevados de $\text{Tan } \delta$ (até 60 °C) se comparados aos valores encontrados na região austenítica (a partir de 100 °C), devido à menor absorção de energia apresentada por esta última fase. Durante a transformação de fase (entre 60°C e 100°C) surge um pico de amortecimento devido ao movimento das interfaces entre as fases em razão dos mecanismos de transformação de fase. Como se pode observar na Fig. (5), as lâminas com menores espessuras apresentaram menores picos de amortecimento. Isto ocorre devido à elevada densidade de defeitos introduzida durante o processo de laminação, que leva à conclusão de que, quanto mais defeitos na microestrutura, menor a mobilidade existente para o movimento de discordâncias, que contribuem para a absorção de energia, ou seja, para a capacidade de amortecimento do material.

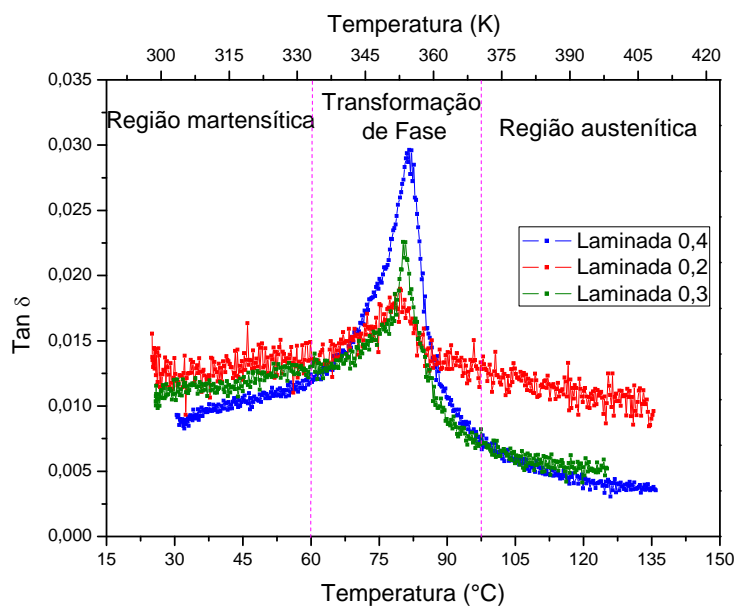


Figura 5. Amortecimento das amostras laminadas ($\text{Tan } \delta$).

Na Figura (6) foi introduzida a curva resultante do ensaio dinâmico na lâmina que não passou pelo processo de laminação, denominada “Cortada”. Neste resultado, percebe-se claramente a influência da densidade de defeitos na microestrutura, a qual é traduzida como um aumento significativo da capacidade de amortecimento do material, principalmente durante a transformação de fase. Analisando as curvas, verifica-se que a amostra cortada apresenta capacidade de amortecimento em torno de três vezes mais elevada que a amostra laminada que passou por menos trabalho, com espessura de 0,4 mm.

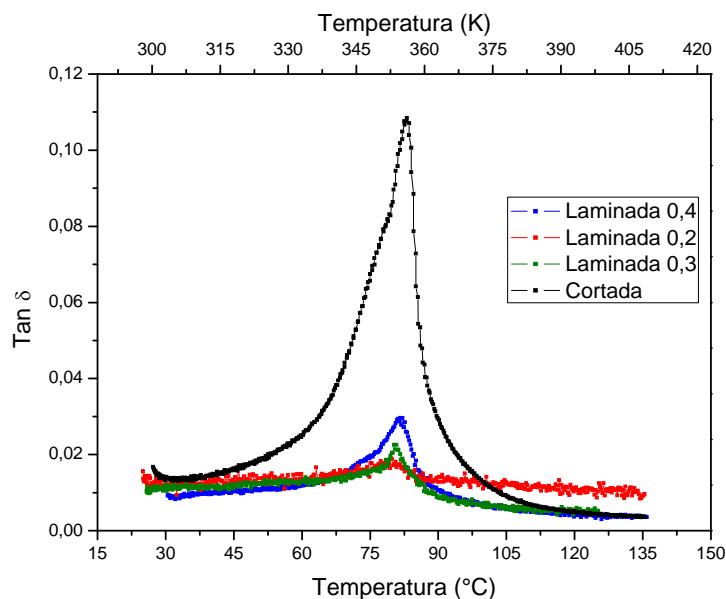


Figura 6. Comparativo entre $\tan \delta$ das amostras laminadas e da amostra cortada.

Na Figura (7) pode ser observada a variação percentual dos valores de amortecimento no pico da transformação de fase com relação ao valor inicial de amortecimento. Esta variação é de 25% para a lâmina de 0,2 mm de espessura, aumentando para 125% quando analisada a curva de amortecimento da lâmina de 0,3 mm, em torno de 225% para a de 0,4 mm, chegando a um aumento de 550% para a lâmina cortada. Portanto, quanto maior o trabalho sobre as amostras de lâmina, menor a capacidade de absorção de energia apresentada, que pode ser traduzida como uma capacidade de amortecimento reduzida, se comparadas à lâmina cortada.

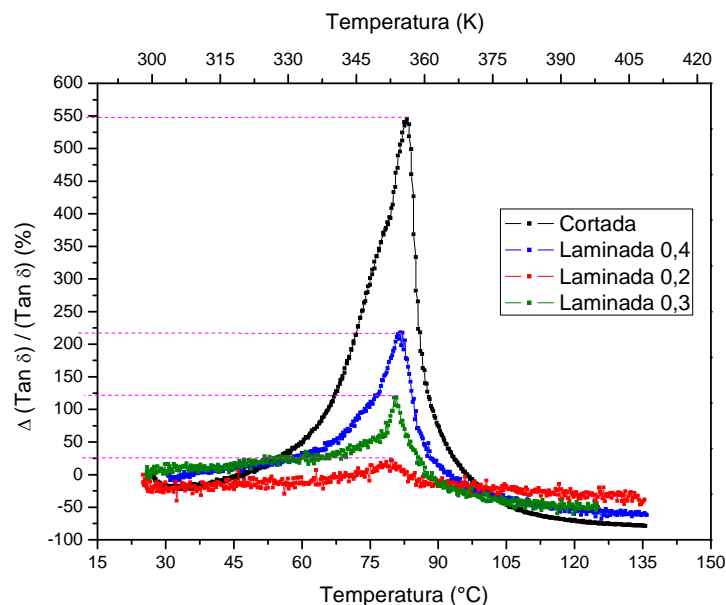


Figura 7. Variação percentual do $\tan \delta$ para as amostras submetidas aos ensaios dinâmicos.

A Figura (8) apresenta as curvas da variação percentual do módulo de armazenamento das amostras estudadas quando ensaiadas dinamicamente durante aquecimento. As LMF apresentam importante variação do módulo com a variação da temperatura, que se dá pela mesma razão pela qual ocorre o pico na capacidade de amortecimento. Em baixas temperaturas, enquanto o material está no estado martensítico, o módulo exprime seus valores mais reduzidos, indicando a menor rigidez desta fase. Durante a transformação de fase há um crescimento significativo do módulo devido ao movimento das interfaces entre as fases. Ao final da transformação, o material se encontra totalmente no estado austenítico, apresentando maiores valores de rigidez. Isso indica que, a altas temperaturas, as LMF apresentam baixa absorção de energia, o que está de acordo com as curvas da capacidade de amortecimento em função da temperatura mostradas anteriormente. A partir das curvas de variação do módulo de armazenamento, observa-se que as lâminas que sofreram maior deformação pelo processo de conformação, aquelas menos espessas, apresentam menores

variações de módulo durante o aquecimento. Este fato está relacionado à introdução de defeitos nas amostras, que faz com que as discordâncias apresentem menor mobilidade quando o material é solicitado dinamicamente. A lâmina denominada cortada sofreu uma variação total de 28%, enquanto a lâmina com 0,4 mm de espessura apresentou variação de aproximadamente 17%, a lâmina de 0,3 mm de espessura 12% e a lâmina de 0,2 mm evidenciou apenas 3% de variação em seu módulo de armazenamento no ensaio dinâmico realizado. De toda maneira, os aumentos de módulo observados foram pequenos, pois em algumas situações o módulo pode ser duplicado ou até triplicado durante a mudança de fase em aquecimento.

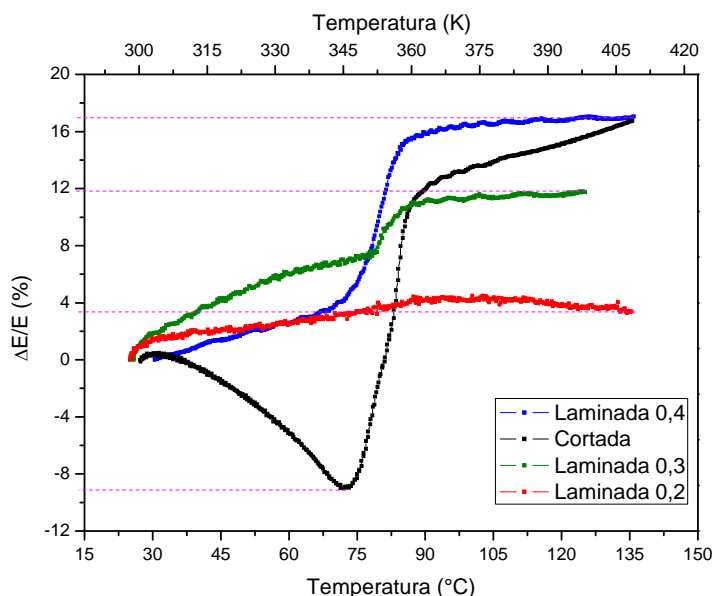


Figura 8. Variação percentual do módulo de armazenamento para as amostras laminadas e cortada.

5. CONCLUSÕES

A liga da família NiTi que apresenta o efeito memória de forma foi fabricada com êxito, através do método *Plasma Skull Push-Pull*, da qual foram retiradas lâminas que passaram por processo de laminação à quente, com exceção de uma que, por sua vez, foi ensaiada dinamicamente logo após ser retirada. As lâminas que passaram pela laminação à quente foram conformadas até alcançarem espessuras de 0,4 mm, 0,3 mm, e 0,2 mm, enquanto a amostra cortada possui espessura em torno de 0,85 mm, sendo esta usada como comparativo para as outras lâminas. Através de ensaios de análise dinâmico-mecânica sob variação de temperatura, a capacidade de amortecimento e o módulo de armazenamento das amostras foram estudados. Deste estudo as seguintes conclusões foram obtidas a respeito da influência da laminação sobre as propriedades dinâmicas:

- Qualitativamente, todas as lâminas apresentaram o mesmo comportamento quando aquecidas sob ação dinâmica, observando-se um pico de amortecimento e um importante aumento no módulo de armazenamento durante a transformação de fase. Isto ocorre devido ao movimento das interfaces martensíticas e a presença de discordâncias na microestrutura do material. Este comportamento foi observado na transformação de fase reversa, pois foi realizado somente aquecimento, no entanto, durante o resfriamento se espera comportamento semelhante quando da transformação martensítica direta;
- A lâmina que não passou pelo processo de laminação apresentou capacidade de amortecimento muito superior, cerca de 3 vezes, àquelas encontradas em lâminas do mesmo material conformadas mecanicamente;
- O grau de amortecimento na região martensítica e durante a transformação de fase se apresentou menor nas amostras que foram mais trabalhadas mecanicamente. Isso ocorre devido à introdução de defeitos na microestrutura, através do processo de laminação, que reduz a mobilidade interna dos defeitos, com consequente diminuição da capacidade de amortecimento nestas amostras;
- As lâminas de NiTi em altas temperaturas demonstraram capacidade de amortecimento mais baixa do que aquela verificada a baixas temperaturas, que ocorre pelo fato de a fase austenítica apresentar baixa absorção de energia. Portanto, o nível de amortecimento apresentado pela LMF em altas temperaturas é comparável a valores encontrados em materiais clássicos da engenharia como aço inoxidável e latão, como comprovado por Silva et al (2010);
- Assim como observado na capacidade de amortecimento, a densidade de defeitos na microestrutura da amostra afetou diretamente a capacidade do material em variar o módulo de armazenamento durante a transformação de fase, o que é muito importante quando se trabalha com aplicações em que a mudança de rigidez do material é desejável;

- A LMF NiTi demonstrou grande potencialidade para atuar em sistemas mecânicos submetidos a esforços dinâmicos e/ou de impactos, pois através de simples variação de temperatura se consegue modificar tanto a capacidade de amortecimento vibracional quanto a rigidez do material.

6. 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) e Universal 2007 (Processo no 478651/2007-4).

7. REFERÊNCIAS

Batalu, D., Guoqiu, H., Aloman, A., Xiaoshan, L., Zhihua, Z., 2006, "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*, Vol. 8, No. 2, pp. 694 – 698.

Cai, W., Lu, X. L., Zhao, L. C., 2005, "Damping behavior of TiNi-based shape memory alloys", *Materials Science and Engineering*, A 394, pp. 78–82.

De Araújo, C. J., Gomes, A. A. C., Silva, J. A., Cavalcanti, A. J. T., Reis, R. P. B., Gonzalez, C. H., 2009, "Fabrication of shape memory alloys using the plasma skull push-pull process", *Journal of Materials Processing Technology* 209, p. 3657-3664.

Van Humbeeck, J., 2003, "Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 355, Issues 1-2, p. 58-64.

Menard, K. P., 1999, "Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction", Ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Otsuka, K. and Wayman, C.M., 1998, "Shape Memory Materials", Edited by K. Otsuka and C. M. Wayman, Cambridge University Press, Cambridge, England.

PerkinElmer©, 2007, Technical Note: Dynamic Mechanical Analysis – Basics: Part 1 How DMA Works.

Silva, N. J., Grassi, E. N. D., De Araújo, C. J., 2009, "Dynamic Mechanical Analysis of a NiTi Shape Memory Alloy: An Experimental Study", *Proceedings of Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2009)*, Gramado, RS, Brazil, pp. 1 – 10.

Silva, N.J., Grassi, E. N. D., De Araújo, C. J., 2010, "Dynamic properties of NiTi shape memory alloy and classic structural materials: a comparative analysis", *Materials Science Forum*, Vol. 643, p. 37-41.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído nesse trabalho.



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO
DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

HOT ROLLING INFLUENCE ON DAMPING CAPACITY OF NiTi SHAPE MEMORY ALLOYS

Niédon José da Silva, niedsonjs@yahoo.com.br¹
Estephane Nobre Dantas Grassi, end.grassi@hotmail.com²
Cezar Henrique Gonzalez, gonzalez@ufpe.br¹
Carlos José de Araújo, carlos@dem.ufcg.br²

¹Laboratory of Intelligent Materials, Mechanical Engineering Department, Federal University of Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária - CEP 50740-530 - Recife-PE, Brazil

²Multidisciplinar Laboratory of Active Materials and Structures, Mechanical Engineering Department, Federal University of Campina Grande. Mailbox: 10069, Cep: 58109-970, Campina Grande – PB, Brazil

Abstract. *Shape memory alloys (SMA) are materials that have great potencial application as thermomechanical actuators in many fields as aerospace, automobilistic, medical-orthodontical, amongst others. Recently the interest in their dynamic properties has been increasing due to its high damping capacity. This potential is related to the material's ability to absorb energy through the inner movements of microstructure. In this work is has been carried out a comparative analysis between the damping capacity of an as-fabricated NiTi plate specimen and others mechanically conformed by hot-rolling process. As a result the observation of hot-rolling effect over damping capacity was achieved. The as-fabricated plate specimen presented a much superior damping capacity in relation to those that suffered severe strain by hot-rolling process. This analysis has great importance in real applications, mainly in situations where dynamic loadings or mechanical impacts are present.*

Keywords: *Shape memory alloys; Damping capacity; Dynamic mechanical-analysis, Smart materials.*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.