

CARACTERIZAÇÃO DE FIOS DE TiNi COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA VIABILIZANDO FABRICAÇÃO DE MOLAS HELICOIDAIS

Euclides Apolinário Cabral de Pina, kikipina@hotmail.com¹

Oscar Olimpio de Araújo Filho, oscarof98@hotmail.com¹

Carlos Augusto do Nascimento Oliveira, cano.oliveira@gmail.com¹

Severino Leopoldino Urtiga Filho, urtiga@ufpe.br¹

Cezar Henrique Gonzalez, gonzalez@ufpe.br¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Mecânica, Avenida Acadêmico Hélio Ramos s/n – CDU. Cep 50730 – 540, Recife – PE, Brasil

Resumo: Quando submetidas a um procedimento térmico apropriado, as ligas com efeito memória de forma apresentam a capacidade de retornar a uma forma anteriormente imposta ao material, através da transformação martensítica inversa. Tais materiais podem ser pseudoplasticamente deformados a uma temperatura relativamente baixa e, quando expostos a temperaturas mais altas, retornam a forma inicial antes da deformação. As ligas de TiNi são uma classe importante de ligas memória de forma (SMA). Exibem não somente o efeito memória de forma (SME), mas igualmente pseudoelasticidade incomum e altas capacidades de amortecimento. Estas propriedades junto com sua ductilidade superior, resistência à fadiga e resistência à corrosão, conduziram a muitas aplicações, entre as quais o uso na manufatura de fios, figuras com formas proeminentes. Nas aplicações os fios Ti-Ni SMA são produzidos geralmente como molas, fios ocos e outros. Este trabalho tem como objetivo estudar algumas propriedades mecânicas do fio comercial de TiNi de 1,27 mm de diâmetro com efeito memória de forma para desenvolvimento de molas helicoidais com função de sensor/atuador, através da análise dinâmico-mecânica e DSC. O objetivo do nosso estudo foi o de apontar uma correlação entre o comportamento mecânico e da transformação martensítica da liga durante o aquecimento / arrefecimento do processo. A diferença entre a estabilização das propriedades mecânicas e da transformação martensítica formi observadas. Os parâmetros de tratamento térmico necessário para induzir o efeito memória de forma, ou a pseudoelasticidade da liga, também foram, apresentados neste documento

Palavras-chave: Ligas memória de forma, Calorimetria Diferencial de Varredura, Análise Dinâmico-Mecânica, ciclagem térmica, amortecimento.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o estudo de materiais inteligentes tem sido largamente explorado, devido as suas excelentes propriedades. As Ligas com Memória de Forma (SMA) são reconhecidas como materiais inteligentes principalmente por sua capacidade de converter energia térmica em trabalho mecânico. Esta capacidade se dá através do Efeito Memória de Forma (SME) e da Pseudoelasticidade. Esses materiais, freqüentemente utilizados como sensores e atuadores nas chamadas estruturas inteligentes, têm a capacidade de alterar sua forma, rigidez, freqüências naturais, mediante a imposição de campos elétricos, eletromagnéticos, temperatura ou tensão. As ligas de NiTi são os materiais com efeito de memória de forma mais usada em aplicações práticas. O termo ligas com memória de forma é aplicado a um grupo de materiais metálicos que têm a capacidade de retomar uma forma ou tamanho previamente definido quando submetidas a um ciclo térmico apropriado. Geralmente estes materiais podem ser facilmente deformados plasticamente a uma temperatura relativamente baixa e, ao serem expostos a uma temperatura mais elevada, retomam a forma inicial (antes da deformação). Quando o efeito de memória de forma se manifesta somente durante o aquecimento diz-se que se trata de memória de forma simples. Se este efeito se manifestar também durante o arrefecimento, diz-se que se trata de um efeito de memória de duas vias (Fernandes, 2006).

Além do EMF e da pseudoelasticidade, nos últimos anos as LMF, principalmente as de base de NiTi, vêm chamando atenção também por suas propriedades dinâmicas. 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 tenham forte potencial para aplicações tanto passivas quanto ativas (Van Humbeek, 2003). Em baixas temperaturas, onde a estrutura presente é a martensita (fase produto) foi observado um valor de amortecimento até cinco vezes maior que o de metais clássicos como alumínio e aço inox, na mesma temperatura (Silva et al, 2009). Em temperaturas mais elevadas a liga se transforma em austenita (fase matriz) 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. Para a análise das propriedades dinâmicas serão realizados ensaios em um equipamento analisador dinâmico-mecânico. Neste equipamento as amostras estarão bi-engastadas e receberão a aplicação de uma frequência oscilatória em uma de suas extremidades enquanto a temperatura varia de forma que se consiga diferenciar fases distintas no material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos experimentos foram utilizados fios de Ti-Ni comerciais com diâmetros de 1,27 mm e composição próxima a equiatômica, fornecidos pela empresa Memory Metalle. Os fios foram cortados em pequenos pedaços, pesados em uma balança de precisão Mettler Toledo PL303 e submetido a tratamento térmico a 400°C e têmpera em água a 25°C com uma variação de tempo (1, 2, 4, 8, 16 e 24 horas). Após este procedimento foram realizados ensaios num calorímetro diferencial de varredura da marca Mettler, modelo 823°, com os seguintes parâmetros de varredura: ciclos térmicos no intervalo de temperatura entre -40°C e 110°C, empregando uma taxa de 10°C/min. As temperaturas de transformação de fase, histereses e entalpias de transformação, foram analisadas.

Os ensaios para a avaliação das propriedades dinâmicas do fio de 1,27 mm de diâmetro foram realizados no equipamento comercial DMA Q800 da TA Instruments, mostrado na figura 1 abaixo. O modo de carregamento utilizado foi single cantilever, onde o fio é bi-engastado, sendo submetida à aplicação de um deslocamento dinâmico em uma das extremidades. A frequência usada foi de 1Hz com 5µm de amplitude de oscilação. Sob estas condições, a temperatura foi elevada de 30°C até cerca de 180°C, com uma taxa de aquecimento de 5°C por minuto. Estes parâmetros foram escolhidos com base em um estudo de otimização de parâmetros feito por Silva, 2009. Dados de $\tan \delta$ e Módulo de Armazenamento foram adquiridos de todas as amostras para se fazer um estudo comparativo das propriedades dinâmicas do material. Tangente δ fornece a informação sobre a relação entre a componente elástica e inelástica do material e Módulo de Armazenamento é a componente elástica e está relacionada a rigidez da amostra.

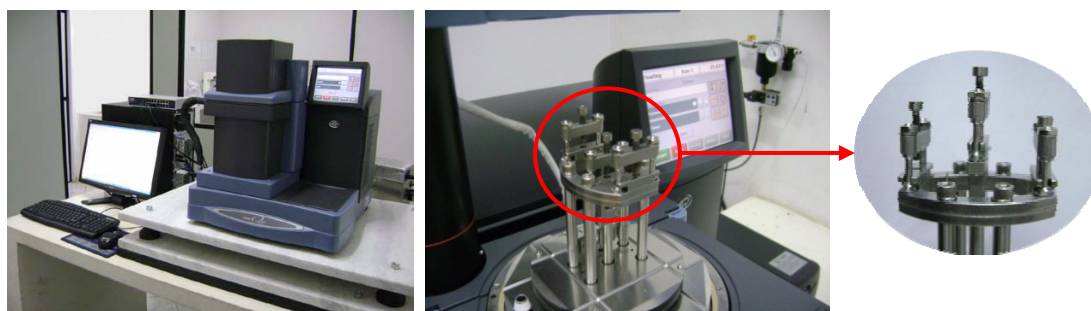


Figura 1 – Analisador Dinâmico-Mecânico (DMA) do modelo Q800 da TA Instruments e detalhe do *clamp single cantilever* usado nos ensaios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras abaixo representam os gráficos da ciclagem térmica dos fios Ti-Ni de 1,27 mm de diâmetro sem tratamento térmico realizados através de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e após tratamento térmico a 400°C e têmpera em água a 25°C com o tempo de permanência no forno de 1, 2, 4, 8, 16 e 24 horas. Esses gráficos expressam os resultados em função da temperatura. Os DSC mostram que o fio de liga com efeito memória de forma de Ni-Ti com composição próxima a equiatômica e diâmetro de 1,27 mm apresentam transformações diretas e reversas em várias etapas ($B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$; $B2 \leftrightarrow B19'$). Onde B2 é a fase de alta temperatura que possui estrutura cúbica de corpo centrado, R é a fase intermediária entre a austenita e a martensita, apresentando uma célula unitária romboédrica, chamada de fase-R e B19' é a fase de baixa temperatura que possui estrutura monoclinica (Reis, 2001).

O fio Ni-Ti como recebido foi analisado no DSC apresentando dois picos distintos no arrefecimento, que são a fase R e a fase martensítica e um pico no aquecimento que é a fase austenítica (figura 2 a). Quando submetido a um tratamento térmico durante algumas horas (figura 2 b e figura 3 a) a amostra continua apresentando dois picos no arrefecimento, mas um mais próximo do outro e um pico no aquecimento.

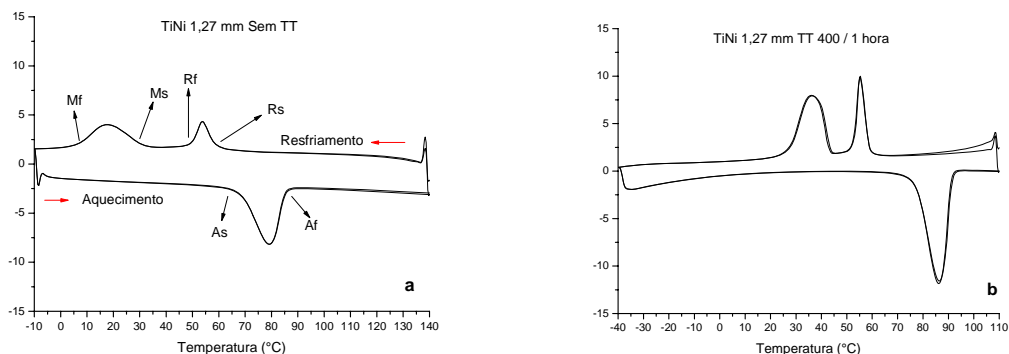


Figura 2 – Análise de DSC na amostra da liga Ti-Ni sem tratamento térmico e com tratamento térmico a 400°C e têmpera em água a 25°C por 1 hora.

Os gráficos apresentam os pontos de transformação A_S e A_F no aquecimento (início e final da transformação austenítica) e M_S , M_F , R_S e R_F no resfriamento (início e final da transformação martensítica e início e final da transformação da fase-R).

Quando o tempo de tratamento térmico é pequeno, neste caso de 1, 2, 4 e 8 horas o fio de NiTi com memória de forma apresenta dois picos no arrefecimento, a fase-R e a transformação martensítica e um pico no resfriamento, a transformação austenítica. A fase-R aparece no resfriamento porque as fases Ni_4Ti_3 e Ni_3Ti ocorrem na forma de precipitados distribuídos uniformemente e coerentes com a matriz B2 e também se produz uma alta densidade de discordâncias devido ao tratamento termomecânico. Uma outra condição para o aparecimento da fase-R é a ocorrência de ciclos contínuos de aquecimento e resfriamento que geram campos de tensões internas que controlam o crescimento das variantes da martensita no material.

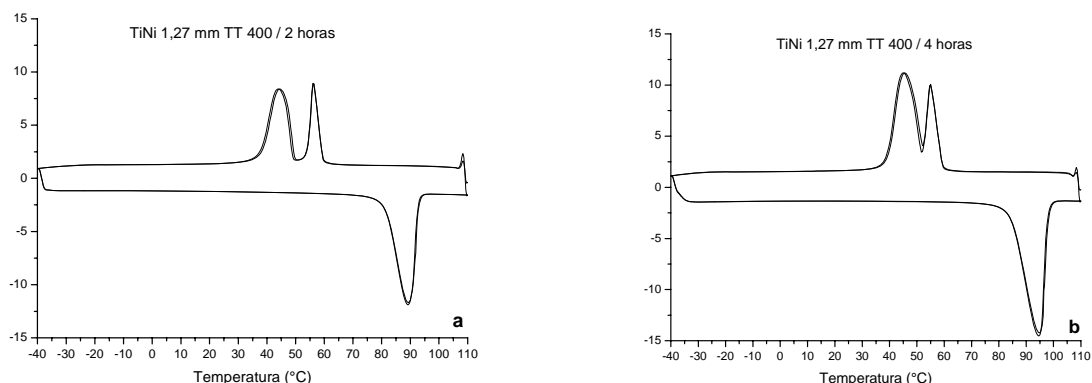


Figura3 – Análise de DSC na amostra da liga Ti-Ni com tratamento térmico a 400°C e têmpera em água a 25°C por 2 e 4 horas.

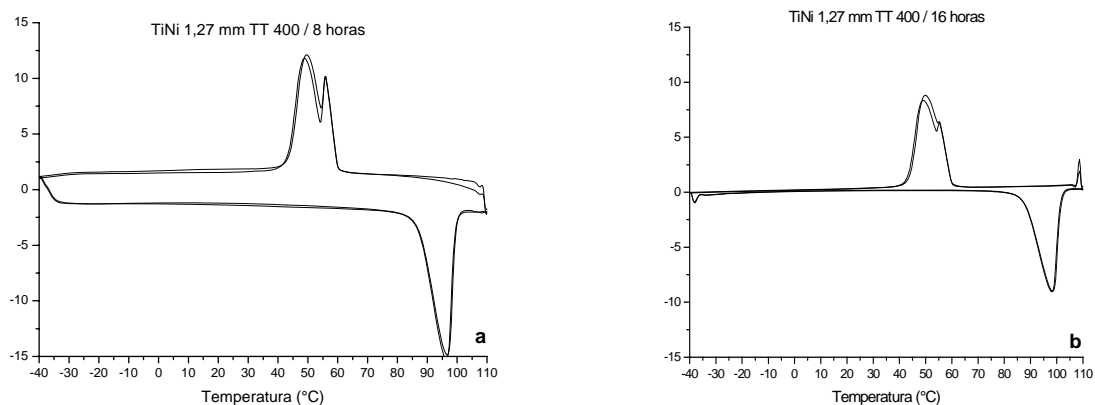


Figura 4 – Análise de DSC na amostra da liga Ti-Ni com tratamento térmico a 400°C e têmpera em água por 8 e 16 horas.

Os fios que passaram por tempos de tratamento térmicos mais elevados, neste caso, 16 e 24 horas (figuras 4 b e 5) apresentam uma transformação direta de $B2 \leftrightarrow B19'$, sem a presença da fase-R. Isso se deve ao seguinte: há a eliminação dos campos de tensões internos devido ao tempo de tratamento térmico, os precipitados Ni_4Ti_3 e Ni_3Ti se transformaram em Ni-Ti, há uma reorientação das variantes da martensita.

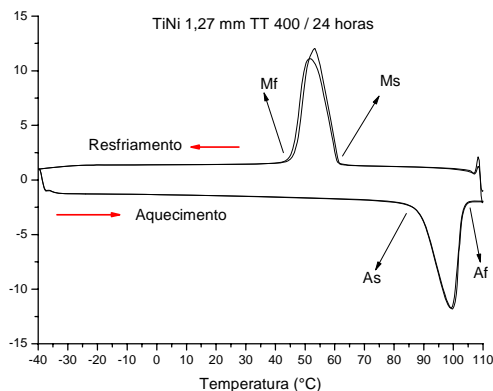


Figura 5 – Análise de DSC na amostra da liga Ti-Ni com tratamento térmico a 400°C e têmpera em água a 25°C por 24 horas.

As amostras de fios de Ni-Ti passaram por tratamentos térmicos a 400°C e têmpera em água a 25°C com tempo de permanência de 1, 2, 4, 8, 16 e 24 horas, e em seguida foram ensaiadas num DMA. Todas as amostras foram ensaiadas utilizando o modo de carregamento *single cantilever*, com frequência de 1Hz, amplitude de 5 μ m e taxa de aquecimento de 5°C/min e 10°C/min. Na figura 6 se observa o comportamento da capacidade de amortecimento ($Tan \delta$) versus temperatura das amostras como recebida e as amostras tratadas termicamente por 1, 2 e 4 horas. Podem ser observados dois picos no resfriamento. O pico P1 está associado com a transformação da fase-R e o pico P2 corresponde à transformação da martensítica (Cai e el, 2005). As transformações de fase ocorrem entre 90°C e 150°C. Na liga como recebida a transformação da fase-R ocorre a aproximadamente 127°C e a transformação martensítica a 107°C. As ligas submetidas a tratamentos térmicos por 1, 2 e 4 horas, a transformação da fase-R ocorre a 133°C, 136°C e 139°C respectivamente e a transformação martensítica ocorre a 110°C, 116°C e 121°C respectivamente. Na transformação da fase-R o pico de transformação da amostra como recebida é inferior aos picos das amostras tratadas e na transformação martensítica o pico de transformação da amostra como recebida é maior do que as amostras tratadas.

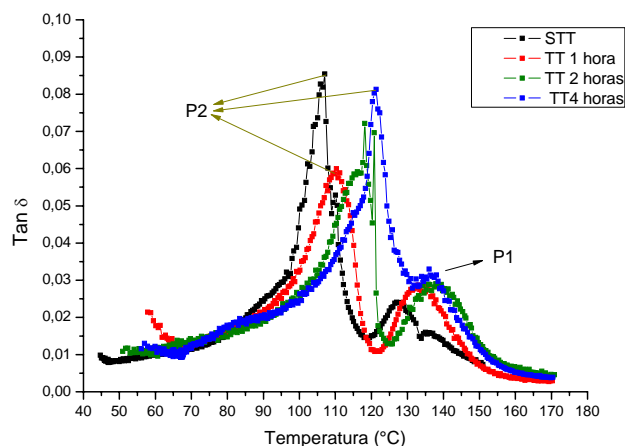


Figura 6 – Amortecimento das amostras de fios NiTi de 1,27 mm de diâmetro ($Tan \delta$).

As ligas de TiNi apresentam, estas características porque os precipitados Ti_3Ni_4 nas amostras são finos, dispersos e boa coerência com a matriz, o que levou a campos de tensão interna em torno deles. A melhoria da capacidade de amortecimento valor de pico, surge dos campos de tensão interna. Com o prolongamento do tempo de envelhecimento, os precipitados Ti_3Ni_4 se tornam grossos e os campos de tensões internas tornam-se fracos, como resultado da diminuição da capacidade de amortecimento de pico, que está de acordo com o resultado dos ensaios. Também, as

interfaces entre os precipitados da matriz também contribuem para a capacidade de amortecimento durante a transformação de fase.

A figura 7 representa as curvas da variação percentual do módulo de armazenamento das amostras quando ensaiadas dinamicamente em uma rampa de temperatura. As SMA 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, o material encontra-se no estado martensítico, o módulo expressa seus valores mais reduzidos, o que indica baixa rigidez da fase. Durante a transformação de fase há um crescimento significativo do módulo devido ao movimento das interfaces entre as fases. Quando a transformação chega ao seu final, o material se encontra na sua totalidade no estado austenítico, apresentando valores elevados da rigidez. Isso indica que, a altas temperaturas, as SMA são mais rígidas apresentando baixa absorção de energia e a baixa temperatura há menos rigidez e alta absorção de energia. Pode-se dizer também que o tempo de tratamento térmico influencia na capacidade de amortecimento do material. À medida que se aumenta o tempo de tratamento térmico, há uma redução da rigidez e com isso, uma melhoria na capacidade de absorção de energia.

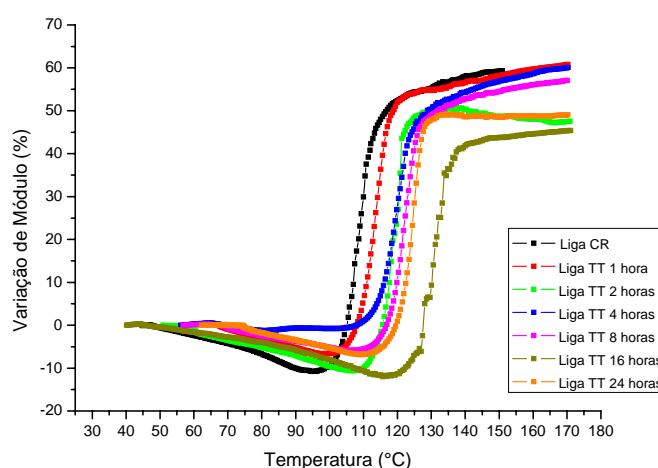


Figura 7 – Variação percentual do módulo de armazenamento para as amostras como recebido e com tratamento térmico de 1, 2, 4, 8, 16 e 24 horas.

4. CONCLUSÕES

As propriedades mecânicas do fio de TiNi dependem fortemente do tratamento térmico bem como da temperatura de ensaio.

Há a influência do tempo de tratamento térmico nas amostras, facilitando o reordenamento das variantes da martensita e diminuindo os campos de tensão responsáveis pela fase-R, dessa forma após um tempo maior de tratamento térmico a fase-R desaparece.

Os pontos das temperaturas de transformação se deslocam para a direita no DSC como também no DMA. Isso se deve ao efeito dos tratamentos térmicos sobre as discordâncias e precipitados nos fios de TiNi com efeito memória de forma.

O aumento do tempo de tratamento térmico melhora a capacidade de absorção de energia das ligas estudadas.

Os fios 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.

As SMA demonstraram grande potencialidade para atuar em sistemas mecânicos submetidos a esforços dinâmicos ou de impactos, pois através de simples variação de temperatura se consegue modificar tanto a capacidade de amortecimento vibracional quanto a rigidez do material.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências brasileiras CAPES e FACEPE pelo apoio financeiro recebido para a realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

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.

- Fernandes, F.M.B., 2006, “Ligas Com Memória de Forma”, Universidade Nova de Lisboa.
- Humbeeck, J. V., 2003, “Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 355, Issues 1-2, p. 58-64.
- Otsuka, K., Wayman, C. M., 1998, “Shape Memory Materials”, University Press, Cambridge.
- 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.
- Reis, W. P., 2001, “Caracterização de Ligas de Níquel-Titânio para Ortodontia”, *Dissertação de Mestrado*, Rio de Janeiro

7. DIREITOS AUTORAIS

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

A METHOD TO MANUFACTURE HELICAL BY CHARACTERIZING TiNi SHAPE MEMORY WIRES

Euclides Apolinário Cabral de Pina, kikipina@hotmail.com¹
Oscar Olimpio de Araújo Filho, oscarof98@hotmail.com¹
Carlos Augusto do nascimento Oliveira, cano.oliveira@gmail.com¹
Severino Leopoldino urtiga Filho¹, urtiga@ufpe.br¹
Cezar Henrique Gonzalez, gonzalez@ufpe.br¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Mecânica, Avenida Acadêmico Hélio Ramos s/n – CDU. Cep 50730 – 540, Recife – PE, Brasil

Abstract. When submitted to an appropriate thermal procedure, the alloys with shape memory effect exhibit the capacity to return to a shape previously imposed to the material, through the inverse martensite transformation. Such materials can be deformed in a pseudoplastic way at a relatively low temperature and, when exposed to higher temperatures, they return to the initial shape before the deformation. The Ti-Ni alloys are an important category of shape memory alloys (SMA). They not only show the shape memory effect (SME), but equally uncommon pseudoelasticity and high capacities of damping. These properties along with their superior ductility, resistance, resistance to fatigue and corrosion, had lead to many applications, among which the use in the wire manufacture which displays prominent figures. In the applications the Ti-Ni SMA wires are produced generally as springs, hollow wires and others. This work has as objective to study some mechanical properties of the commercial Ti-Ni wire with 1,27 mm of diameter with shape memory effect for development of helical springs with sensor/actuator function, through the dynamic-mechanics analysis and DSC. The objective of our study was to highlight a correlation between the mechanical behavior and the martensite transformation of the alloy during the heating/cooling process. . The difference between the stabilization of the mechanical properties and the martensite transformation was observed. The parameters of thermal treatment necessary to induce the shape memory effect, or the pseudoelasticity of the alloy, had also been presented in this document.

Keywords: Shape memory alloys, Differential Scanning Calorimeter, Dynamic Mechanical Analysis Thermal Cycling, Damping.

1. RESPONSIBILITY NOTICE

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