

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA AVALIAR A FADIGA FUNCIONAL DE LIGAS DE Ti-Ni COM MEMÓRIA DE FORMA*

Karla Carolina Alves da Silva¹
Carlos Augusto do Nascimento Oliveira²
José Orlando Silveira Rocha³
Cezar Henrique Gonzalez⁴
Oscar Olímpio de Araújo Filho²
Tiago Leite Rolim⁴
Fernando Henrique Sousa Silva⁵

Resumo

Esse trabalho tem por objetivo, propor a utilização de um dispositivo, criado na UFPE, para estudar a fadiga funcional e mecânica num atuador de Ti-Ni com memória de forma. Inicialmente, fios de Ti-Ni com efeito memória de forma, com 0,89 mm de diâmetro, foram submetidos a um tratamento térmico de homogeneização por 24 horas a temperatura de 500°C e têmpera em água a 25°C. Posteriormente, os mesmos foram submetidas a calorimetria diferencial de varredura para obtenção das temperaturas de transformação. De posse desses dados, foram confeccionados atuadores com a forma de mola helicoidal. Utilizando o dispositivo proposto, esses atuadores foram submetidos às deformações cíclicas, com expansão total de 10mm, num banho térmico programável, a temperatura constante de 85°C, na condição superelástica, essa etapa é denominada neste trabalho de ciclo rápido. Com o objetivo de analisar o efeito dessas deformações cíclicas sobre as temperaturas de transformação e a capacidade de recuperação de forma dos atuadores foi realizada uma segunda etapa, aqui denominada de ciclo lento. Nessa etapa, os atuadores foram solicitados a esforços de tração equivalentes a tensão de cisalhamento no fio de 70 MPa, dentro do intervalo de temperatura entre 15°C e 85°C, e tiveram o deslocamento e as temperaturas de transformação monitorados por um sensor LVDT e por um termopar respectivamente. Os ciclos rápidos e lentos são intercalados periodicamente. Dessa forma, observou-se a influência da ciclagem termomecânica na degradação do efeito de memória de forma.

Palavras-chave: Ligas de Ti-Ni; Efeito memória de forma; Transformação de fase; Fadiga termoelástica e dispositivo de fadiga.

DEVELOPMENT OF A DEVICE TO STUDY THE FUNCTIONAL FATIGUE IN A Ti-Ni SHAPE MEMORY ALLOY

Abstract

This work aims to propose the use of a device, created at university to study the functional and mechanical fatigue in actuator Ti-Ni shape memory. Initially, a wireless Ti-Ni alloy with shape memory effect, with a 0,89 mm in diameter were subjected to a homogenizing heat treatment for 24 hours at a temperature of 500°C and quenching in water at 25°C. Subsequently, they were subjected to differential scanning calorimetry to obtain the transformation temperatures. With this data, they were fabricated actuators with the form of coil spring. Using the proposed scheme, these actuators were subjected to cyclic deformations, with full expansion of 10mm, a programmable thermal bath, a constant temperature of 85°C, in superelastic condition, this step is referred to in this work fast cycle. In order to analyze the effect of these cyclic deformation on transformation temperatures and resilience so the actuators was held one second stage, here called slow cycle. At this stage, the actuators were obtained from the tensile stress equivalent shear stress in the wire 70 MPa, within the temperature range between 15°C and 85°C and had the displacement and processing temperatures monitored by a sensor LVDT and a thermocouple respectively. The fast and slow cycles are interspersed periodically. Thus, there is influence of thermo cycling in the degradation of the shape memory effect.

Keywords: Ti-Ni alloy; Shape memory effect; Martensitic transformation and functional fatigue.

¹ Engenharia Mecânica, Mestre, Aluna de doutorado, DEMEC, UFPE, Brasil.

² Engenharia Mecânica, Doutor, Professor Adjunto, DEMEC, UFPE, Brasil.

³ Engenharia Mecânica, Doutor, Professor Adjunto, DEMEC, UFPE, Brasil.

⁴ Engenharia Mecânica, Doutor, Professor Associado, DEMEC, UFPE, Brasil.

⁵ Engenharia Mecânica, Graduação, Aluno de Iniciação Científica, DEMEC, UFPE, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos dos materiais funcionais tem possibilitado o surgimento de atuadores/sensores com aplicações dentro das grandes áreas do conhecimento, apresentando desde aplicações singelas como é o caso das válvulas de controle de fluxo até situações mais complexas, onde existem, por exemplo, os atuadores poliméricos utilizados na simulação da musculatura humana [10-11]. O desenvolvimento de atuadores inteligentes é destinado à obtenção de elementos capazes de produzir trabalho a partir de estímulos externos. As ligas de Ti-Ni são uma importante classe de liga metálica que vêm sendo utilizadas na produção de atuadores com aplicações na indústria mecânica, robótica, aeroespacial e petróleo e gás. As aplicações tecnológicas das ligas com memória de forma (LMF) têm se multiplicado com os avanços das pesquisas e com a difusão dos fenômenos de memória de forma nas escolas de engenharia [13]

O funcionamento dos atuadores/sensores das ligas de Ti-Ni é baseado no efeito memória de forma reversível e na superelasticidade que são propriedades das transformações de fase termoelástica da martensita. Os ciclos de trabalho, a estabilização da transformação de fase, o surgimento de campos de tensões e precipitados de fase podem contribuir com a degradação do efeito memória de forma do material, este fenômeno é conhecido pelo termo fadiga funcional.

Eggeler et al., 2004 classificou a fadiga de LMF em fadiga estrutural e fadiga funcional, termo este que também foi empregado por Humbeeck & Stalmans, 1998 [15,16]. Figueiredo, (2006) descreve a fadiga funcional como uma degradação consequente de carregamentos cíclicos, nas propriedades de memória de forma da liga, o que pode ser observado pela alteração na amplitude dos deslocamentos recuperáveis [9]. Fadiga estrutural refere-se ao processo convencional de fadiga, ou dano mecânico (teoria de Griffith da propagação de trinca) que se acumula durante o carregamento cíclico [15].

As pesquisas sobre os mecanismos de memória de forma são um grande desafio, pois as propriedades físicas e mecânicas podem ser modificadas durante a evolução da transformação de fase. A fadiga das LMF, por exemplo, possui dois aspectos: mecânico e fenomenológico. As ligas podem falhar por ruptura mecânica (mecanismos da fratura) ou podem deixar de executar o EMF (perda do efeito memória) devido ao processo de estabilização martensítica [14]. Esta pesquisa faz o estudo do comportamento da fadiga funcional em atuadores de Ti-Ni com a forma de molas helicoidais.

A resposta do atuador a estímulos externos como corrente elétrica, tensões e variação de temperatura foram avaliados através da calorimetria diferencial de varredura, ensaio mecânico e termomecânico de fadiga. O ensaio termomecânico de fadiga é realizado em um dispositivo desenvolvido especificamente para este fim. O dispositivo trabalha dentro de uma faixa específica de temperaturas e simula a aplicação de esforços e a transformação de fase ao longo de milhares de ciclos.

Os resultados são discutidos segundo o comportamento do material em função da evolução das temperaturas críticas de transformação (A_s , A_f , M_s e M_f), influência de campos de tensões e a fadiga funcional da transformação de fase do atuador.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo das propriedades da transformação martensítica das ligas com memória de forma pode ser avaliado através de métodos de caracterização convencionais como a calorimetria diferencial de varredura, os ensaios termomecânicos, resistividade elétrica e análise dinâmico mecânica. Quando o material, com propriedades termoelástica, é usado na confecção de um atuador, pode estar submetido à fadiga. No caso de um atuador com a forma de mola helicoidal, a fadiga mecânica pode ser avaliada pelos testes convencionais de fadiga. No entanto, a fadiga oriunda dos ciclos de transformação de fase não possui uma técnica definida de avaliação. A metodologia deste trabalho consiste na proposta de um dispositivo que simule os esforços alternados e facilite o estudo da fadiga termoelástica em atuadores de Ti-Ni com a forma de mola helicoidal.

A transformação de fase martensítica apresenta propriedades que se destacam quando se deseja produzir sensores ou atuadores e são definidas pelo comportamento superelástico e pelo efeito memória de forma reversível.

O dispositivo desenvolvido neste estudo deve avaliar a fadiga para o material na condição de superelasticidade. Na superelasticidade, a transformação ocorre quando a temperatura do material é superior ao A_f , nesta condição, quando o material é tensionado, uma transformação de fase pode ser induzida por tensão e produzir a mudança da austenita para a martensita. Neste fenômeno a martensita é induzida pela tensão aplicada. A tensão altera as temperaturas de transformação do material e pode modificar a resistividade. Este tipo de propriedade é um dos princípios de funcionamento de sistemas de amortecimento de vibração ou de proteção contra terremotos [12].

2.1 Atuador de Ti-Ni

Neste trabalho foi utilizada um fio de Ti-Ni, com composição de Ti-50,4at%Ni. O fio com diâmetro de 0.9 mm foi usado para obter o atuador com a forma de mola helicoidal. O procedimento de obtenção do atuador já é bem descrito na literatura, mas pode ser contemplado em publicações de Oliveira, 2011, De Araújo, 2001 [1,2]. O tratamento térmico usado foi de homogeneização por 24 horas a temperatura de 500°C e têmpera em água a 25°C. A mola foi obtida com 8 espiras, sendo 6 ativas, diâmetro externo de 6,0 mm e comprimento útil de 6,0mm.

2.2 Ensaio de Calorimetria

As temperaturas de transformação para o material na forma como recebida e tratada termicamente foram identificadas pelo uso do ensaio de calorimetria [17]. A calorimetria foi conduzida em um DSC marca Mettler Toledo. O ensaio foi realizado entre as temperaturas de -60°C a 100°C, a taxa de evolução do ensaio foi de 10°C*min⁻¹.

2.3 Dispositivo Para Avaliar a Fadiga

O dispositivo desenvolvido para avaliar a fadiga possui dinâmica de funcionamento simples e tem como objetivo realizar ciclos de tensões alternadas no atuador. Os ciclos são realizados dentro de um banho térmico programável onde as temperaturas são mantidas sempre acima da temperatura final da transformação

austenítica (A_f). A figura 1 apresenta o esquema do dispositivo com suas principais partes.

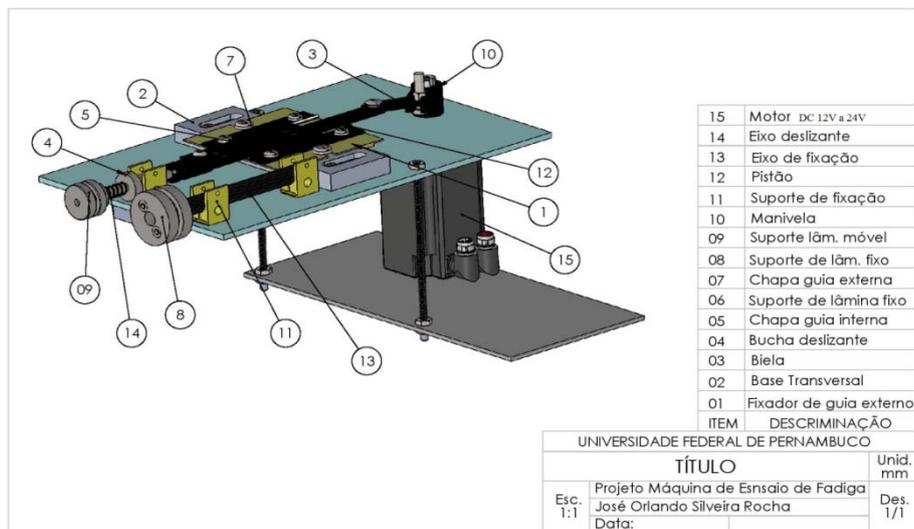


Figura 1. Esquema do dispositivo de fadiga [3].

O funcionamento do dispositivo é baseado em um mecanismo de quatro barras, semelhante ao de biela-manivela. A fixação do atuador é feita a bucha deslizante (item 4) e ao suporte lâmina móvel (item 9). O atuador realiza o movimento deslizando sobre o eixo deslizante (item 14). Um motor (item 15) é usado para fazer a transmissão de movimento. A dinâmica do dispositivo realiza um movimento oscilatório que provoca a compressão e expansão do atuador. A quantidade a ser expandida pode ser regulada através do posicionamento e fixação das barras (biela e pistão). O movimento oscilatório provoca a expansão do atuador gerando níveis de tensão no fio capazes de induzir martensita (superelasticidade). As tensões avaliadas são tensões de cisalhamento presentes no fio durante a aplicação de esforços. Para os testes do dispositivo foi selecionado o deslocamento de 10,0 mm para o atuador. Este deslocamento é baseado em resultados de ensaio termomecânicos obtidos por [18].

2.4 Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga são realizados no dispositivo e foram divididos em duas etapas. As etapas foram denominadas por ciclos lentos e ciclos rápidos. Cada ciclo realiza a expansão e compressão do atuador. Os ciclos rápidos são realizados com uma frequência de 100 ciclos por minuto e os ciclos lentos com uma frequência de um ciclo a cada 2 horas. A velocidade dos ciclos rápidos dificultava a identificação das temperaturas de transformação. Neste trabalho foram realizados milhares de ciclos. Os ciclos rápidos foram realizados sempre de forma intercalada com os ciclos lentos. Os ciclos lentos foram usado para obter as temperaturas críticas de transformação (A_s , A_f , M_s e M_f), a histerese térmica, deformação termoelástica e entalpia de transformação. Foram realizados 600, 1.2k, 2.4k, 6k, 8.4k, 10k, 20k, 30k, 40k, 50k, 100k, 150k, 200k e 400k ciclos rápidos intercalados com 2 ciclos lentos. Os parâmetros: temperaturas de transformação, deformação termoelástica e histerese térmica foram usados como características para avaliar a fadiga funcional.

As duas etapas do ensaio de fadiga foram realizadas em um banho térmico programável, com volume preenchido por óleo de silicone.

2.4.1 Ciclo Lento

Com o objetivo de avaliar alterações no comportamento do efeito memória de forma do atuador foi usada a técnica de treinamento termomecânico, procedimento experimental aplicado para obter o efeito memória de forma reversível ou para estudar a transformação de fase no material em função da aplicação de tensões [4,5]. O ciclo lento consiste no carregamento do atuador com tensões conhecidas e no aquecimento e resfriamento do material dentro de uma faixa de temperaturas identificadas. Neste estudo, o material foi submetido às esforços de tração equivalentes a tensão de cisalhamento no fio de 70 MPa. O ensaio é realizado em um banho térmico programável, onde as taxas de aquecimento e resfriamento foram estimadas em $7^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ e $2^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente. Os ciclos lentos foram conduzidos dentro do intervalo de temperatura entre 15°C e 85°C . O deslocamento do atuador é monitorado por um sensor LVDT e a temperatura por um termopar. Os dados são armazenados em um sistema de aquisição de dados e servem para a posterior verificação das temperaturas de transformação, termoelasticidade e histerese térmica nos ciclos lentos.

2.4.2 Ciclo Rápido

Os ciclos rápidos são realizados no dispositivo desenvolvido. O dispositivo é mergulhado no banho térmico. O objetivo é produzir uma quantidade elevada de ciclos de expansão e compressão a uma temperatura controlada. Este procedimento é capaz de induzir as transformações de fase entre as fases austenita e martensita, além da propagação de defeitos internos no material. Os ciclos rápidos são realizados a temperatura constante de 85°C , onde o material está completamente na fase austenítica. A expansão do atuador provoca um aumento na tensão de cisalhamento no fio que, neste caso, vai de 0 a 70 MPa, com a expansão total de 10,0 mm. O aumento gradativo na tensão atinge valores capazes de induzir a formação de martensita em um comportamento termoelástica conhecido por superelasticidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados do Ensaio de Calorimetria

A análise da calorimetria, conduzida em DSC, para as amostras de Ti-Ni, tratadas termicamente a 500°C , permitiu a identificação das temperaturas de transformação do material. A figura 2 apresenta o gráfico de fluxo de calor em função da temperatura, onde são identificados dois picos de transformação, um durante o segmento de aquecimento e outro no resfriamento. A presença de apenas um pico em cada segmento sugere que a transformação ocorre sem a presença da transformação romboédrica. Os valores das entalpias para o pico endotérmico e exotérmico, são de 25 e 26 J/g, respectivamente. As temperaturas de transformação foram identificadas por meio da regra das tangentes como sendo os valores de $A_s= 57^{\circ}\text{C}$, $A_F= 74^{\circ}\text{C}$, $M_s= 39^{\circ}\text{C}$ e $M_F= 26^{\circ}\text{C}$. O tratamento térmico aplicado apresenta como resposta a transformação da fase austenita para a martensita em

temperaturas próximas da temperatura ambiente e o campo de domínio da austenita em temperaturas acima de 75°C.

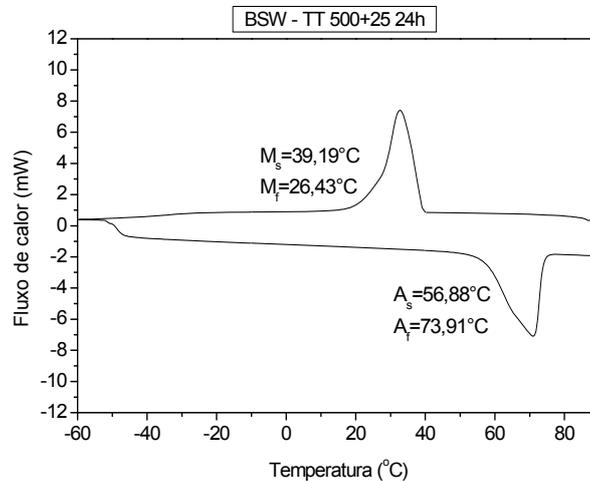


Figura 2. Curva DSC do fio BSW tratado a 500°C 24 horas.

3.2 Resultados do Ensaio de Fadiga

A degradação das propriedades da liga com memória de forma é influenciada por fatores externos e pela própria transformação de fase. Entre os fatores externos temos a aplicação de tensões, amplitudes de deformação, número de ciclos realizados e variação na temperatura de trabalho. Estes fatores podem alterar o comportamento das propriedades termoelástica do material. As transformações sucessivas entre as fases austenítica e martensítica são capazes de induzir defeitos, criando campos de tensões e aumentando a densidade de defeitos internos [6]. Outros fatores, também podem influenciar o comportamento do atuador, por exemplo, a composição do material pode apresentar condições favoráveis ao surgimento precipitados como Ti_3Ni_4 que favorecem o surgimento da fase romboédrica que pode ter influência na degradação das propriedades termoelástica [7,8]. Estes fatores estão inseridos no estudo da fadiga funcional do atuador de Ti-Ni.

A figura 3 exibe o comportamento das temperaturas críticas de transformação em função do número ciclos. Os resultados são obtidos durante os ciclos lentos com a aplicação da tensão de até 70MPa.

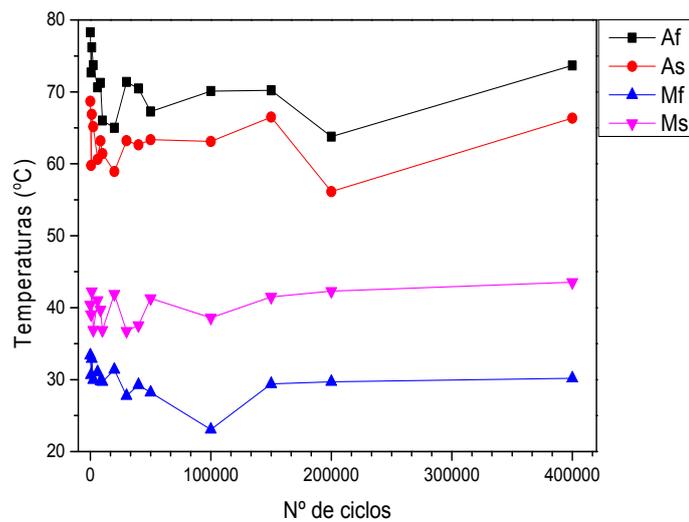


Figura 3. Temperaturas de transformação em função do Número de ciclos.

Através dos dados da figura 3, analisamos o comportamento das temperaturas de transformação. A temperatura A_s apresentou flutuação entre 58°C e 68°C , com uma contínua tendência de aumento. A temperatura M_s apresentou flutuação entre 36°C e 43°C . Entre o ciclo inicial e o de número 400k foi observada uma variação de 10°C para o A_s e 7°C para o M_s . O resultado esperado seria a redução nos valores das temperaturas de início da transformação austenítica (A_s) e aumento das temperaturas de início da transformação martensítica (M_s), este comportamento provocaria a redução na histerese térmica da transformação. A diferença entre o comportamento esperado e o obtido sugere que mais energia é requerida durante a transformação austenítica e por isso, ocorre um retardo na transformação quando comparado com os ciclos iniciais.

Esta pesquisa também considerada a evolução da deformação termoelástica e a consequente influência das etapas de ciclos rápidos e lentos na superelasticidade. Os ciclos rápidos permitiram a indução de martensita por tensão ao longo de milhares de ciclos; os ciclos lentos, foram usados para monitorar o comportamento dos parâmetros da transformação de fase entre cada segmento de ciclos rápidos. A figura 4 exibe o comportamento da deformação termoelástica (termoelasticidade- E_t) ao longo dos 400k ciclos realizados. A deformação termoelástica representa a recuperação de forma apresentada pelo atuador durante os ciclos lentos.

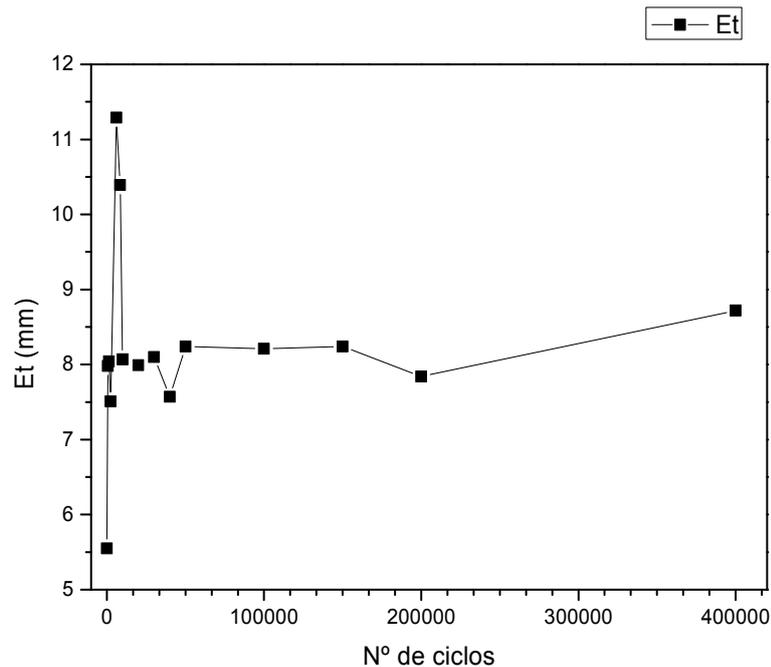


Figura 4. Comportamento da termoelasticidade em função do número de ciclos para a tensão de 270 MPa.

O termo “termoelasticidade” surge do equilíbrio entre o efeito elástico e térmico. Uma vez que o equilíbrio mencionado for alcançado, se o material for resfriado ou uma força externa aplicada os cristais de martensita voltarão a crescer. É fundamental que a reação martensítica seja termoelástica para que o efeito memória de forma ocorra [11]

Pelas informações obtidas através da figura 4 observa-se uma forte evolução nos valores da termoelasticidade para os primeiros ciclos, neste caso, a deformação termoelástica partiu de 5,5mm, no primeiro ciclo, para 11,3mm no ciclo de número 6k e reduziu para perto de 8,0mm no ciclo de número 20k. O valor de 8,0 mm persistiu até ciclos próximos dos 400k. Este comportamento indica que a deformação por consequência da transformação de fase apresentou uma redução inicial, devendo estar envolvida com o início da orientação das variantes de martensita no sentido preferencial da aplicação da carga, gerando reconfiguração dos campos de tensões e o rearranjo de discordâncias em regiões mais solicitadas do fio. Após este período, as variantes, já orientadas, mantiveram constante a recuperação de forma no atuador. Considerando que o material passou a solicitar mais energia para realizar a transformação da fase martensita para austenita, condição apresentada pelo aumento da temperatura A_s , acredita-se que a estabilidade observada na termoelasticidade durante os ensaios ocorre em função da ativação de variantes de martensita em outras regiões do fio. As regiões cujas variantes foram orientadas inicialmente podem estar passando por um processo de degradação em função da tensão e número de ciclos.

Figueiredo, 2001, descreve a fadiga funcional como uma degradação da transformação como consequência de carregamentos cíclicos [9]. Logo no caso estudado, é possível observar que o dispositivo proposto permite verificar essa degradação e consequentemente os efeitos da fadiga funcional que está associada a alterações na deformação termoelástica, histerese e temperaturas de transformação de fase com o aumento do número de ciclos realizados.

4 CONCLUSÃO

- A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o dispositivo proposto para o estudo da fadiga funcional e mecânica é eficiente para obter a evolução das temperaturas de transformação e da histerese térmica ao longo dos ciclos de deformação. Pela evolução do ensaio foi possível constatar alterações nas temperaturas de transformação, com destaque para o A_s e o M_s . A evolução destes parâmetros sugere que o procedimento provoca alterações na transformação de fase induzindo o aumento da energia térmica necessária à completa transformação de fase no atuador.
- A partir dos resultados também se conclui que o número de experimentos realizados ainda é suficiente para obter conclusões em relação a fadiga funcional no atuador, já que a deformação termoelástica ficou constante entre os ciclos 20K e 400K.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), ao projeto CNPQ 479471/2012-6 e ao Programa Petrobras de Formação de Recursos Humanos (PRH-PB203) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Oliveira, C. A. N.; Gonzalez, C. H.; Pina, E. A. C.; Urtiga Filho, S. L.; Filho, O. O. A. e de Araújo, C. J. Heat Treatments and Thermomechanical Cycling Influences on the R-Phase in Ti-Ni Shape Memory Alloys. *Materials Research*. São Carlos, 13(3):2010.
- 2 De Araújo, C. J.; Rocha, E.A.S; Gonzalez, C. H. Thermal Alarm Using a Shape Memory Alloy Helical Spring. 16º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica COBEM, Uberlândia, MG, 2001.
- 3 Rocha, J. O. S. “Desenvolvimento de Equipamentos para Estudo da Fadiga Mecânica e dos Fenômenos de Memória de Forma em Materiais Inteligentes”, UFPE. (Tese de Doutorado), Recife,. 2014.
- 4 Tokuda, M. ; Sigino, S. ; Inaba, T. Two-way Shape Memory Behavior Obtained by Combined Loading Training. *Journal of Intelligent Material*, 12: p.289-294. 2001.
- 5 Yoon, S. H.; Yeo, D. J. Experimental Investigation of Thermo-mechanical Behaviors in Ni-Ti Shape Memory Alloy. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19(3): p.283-289, 2008.
- 6 Otsuka K., Ren X. The Role of Softening in Elastic Constant sub 44 in Martensitic Transformation. *Scripta Materialia*. 38(11): may, 1998.
- 7 Otsuka, K., Ren, X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*. 50: p.511–678, 2005.
- 8 Otsuka, K.; Wayman, C. M. *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press, Cambridge, UK 1998, p.1 – 131.
- 9 Figueiredo, A.M.F., “Caracterização da fadiga mecânica de baixo ciclo em ligas superelásticas de NiTi”, Belo Horizonte, 2006.
- 10 S. W. Robertson, A. R. Pelton¹ and R. O. Ritchie. Mechanical fatigue and fracture of Nitinol, *International Materials Reviews*. 2012. V57. N1.
- 11 Humbeeck, J. V. Non-medical applications of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, v.273-275, p.134-148, 1999.
- 12 Sia Nemat-Nasser; Wei-Guo Guo. Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures. *Mechanics of Materials*, V38, p.463–474, 2006.

- 13 Srinivasan, A.V., Mcfarland, D.M. Smart Structures, Cambridge : Cambridge University Press, ISBN 0-521-65026-7, p. 228, 2001.
- 14 Gonzalez, C. H., Quadros, N. F., De Araujo, C. J., Morin, M., Guénin, G. Coupled Stress-Strain and Electrical Resistivity Measurements on Copper Based Shape Memory Single Crystals, Materials Research, vol. 7, n° 2, p. 305-311, 2004.
- 15 Eggeler, G.; Hornbogen, E.; Yawny, A.; Heckmann, A.; Wagner, M., Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys, Materials Science and Engineering, v.378, p.24-33, 2004.
- 16 Stalmans, R; Van Humbeeck, J; Delaey, L. “ Training and The Two Way Memory Effect in Copper Based Shape memory Alloys”. Journal de Physique IV, Supplément au Journal de Physique III, 1991, Col. C4. EUROMAT 91, p. 403-408.
- 17 Funakubo, H. Shape memory alloys. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1987.
- 18 Oliveira, C. A. N. Estudo Metalúrgico de Fios de Ti-Ni para Aplicação em Microatuadores de Válvulas de Fluxo. UFPE. Brasil, p.5, 2011. (Tese de Doutorado).