

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DURANTE O DOBRAMENTO ROTATÓRIO NO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE UMA LIGA NiTi SUPERELÁSTICA⁽¹⁾

Rogério Fonseca Dias⁽²⁾
Vicente Tadeu Lopes Buono⁽³⁾

Resumo

Estudou-se a influência da velocidade de rotação sobre a resistência à fadiga de fios de uma liga NiTi superelástica submetidos a deformações cíclicas por dobramento rotatório, em duas diferentes amplitudes. O material foi caracterizado por difratometria de raios-X, microscopia eletrônica de varredura, microsondagem eletrônica e calorimetria exploratória diferencial. Os ensaios de dobramento rotatório foram realizados utilizando-se 2 raios de curvatura diferentes, que proporcionaram deformações em tração na superfície dos fios de 2,0 e 3,0%. Os fios foram inicialmente ensaiados até se romperem por fadiga em uma velocidade de rotação de 340rpm. A seguir foram realizados ensaios até a ruptura na velocidade de 1040rpm. Em ambas amplitudes de deformação, 2,0 e 3,0%, a velocidade de rotação afetou a vida em fadiga do material. Houve uma diminuição no número de ciclos até a fratura nos ensaios realizados a 1040rpm em relação aos ensaios realizados a 340rpm. Essa diminuição foi mais acentuada no material submetido a deformações com amplitude de 3,0%. Tal efeito possivelmente ocorreu devido a um aumento na temperatura dos fios durante os testes, e conseqüentemente, um aumento da tensão crítica para formação de martensita, o que ocasionou uma diminuição da vida em fadiga do material.

Palavras-chave: Ligas NiTi; Superelasticidade; Fadiga.

(1) Contribuição Técnica ao 60^o Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte-MG, 25 a 28 de Julho de 2005.

(2) MSc., Doutorando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

(3) Dr., Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

INTRODUÇÃO

Dentre os materiais com memória de forma existentes, as ligas NiTi são reconhecidas como os mais importantes. Além de apresentarem uma alta resistência à corrosão e estabilidade mecânica, e uma excelente biocompatibilidade, elas apresentam duas importantes propriedades: o efeito memória de forma (EMF) e a superelasticidade (SE) [1]. O EMF ocorre quando o material é deformado de modo aparentemente permanente, e sua forma é recuperada através de um aquecimento moderado. A seleção apropriada da composição química e de tratamentos termomecânicos faz com que as ligas com memória apresentem a SE, que é um caso particular do EMF em que a recuperação de forma se dá apenas com a retirada da tensão, sem necessidade de aquecimento [2].

Ambos EMF e SE estão associados à transformação martensítica, uma transformação de fase no estado sólido, que pode ser induzida pelo resfriamento e também pela aplicação de tensão em uma determinada faixa de temperatura. No resfriamento, a transformação martensítica inicia-se em uma temperatura designada M_S , e se completa em uma temperatura mais baixa designada M_F . Durante o aquecimento, a transformação reversa, de martensita para austenita, inicia-se na temperatura A_S e termina em A_F . O EMF ocorre quando o material é deformado no estado martensítico, em uma temperatura abaixo de A_S , seguido por um aquecimento acima de A_F . A SE ocorre quando o material é deformado acima de A_F , no estado austenítico. Neste caso, a martensita induzida por tensão torna-se instável com a retirada da carga, e a recuperação da forma ocorre instantaneamente. As temperaturas de transformação são determinadas pela composição química e história termomecânica do material [2-5].

Em algumas aplicações das ligas NiTi superelásticas, tais como as limas endodônticas acionadas a motor, utilizadas na limpeza e formatação de canais radiculares curvos, e alguns tipos de atuadores, o material é submetido a movimentos cíclicos. Desta forma, uma melhor compreensão sobre a fadiga mecânica e degradação das ligas NiTi no regime superelástico tornou-se um problema relevante. A fadiga por dobramento rotatório tem se mostrado um método eficiente no estudo da fadiga estrutural de fios de materiais com memória de forma [6,7].

Um aspecto importante relativo à fadiga por dobramento rotatório é a influência da velocidade de rotação sobre a vida em fadiga do material [8]. No presente estudo, visou-se avaliar a influência da velocidade de rotação sobre a resistência à fadiga de fios de uma liga NiTi superelástica, submetidos a deformações cíclicas por dobramento rotatório ao ar, em duas diferentes amplitudes, 2,0 e 3,0%.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material estudado neste trabalho foi uma liga NiTi superelástica, adquirida na forma de fios de 1,0mm de diâmetro. A identificação das fases presentes no material foi realizada por difratometria de raios-X (DRX). A composição química foi determinada semi-quantitativamente através de análise por espectroscopia de energia de raios-X (EDS). Foram analisadas 10 regiões escolhidas aleatoriamente

nos fios, e feita a média das composições químicas determinadas em cada região. As temperaturas de transformação martensítica e reversa do material foram determinadas por calorimetria exploratória diferencial (DSC). As superfícies de fratura dos fios rompidos em fadiga foram analisadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os ensaios de deformação cíclica por dobramento rotatório foram realizados utilizando-se uma máquina furadeira de coluna. Os corpos de prova (CP) ensaiados mediam 90mm de comprimento. Uma das extremidades do CP foi fixada no mandril da furadeira e a outra introduzida em um pequeno orifício com 2mm de profundidade localizado em um aparato de aço, de tal forma que o CP ficou encurvado com um determinado raio de curvatura. Os raios utilizados foram 25 e 17mm, que proporcionaram amplitudes de deformação em tração, ε , na superfície dos fios de 2,0 e 3,0% respectivamente. Essas deformações foram calculadas utilizando-se a seguinte equação [9]:

$$\varepsilon = \left(\frac{2R}{d} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

onde R é o raio de curvatura do corpo de prova e d o seu diâmetro.

Foram realizados 30 ensaios na velocidade de 340rpm, sendo 15 em cada nível de deformação (2,0 e 3,0%), de onde se determinou o número médio de ciclos até a fratura em cada condição. A seguir foram realizados 30 ensaios na velocidade de 1040rpm, sendo 15 em cada nível de deformação citado acima, de onde se determinou o número médio de ciclos até a fratura em cada condição. Todos ensaios foram realizados ao ar na temperatura ambiente. O número médio de ciclos até a fratura em cada condição foi calculado multiplicando-se o tempo de ensaio (em segundos) pela velocidade de rotação da furadeira (em rotações por segundo).

A plataforma de testes é mostrada de forma esquemática na Figura 1. Ao girar, o CP sofre deformações cíclicas por dobramento na região encurvada. O atrito entre a extremidade do CP e o aparato foi minimizado com a utilização de óleo de silicone como lubrificante.

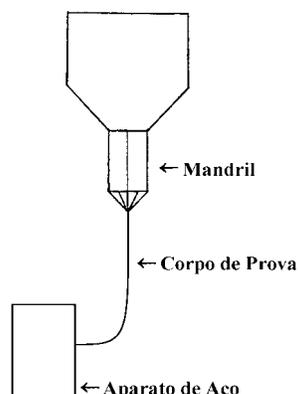


Figura 1. Esquema da plataforma de testes utilizada no trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química média do material, determinada por EDS, foi de aproximadamente 51%Ni-49%Ti (erro médio relativo menor que 0,2%), em porcentagem atômica. A análise por DRX dos fios não deformados mostrou a presença de uma grande quantidade da fase austenítica β , de estrutura cristalina B2 (cúbica de corpo centrado ordenada), e uma quantidade diminuta de martensita, de estrutura cristalina B19'. As temperaturas de transformação martensítica e reversa, determinadas por DSC, foram: $M_S = 23^\circ\text{C}$, $M_F = -26^\circ\text{C}$, $A_S = -11^\circ\text{C}$ e $A_F = 29$, o que confirma os resultados da análise por DRX, onde foi constatada a presença quase exclusiva da fase austenítica na temperatura ambiente.

As superfícies de fratura dos fios ensaiados, em ambas amplitudes de deformação e velocidades, apresentaram pequenas áreas de propagação lenta das trincas, (regiões lisas) nas regiões periféricas da superfície e uma grande área fibrosa central, associada à fratura rápida final.

A Figura 2-a ilustra uma área de propagação lenta das trincas, onde se observa a presença de estrias de fadiga e a Figura 2-b ilustra a região fibrosa associada à fratura rápida final.

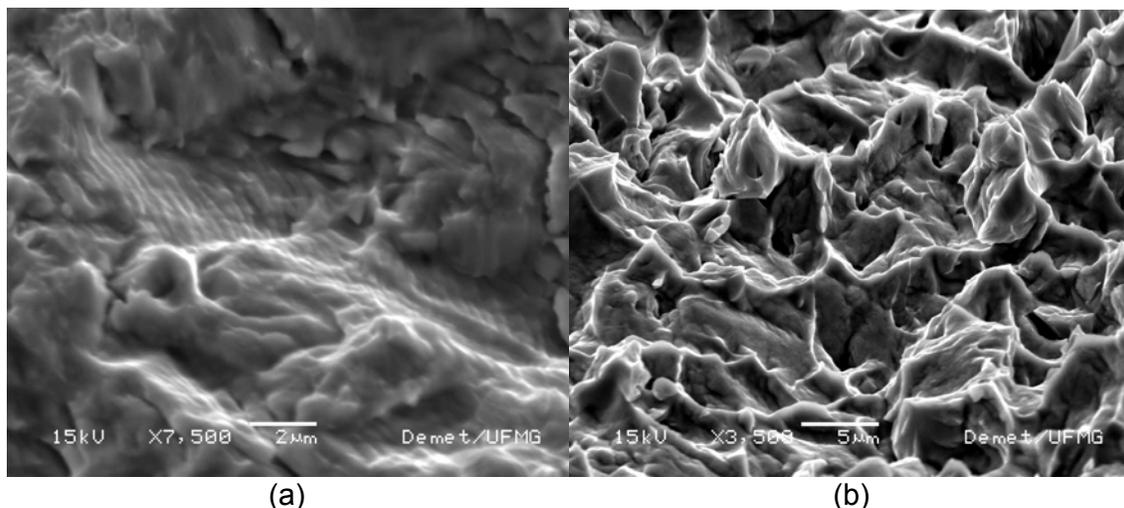


Figura 2. Detalhes da superfície de fratura de um fio de NiTi ensaiado em fadiga na velocidade de 340rpm e amplitude de deformação de 3%, observados por MEV: (a) região lisa com estrias de fadiga, 7500x; (b) região fibrosa, 3500x.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de deformação cíclica por dobramento rotatório: tempo e número médio de ciclos até a fratura nas duas velocidades de rotação (340 e 1040rpm) e amplitudes de deformação (2,0 e 3,0%) utilizadas.

Tabela 1. Amplitudes de deformação, velocidades de rotação, tempo e número médio de ciclos até fratura para cada condição de ensaio.

Deformação (%)	Velocidade de rotação (rpm)	Tempo médio até a fratura (s)	Número médio de ciclos até a fratura
2,0	340	324 ± 7	1836 ± 40
	1040	92 ± 3	1594 ± 51
3,0	340	159 ± 6	901 ± 34
	1040	41 ± 3	711 ± 52

Observa-se que em ambas amplitudes de deformação, a velocidade de rotação afetou a vida em fadiga do material. Houve uma diminuição no número de ciclos até a fratura nos ensaios realizados na velocidade de 1040rpm em relação aos ensaios realizados a 340rpm. Em amplitudes de deformação de 2,0%, a redução da vida em fadiga dos fios foi de aproximadamente 13%, enquanto que em amplitudes de 3,0% esta redução foi de aproximadamente 21%.

Esse efeito da velocidade de rotação sobre a vida em fadiga pode ser interpretado em termos de um aumento da temperatura dos fios durante a ciclagem. Calor é gerado durante a ciclagem mecânica, devido aos processos de dissipação de energia de deformação, decorrentes da formação de martensita induzida por tensão. Durante a formação desta, ocorre o movimento das interfaces martensita-austenita, que é um processo que dissipa energia e produz calor. Possivelmente houve um aumento de alguns graus na temperatura dos fios, devido à transferência de calor dos mesmos para o meio ambiente (ar) não ter sido suficiente para manter suas temperaturas constantes. Em velocidades de rotação maiores em que o atrito interno das interfaces é mais intenso e, portanto mais calor é gerado, o tempo para que o mesmo seja transferido para o meio ambiente é menor que no caso de velocidades de rotação menores. Desta forma, é esperado que fios ciclados ao ar em velocidades mais altas sofram um maior aumento na temperatura do que os fios ciclados em velocidades menores.

De acordo com a literatura [8,10], um aumento na temperatura das ligas NiTi superelásticas ocasiona um aumento da tensão crítica para formação de martensita. Maiores tensões de transformação, por sua vez, aumentam a introdução de deslocamentos e ocorrência de deformações plásticas, favorecendo a formação e crescimento de trincas no material.

Nota-se que a redução da vida em fadiga do material foi mais considerável na amplitude de deformação de 3,0%. Sabe-se que a energia de deformação dissipada por unidade de volume é determinada pelo produto da tensão e deformação associados com a transformação de fase [10]. Portanto, um aumento da deformação acarreta um aumento da energia dissipada, que por sua vez acarreta um aumento da temperatura, e dessa forma uma diminuição da vida em fadiga.

CONCLUSÕES

- Através da ciclagem mecânica por dobramento rotatório observou-se a influência da velocidade de rotação sobre a vida em fadiga de fios superelásticos de NiTi.

Maiores velocidades de rotação proporcionaram uma redução na vida em fadiga. Maiores amplitudes de deformação também contribuíram para uma menor vida em fadiga.

- Os efeitos da velocidade de rotação e da amplitude de deformação sobre a vida em fadiga estão associados a um aumento da temperatura dos fios, relacionado aos processos de dissipação de energia decorrentes da formação de martensita induzida por tensão durante a ciclagem. Este aumento ocasiona uma elevação da tensão crítica para formação de martensita, que por sua vez favorece a nucleação e propagação de trincas nos fios, resultando em uma menor vida em fadiga dos mesmos.
- Na utilização de ligas NiTi superelásticas em condições de deformação cíclica por dobramento rotatório ao ar, deve ser levado em conta a influência da velocidade de rotação e amplitude de deformação sobre a vida em fadiga do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MIYAZAKI, S. Medical and dental applications of shape memory alloys. In: OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. (Ed.). **Shape memory materials**. New York: Cambridge University Press, 1998, p.267-281.
2. OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. Introduction. In: OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. (Ed.). **Shape memory materials**. New York: Cambridge University Press, 1998, p.1-26.
3. OTSUKA, K.; REN, X. Martensitic transformations in nonferrous shape memory alloys. **Materials Science and Engineering A**, v.273-275, p.89-105, 1999.
4. SABURI, T. Ti-Ni shape memory alloys. In: OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M. (Ed.). **Shape memory materials**. New York: Cambridge University Press, 1998, p.49-93.
5. SHAW, J. A.; KYRIAKIDES, S. Thermomechanical aspects of NiTi. **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, v.43, n.8, p.1243-1281, 1995.
6. TOBUSHI, H.; TAKAFUMI, N.; SHIMENO, Y.; HASHIMOTO, T. Low-cycle fatigue of TiNi shape memory alloy and formulation of fatigue life. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v.122, n.2, p.186-191, 2000.
7. TOBUSHI, H.; HACHISUKA, T.; HASHIMOTO, T.; YAMADA, S. Cyclic deformation and fatigue of a TiNi shape-memory alloy wire subjected to rotating bending. **Transactions of the ASME**, v.120, p.64-70, 1998.
8. WAGNER, M.; SAWAGUCHI, T.; KAUSTRÄTER, G.; HÖFFKEN, D.; EGGELER, G. Structural fatigue of pseudoelastic NiTi shape memory wires. **Materials Science and Engineering A**, v378, p.105-109, 2004.
9. BAHIA, M.G.A. Resistência à fadiga e comportamento em torção de instrumentos endodônticos de NiTi *ProFile*. Belo Horizonte, Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004, 212 p. (Tese de Doutorado, área de concentração: ciência e engenharia de materiais).
10. TOBUSHI, H.; HACHISUKA, T.; YAMADA, S.; LIN, P. H. Rotating-bending fatigue of a TiNi shape memory alloy wire. **Mechanics of Materials**, v.26, p.35-42, 1997.

THE INFLUENCE OF ROTATIONAL SPEED DURING ROTARY BENDING ON THE FATIGUE BEHAVIOR OF A SUPERELASTIC NiTi ALLOY

*Rogério Fonseca Dias
Vicente Tadeu Lopes Buono*

Abstract

The influence of rotational speed on the fatigue resistance of wires of a superelastic NiTi alloy subjected to cyclic rotary bending strains, in two different amplitudes, was investigated in this work. The material was characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, electron microprobe analysis and differential scanning calorimetry. Cyclic bending tests were performed employing two different radius of curvature, to allow maximum tensile strain amplitudes of 2.0 and 3.0% in the wire surface. Initially, specimens were tested until rupture by fatigue, at rotational speed of 340rpm. Next, tests were performed at rotational speed of 1040rpm. In both strain amplitudes, 2.0 and 3.0%, the rotational speed affected the material's fatigue life. A decrease in the number of cycles to failure in tests performed at 1040rpm, in regard to tests performed at 340rpm, was observed. This reduction was more significant in material subjected to strain amplitudes of 3.0%. This effect probably occurred due an increase in the wires temperature during the tests, and consequently, an increase of the martensitic transformation start stress, which caused a reduction in the material's fatigue life.

Key-words: NiTi alloys; Superelasticity; Fatigue.