

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE FIOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA NiTi EM REGIME DE FLEXÃO ALTERNADA

Magna Silmara de Oliveira Araújo, magnasilmara@hotmail.com¹

Paulo César da Silva Sales, paulocesarsales@outlook.com¹

Oscar Borges Melo, oscarborgesmelo@gmail.com¹

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹ Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Rua Aprígio Veloso 882, Bairro Universitário, Campina Grande, PB – CEP 58429-140.

Resumo: As Ligas com Memória de Forma (LMF) do sistema NiTi são as mais difundidas no mercado e podem ser encontradas em diversas aplicações que abrangem, principalmente, os campos de medicina e odontologia. No entanto, grande parte destas aplicações acontecem sob solicitações cíclicas ou variáveis, o que torna imprescindível o estudo da vida em fadiga destes tipos de materiais. Diante disto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento em fadiga de fios superelásticos de Liga com Memória de Forma (LMF) NiTi com seção transversal circular (0,5 mm de diâmetro), submetidos a ensaios dinâmicos em modo de flexão simples alternada (single cantilever) utilizando um equipamento de análise dinâmico mecânica (DMA). A vida em fadiga dos fios NiTi foi avaliada observando-se o número de ciclos até a ruptura em função das amplitudes de deformação aplicadas durante o processo de ciclagem mecânica. Adicionalmente, a fadiga funcional foi avaliada por meio do acompanhamento da evolução da força aplicada em função do número de ciclos para diferentes amplitudes de deformação. Observou-se, em geral, que a força sofre um pequeno aumento, de aproximadamente 5%, durante os primeiros ciclos, tendendo, em seguida, a se estabilizar e permanecendo praticamente constante até iniciar um decaimento devido ao processo de ruptura cíclica. Além disso, o número de ciclos até a fratura dos fios NiTi dependem de forma direta da amplitude de deformação cíclica de ensaio, situando-se na faixa de 10^3 a 10^5 ciclos.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Superelasticidade, Ligas NiTi, Fadiga.

1. INTRODUÇÃO

Com os avanços na ciência e tecnologia, e uma compreensão mais profunda dos efeitos das técnicas de processamento e da microestrutura sobre o comportamento dos materiais, o campo da ciência dos materiais tem melhorado radicalmente através das últimas décadas. Assim, algumas necessidades industriais e tecnológicas não podem ser supridas por materiais convencionais de engenharia ou pela modificação de algumas características dos mesmos, mas demandam o desenvolvimento de materiais avançados, alguns destes chamados materiais inteligentes.

De um modo geral, materiais inteligentes são aqueles capazes de realizar determinada função em resposta a estímulos externos. Esta característica tem despertado o interesse dos pesquisadores para diversas aplicações (Schrooten *et al*, 2002). Estes materiais podem agir como sensores e/ou atuadores. Como sensores convertem sinais mecânicos (tensão e deformação mecânica) em respostas não mecânicas (elétrica, térmica, magnética, etc), enquanto que como atuadores convertem sinais não mecânicos em respostas mecânicas (Janocha, 1999; Lagoudas, 2008). São exemplos de materiais inteligentes as cerâmicas e os polímeros piezoelétricos, os fluidos eletroreológicos e magnetoreológicos e as ligas com memória de forma (LMF), do inglês *Shape Memory Alloys* (SMA).

As LMF são ligas metálicas que exibem duas propriedades funcionais diferenciadas: o efeito memória de forma (EMF) e a superelasticidade (SE). Estes materiais apresentam a capacidade de recuperar sua forma quando submetidos a grandes deformações e a um ciclo térmico adequado, mesmo sob elevadas cargas aplicadas, resultando em elevada densidade de energia de atuação. Além disso, sob condições específicas, as LMF podem absorver e dissipar energia mecânica devido ao seu comportamento histerético quando da aplicação de cargas mecânicas cíclicas. Estas propriedades decorrem da capacidade destes materiais de apresentarem uma transformação de fase reversível,

denominada de transformação martensítica termelástica, induzida por ciclo térmico ou por aplicação de tensão mecânica (Lagoudas, 2008).

A transformação martensítica termelástica (TMT) é uma transformação de fase que não ocorre através de um processo de difusão em sólidos, mas sim por meio do movimento cooperativo dos átomos (Otsuka &Wayman, 1998). Além disso, apesar dos deslocamentos atômicos serem pequenos, em comparação com a distância interatômica, uma alteração de forma em nível macroscópico aparece associado à TMT. É neste conceito que esta transformação de fase está intimamente relacionada com os fenômenos de EMF e SE. (Otsuka &Wayman, 1998).

Normalmente, a austenita, fase de alta temperatura, apresenta estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (B2), enquanto a martensita, fase de temperatura mais baixa, tem uma simetria inferior, podendo ocorrer sob a forma de cristais monoclinicos (B19') ou cristais ortorrômbicos (B19). Uma fase martensítica intermediária, de estrutura romboédrica, ainda pode ocorrer nas LMF NiTi, dependendo da composição, da adição de elementos de liga ternários e de tratamentos termomecânicos aplicados ao material. Esta fase intermediária, denominada de fase R, geralmente desaparece com tratamentos térmicos a altas temperaturas (superiores a 600 °C) e, portanto, sua existência está associada a condições específicas. (Otsuka &Wayman, 1998; Lagoudas, 2008).

Dentre as LMF existentes, a mais utilizada é a liga de Níquel-Titânio (NiTi), que apresenta grande capacidade de recuperação de deformação aparentemente plástica (cerca de 8%) e já é bastante difundida no mercado. Além disso, trata-se de um material biocompatível e de boa resistência a corrosão.

Na maioria das aplicações das LMF de NiTi, as propriedades de EMF e SE são utilizadas sob solicitações térmicas e/ou mecânicas cíclicas ou variáveis. Diante disto, o estudo da vida em fadiga deste tipo de material é primordial para garantir sua funcionalidade estrutural e sob condições de trabalho. A fadiga em LMF pode ser dividida em fadiga funcional, que se refere à degradação das propriedades de EMF e SE, e fadiga estrutural, associada aos danos microestruturais do material e número de ciclos até a falha.

Na literatura existem poucos trabalhos que avaliam o comportamento em fadiga de LMF em modo de flexão simples alternada (*single cantilever*), principalmente utilizando equipamentos de Análise Dinâmico Mecânica (DMA) (Branco, 2005; Roy *et al.*, 2008). Através de um equipamento de DMA é possível avaliar o comportamento termomecânico de um material, ou de componentes mecânicos miniaturizados, quando estes são submetidos a forças dinâmicas e a um programa controlado de temperatura. Nestes casos, podem ser obtidos resultados muito mais precisos e confiáveis quando comparadas com as máquinas de teste padrão, em ensaios de corpos de prova e/ou componentes mecânicos de pequenas seções transversais. Entretanto, a experiência de utilização de equipamentos não-padrão para testes de fadiga é relativamente limitada, apontando a necessidade de uma melhor compreensão sobre o assunto (Araújo, 2015).

Nesse contexto, o presente trabalho visa um maior entendimento do comportamento de fios de LMF NiTi em estado austenítico na temperatura ambiente (apresentando, portanto, superelasticidade nessa temperatura), com seção transversal circular (0,5 mm de diâmetro), sob solicitação mecânica de fadiga em flexão alternada simples (*single cantilever*), empregando um equipamento de DMA.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Todas as atividades desenvolvidas neste trabalho foram realizadas nas instalações do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

2.1. Fios de LMF NiTi

Utilizou-se fios de NiTi provenientes de arcos ortodônticos superelásticos, de seção transversal circular (0,5mm de diâmetro). Estes arcos são comercializados no mercado nacional pela empresa Dental Morelli (São Paulo, SP).

Os corpos de prova (CP) foram extraídos das regiões mais retilíneas dos arcos ortodônticos, com o objetivo de minimizar interferências da curvatura nos resultados. Cada arco gerou dois CP's com aproximadamente 30 mm de comprimento cada um.

2.2. Caracterização Pré-fadiga

2.2.1. Análise de Superfície: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A observação da qualidade superficial dos fios LMF NiTi novos foi realizada usando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O equipamento utilizado foi um Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo Vega3, da marca Tescan. Esta técnica foi utilizada com o propósito de verificar a qualidade superficial dos fios estudados, uma vez que, dentre outros fatores, os defeitos superficiais podem afetar a vida em fadiga dos materiais.

2.2.2. Análise Térmica via Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

Quando se trabalha com LMF é de fundamental importância conhecer as temperaturas de transformação de fase (A_s , A_f , M_s , M_f e da fase R, caso ocorra), uma vez que estas temperaturas influenciam o comportamento termomecânico destes materiais.

Para obtenção das temperaturas e entalpias de transformação dos fios LMF NiTi foi utilizada a técnica de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). Esta técnica permite medir a quantidade de calor absorvida ou liberada durante a transformação de fase da LMF, resultando em picos exotérmicos durante o resfriamento e picos endotérmicos durante o aquecimento de uma amostra. O equipamento utilizado foi um calorímetro DSC modelo Q20, da marca TA Instruments. Os ensaios foram realizados em uma faixa de temperatura de -60°C a 100°C, com taxas de aquecimento e resfriamento fixadas em 5 °C/min.

2.2.3. Resistência Mecânica: Ensaios de Tração

Os ensaios mecânicos de tração monotônica (estáticos) foram realizados para auxiliar na escolha dos níveis de deformação a serem empregados no estudo da vida em fadiga dos fios de LMF NiTi. Utilizou-se a máquina de ensaios eletrodinâmica Instron, modelo Electropuls E10000. Neste caso, os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM F 2516-14, que trata dos testes de tração em fios de LMF superelásticos. O ensaio consiste em submeter o fio a um primeiro ciclo de carregamento até 6% de deformação seguido de um descarregamento até um nível de tensão de 7MPa, ambos os trechos com taxa máxima predefinida segundo a seção transversal do fio; e finalmente o material é tracionado novamente até que ocorra a ruptura à uma taxa superior de um fator de 10^1 , quando comparado ao primeiro ciclo de carregamento e descarregamento.

2.3. Fadiga Mecânica

Uma vez que a análise utilizando um equipamento de DMA permite o estudo do comportamento dos materiais sob cargas cíclicas, é possível utilizá-lo no estudo da vida em fadiga de fios de LMF NiTi. Os testes de fadiga foram realizados utilizando um analisador dinâmico mecânico (DMA) modelo Q800, da marca TA Instruments, em flexão simples alternada no modo de viga simplesmente engastada (*Single Cantilever*). Nesta modalidade uma das extremidades engastadas do fio NiTi permanece fixa (engastada) e a outra móvel.

Na extremidade da parte móvel é imposta uma força ou deslocamento oscilatório com uma determinada amplitude e frequência prescrita. Todas estas análises são realizadas em uma temperatura constante.

A partir da análise dos resultados dos ensaios mecânicos de tração, DSC e testes preliminares utilizando o DMA, foram escolhidos os seguintes parâmetros para os ensaios de fadiga: amplitude de deformação de 0,7; 1,0; 1,3 e 1,6%, frequência constante de 1 Hz e temperatura de 35°C. A partir dos resultados obtidos, foi construída uma curva de Wöhler, revelando a evolução do número de ciclos até a ruptura em função do nível da amplitude de deformação aplicada, permitindo determinar a fadiga estrutural dos fios NiTi. Além disso, analisou-se a fadiga funcional dos fios através do acompanhamento da evolução da força aplicada para produzir a amplitude de deformação em função do número de ciclos.

2.4. Caracterização Pós-fadiga

Com o intuito de identificar o modo de fratura dos fios NiTi circulares, as superfícies de ruptura após os ensaios de fadiga foram examinadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo Vega3, marca Tescan.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização Pré-fadiga

3.1.1. Análise de Superfície via MEV

As superfícies dos fios NiTi superelásticos, no estado como recebidos, foram analisadas via MEV quanto ao acabamento superficial, usando aumentos de 200x e 3000x. As imagens obtidas estão apresentadas na Fig. 1.

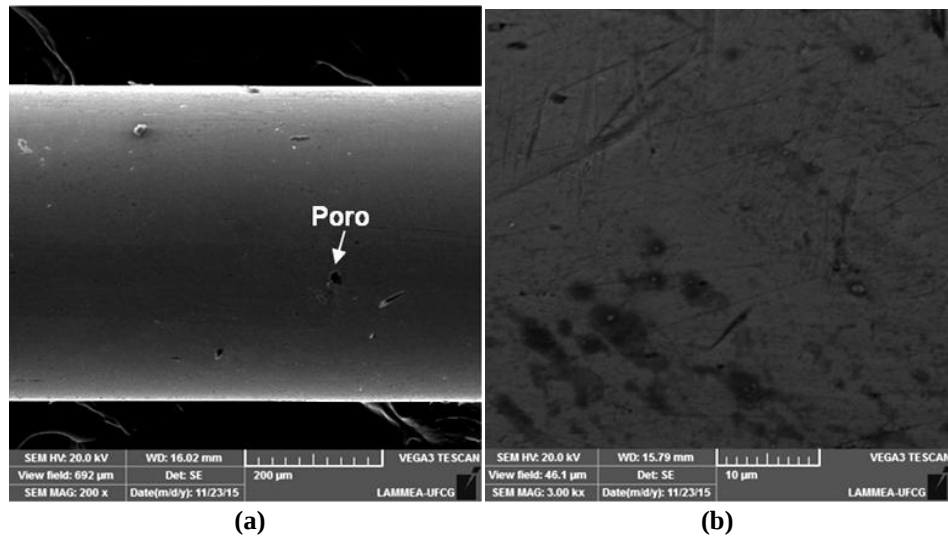


Figura 1. Imagens da superfície do fio NiTi superelástico com seção transversal circular obtidas por MEV. (a) Aumento de 200x. (b) Aumento de 3000x. (Autoria Própria)

As imagens da Fig. 1 revela a presença de ranhuras, principalmente com orientação longitudinal, e pequenos poros na superfície dos fios NiTi. Tais defeitos superficiais podem ser oriundos do processo de fabricação por trefilação dos fios, podendo afetar a vida em fadiga dos mesmos, eventualmente diminuindo o número de ciclos até a ruptura.

3.1.2. Análise Térmica via DSC

Nesta etapa, foram realizados ciclos térmicos nos fios NiTi novos, monitorando a variação do fluxo de calor em função da temperatura. A partir das curvas de DSC obtidas, mostradas na Fig. 2, foi possível determinar as temperaturas críticas de transformação de fase, R_s , R_f , A_s e A_f , assim como as temperaturas de pico da transformação, R_p e A_p .

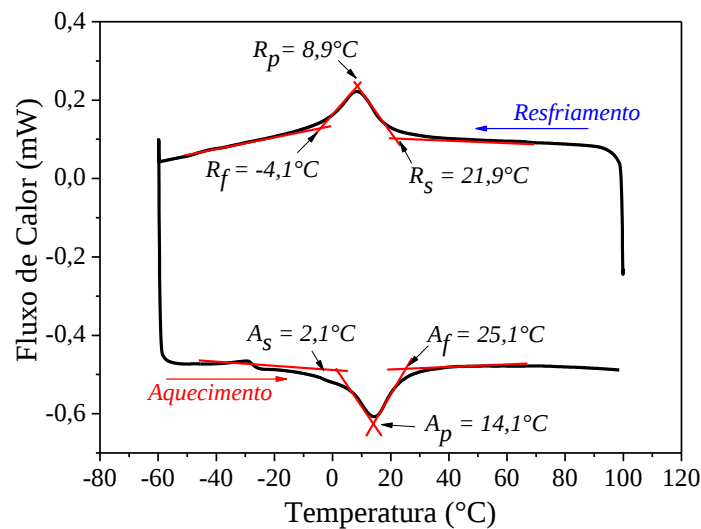


Figura 2. Análise térmica DSC dos fios NiTi superelásticos com seção transversal circular. (Autoria Própria)

A partir dos resultados obtidos via DSC, observa-se que os fios NiTi superelásticos com seção transversal circular apresentam os dois picos característicos da transformação martensítica direta (resfriamento) e reversa (aquecimento). Além disso, verifica-se que os fios apresentam a fase austenita estável a partir de aproximadamente 25,1 °C. Esses valores são indicativos da presença de superelasticidade na temperatura ambiente de trabalho dos fios, uma vez que os mesmos são provenientes de arcos ortodônticos, para os quais a temperatura bucal normalmente está situada numa faixa de 36 – 37,5°C.

Além disso, foram obtidos os valores de histerese térmica ($H_t = A_p - R_p$) e as entalpias de transformação (ΔH). Estas entalpias, estimadas integrando os picos da Fig. 2, foram de aproximadamente 2,5 J/g durante o resfriamento (transformação direta) e aquecimento (transformação inversa). Já a histerese em temperatura foi da ordem de 5,2 °C. Estes valores reduzidos de histerese térmica e da entalpia de transformação indicam que as transformações de fase observadas na Fig. 2 são na verdade transformações intermediárias, ou seja, envolvem a formação da martensita

conhecida por fase R, tendo em vista que a transformação desta fase leva a reduzida histerese térmica e libera pouca energia quando comparada com a transformação martensítica completa e sua reversão, que apresentam valores de entalpias, geralmente, situados entre 19 e 32 J/g (Otsuka & Wayman, 1998; Grassi, 2014).

3.1.3. Resistência Mecânica: Ensaio de Tração

Para efeito de caracterização mecânica, bem como seleção dos níveis de deformação a serem utilizados nos ensaios de fadiga usando o equipamento de DMA, os fios NiTi foram submetidos a ensaios de tração quase estáticos baseados na norma ASTM F2516-14. A curva tensão-deformação obtida podem ser observada na Fig. 3.

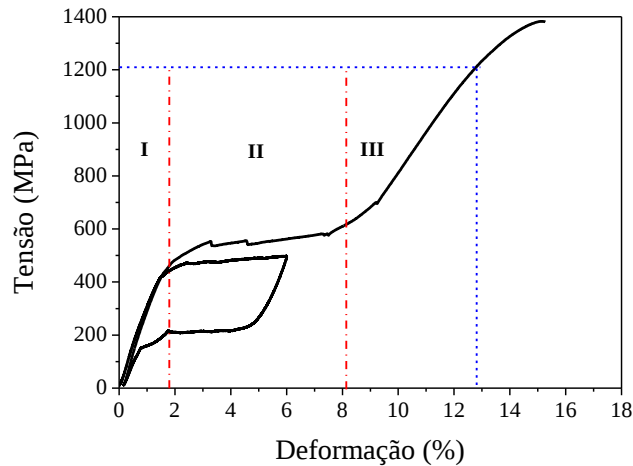


Figura 3. Curva tensão-deformação do fio NiTi superelástico com seção transversal circular. (Autoria Própria)

O comportamento da Fig. 3 permite identificar três regiões distintas, correspondentes a diferentes estágios do material até a ruptura:

Região I: o fio de LMF NiTi, no estado austenítico, apresenta uma deformação elástica praticamente linear até aproximadamente 2%. Nesse estágio, ao cessar o carregamento mecânico, o fio retorna ao ponto de deformação quase nula seguindo uma trajetória também linear;

Região II: observa-se o início da transformação da fase austenita em martensita induzida por tensão mecânica. Este fenômeno é caracterizado por um patamar que tem início em aproximadamente 500 MPa estendendo-se até 550 MPa, com quase 8% de deformação. Percebe-se que durante a transformação de fase o material sofre grandes deformações (cerca de 8%) com pouca variação de tensão. Ao cessar o carregamento nesta região, o fio voltará ao ponto de deformação quase nula seguindo um caminho elástico não-linear (laço histerético). Este é o fenômeno denominado superelasticidade, que pode ser visualizado no laço tensão – deformação inicial, para 6%. Essa é uma das vantagens do uso de LMF sobre os materiais clássicos em aplicações ortodônticas, por exemplo, as quais exigem grandes deslocamentos com um carregamento mecânico lento e progressivo, aproximadamente constante (Barbarino, 2009; Fercec *et al.*, 2014);

Região III: nessa última região o fio apresenta microestrutura 100% martensítica, induzida por tensão mecânica. Neste caso, a martensita apresenta deformação elástica linear até aproximadamente 1200 MPa, para uma faixa situada entre 10 e 13% de deformação. A partir deste ponto a deformação passa a ser plástica, até a ruptura.

Adicionalmente, foi constatado que o fio NiTi estudado apresentara limite de ruptura da ordem de 1400 MPa com deformação total recuperável situada entre 6 e 8%, enquanto ligas metálicas clássicas apresentam deformação elástica limitada a apenas 0,2% (Callister, 2000).

Com base nos ensaios de tração, os níveis de amplitude de deformação foram selecionados de modo que os ensaios de fadiga fossem realizados sem ultrapassar a região de deformação elástica linear da austenita (região I) levando, assim, potencialmente a uma fadiga de alto ciclo.

3.2. Fadiga Mecânica

A fadiga funcional dos fios NiTi foi avaliada através do levantamento de curvas de força aplicada para impor a amplitude de deformação desejada *versus* número de ciclos até a ruptura, para cada condição de ensaio estudada. Os resultados obtidos podem ser avaliados na Fig. 4.

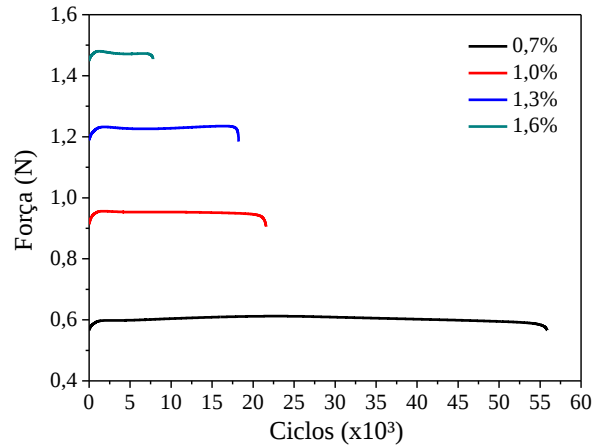


Figura 4. Evolução da força aplicada aos fios NiTi superelásticos com seção transversal circular para os ensaios de fadiga com frequência de 1Hz e amplitudes de 0,7; 1,0; 1,3 e 1,6%. (Autoria Própria)

De uma forma geral, observa-se que a força aumenta em aproximadamente 5% durante os primeiros ciclos, provavelmente devido a um leve processo de encruamento gerado durante a ciclagem mecânica. Em seguida, essa força tende a se estabilizar e permanecer praticamente constante até iniciar um decaimento indicativo do início do processo de ruptura cíclica. Além disso, verifica-se que o nível do patamar de força aumenta à medida que a amplitude de deformação imposta nos ensaios aumenta.

A partir dos dados obtidos nos ensaios cíclicos no DMA foi estabelecida a curva de Wöhler para os fios NiTi de seção circular, com o intuito de quantificar a fadiga estrutural destes fios em modo de flexão simples alternada, mostrando o comportamento da vida em fadiga em função das amplitudes de deformação aplicadas, para uma frequência fixa de 1Hz. Os resultados de vida em fadiga podem ser avaliados na Fig. 5.

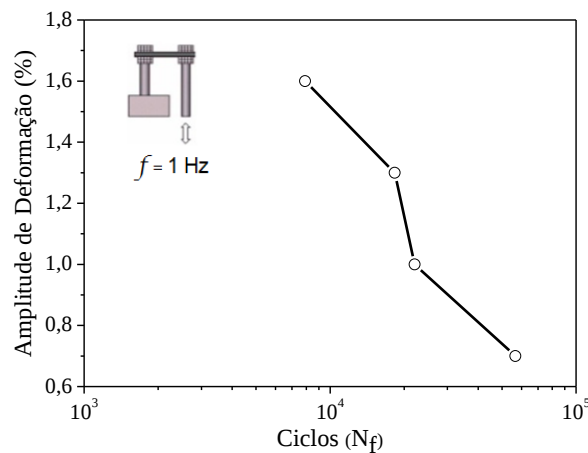


Figura 5. Curva de Wöhler dos fios NiTi para amplitudes de 0,7; 1,0; 1,3 e 1,6% e frequência fixa de 1Hz. (Autoria Própria)

A partir da Fig. 5, verifica-se a influência direta da amplitude de deformação imposta nos ensaios cíclicos, já que quanto maior a amplitude de deformação menor é o número de ciclos até a fratura (N_f). Os fios NiTi superelásticos com seção transversal circular submetidos a uma amplitude de deformação de 0,7% apresentaram maior vida em fadiga dentre os casos estudados. No geral, constatou-se um fenômeno de fadiga de baixo ciclo ($10^3 < N_f < 10^5$), contrariamente ao que se poderia esperar pelo fato das sollicitações mecânicas não terem ultrapassado o limite de 2 % de deformação (limite elástico do fio NiTi, Fig. 3).

3.3. Caracterização Pós-fadiga

Após serem sollicitados mecanicamente até a ruptura em diferentes amplitudes de deformação, as superfícies de fratura dos fios de LMF NiTi foram analisadas em MEV. As imagens foram capturadas com aumentos de 250x e 1000x para melhor avaliar a superfície do material no estado de pós-fadiga, conforme se pode verificar na Fig. 6 para os três maiores níveis de deformação.

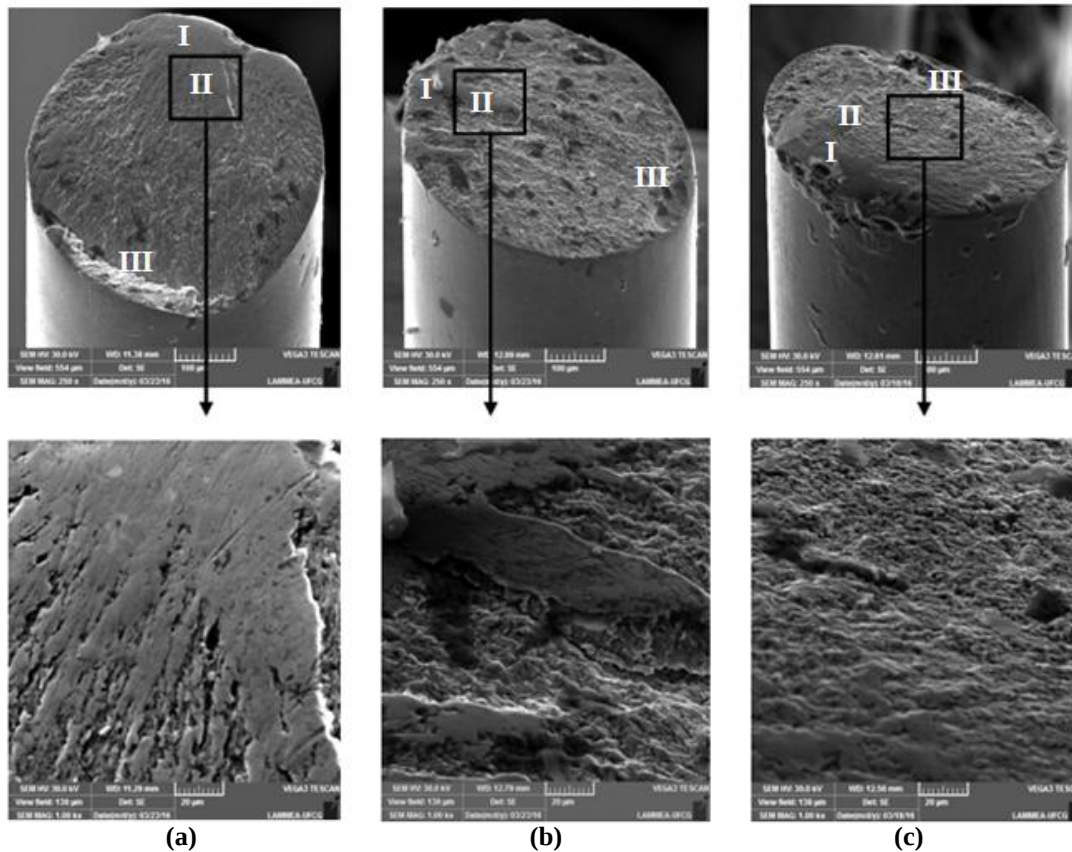


Figura 6. Imagens das superfícies de fratura dos fios NiTi de seção transversal circular. Amplitude de deformação de (a) 1,0% (22080 ciclos); (b) 1,3% (18300 ciclos); (c) 1,6% (7920 ciclos). (Autoria Própria)

De uma maneira geral, as superfícies de fratura revelaram fraturas típicas de falha por fadiga, apresentando os três estágios de desenvolvimento (representados nas imagens por I, II e III). O estágio I corresponde ao surgimento de uma ou mais microtrincas, enquanto o estágio II refere-se à propagação das micro a macrotrincas, formando superfícies de fratura com patamares normalmente lisos e na direção da máxima tensão. Já no estágio III, o material remanescente não pode mais suportar as cargas, resultando na fratura repentina. Além disso, observando as imagens com ampliação de 1000x, nota-se que o aspecto das superfícies dos fios, em geral, revela uma mistura de fratura frágil e dúctil, revelando um aspecto escavado (*dimples*) em algumas regiões e uma superfície mais lisa em outras.

Observa-se que apesar das vidas em fadiga serem diferentes para diferentes amplitudes de deformação de ensaio, as superfícies de fratura foram semelhantes entre si, ainda que não tenha sido possível comparar os formatos das trincas para tempos iguais de ensaios.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram estudados fios de LMF NiTi de seção circular submetidos a testes cíclicos de fadiga em modo de flexão simples alternada (*single cantilever*) para uma frequência de 1 Hz e diferentes amplitudes de deformação (0,7 a 1,6 %);

As análises iniciais de tração monotônica, juntamente com os valores de temperaturas de transformação medidos usando DSC, permitiram comprovar o regime de superelasticidade dos fios de NiTi a 35°C (temperatura do ensaio de fadiga);

A partir dos ensaios cíclicos, foi possível constatar que fatores como a amplitude de deformação influenciam diretamente a vida em fadiga de fios NiTi em regime de ciclagem mecânica utilizando DMA;

No que diz respeito à fadiga funcional, observou-se que em um primeiro momento ocorre um ligeiro aumento no nível de força necessária para impor as deformações (0,7 a 1,6 %), devido a um provável fenômeno de endurecimento causado por um processo de encruamento cíclico. Em seguida, esse nível de força se estabiliza e permanece praticamente constante até o início de um decaimento que indica o processo de ruptura;

Para níveis de amplitude de deformação entre 0,7% e 1,6%, a vida em fadiga ficou situada entre 10^3 e 10^5 ciclos, caracterizando uma fadiga de baixo ciclo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos seguintes projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo no 574001/2008-5), Casadinho UFCG-UFRJ-ITA (Processo no 552199/2011-7), Universal 14/2012 (Processo no 474524/2012-4), CT-Aeroespacial 22/2013 (Processo no 402082/2013-3) e PQ 1D (Processo no 304658/2014-6).

6. REFERÊNCIAS

- Araújo, S. S. Comportamento Dinâmico e Fadiga Termomecânica de Atuadores de Ligas CuAlNi com Memória de Forma. 2015. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.
- Barbarino, S. Smart Morphing Concepts and Applications for Advanced Lifting Surfaces. 2009. 463f. PhD Thesis in Aerospace Engineering. University of Napoli “Federico II”. Napoli, Italy, 2009.
- Branco, V. T. F. C.; Little, D.N.; Soares, J. B. Análise do Dano por Fadiga em Amostras de Mástique Usando o Dynamic Mechanical Analyzer (DMA). In: XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Recife, p. 1218-1230, 2005.
- Callister, W. D. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. LTC Editora S.A, 5ª Edição, 2000. ISBN 9788521621249.
- Fercec, J.; Anzel, I.; Rudolf, R. Stress Dependent Electrical Resistivity of Orthodontic Wire from the Shape Memory Alloy NiTi. Materials & Design, v. 55, p. 699-706, 2014.
- Grassi, E. N. D. Comportamento Termomecânico de Minimolas Superelásticas de NiTi: Influência de Tratamentos Térmicos. 2014. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- Janocha, H. Adaptronics and Smart Structures – Basics, Materials, Designs and Application. Edited by Janocha, H., Springer Science & Business Media, Germany 1999. ISBN 978-3-540-71967-0
- Lagoudas, D. C. Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Application. Edited by Lagoudas, D. C., Springer, Texas-USA, 2008. ISBN 978-0-387-47685-8.
- Otsuka, K.; Wayman, C.M. Shape Memory Materials. Cambridge University Press, 1998. ISBN 0 521 663849.
- Roy, D.; Buravalla, V.; Mangalgi, P. D.; Allegavi, S.; Ramamurty, U. Mechanical Characterization of NiTi SMA Wires Using a Dynamic Mechanical Analyzer. Materials Science and Engineering A, v. 494, p. 429-435, 2008.
- Schrooten, J.; Michaud, V.; Parthemios, J.; Psarras, G. C.; Galiotis, C.; Gotthardt, R.; Manson, J.; Van Humbeeck, J. Progress on Composites with Embedded Shape Memory Alloy Wires. Materials Transactions, v.43, p. 961-973, 2002.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

EVALUATION OF THE FATIGUE BEHAVIOR OF NiTi SHAPE MEMORY ALLOY WIRES IN ALTERNATE BENDING MODE

Magna Silmara de Oliveira Araújo, magnasilmara@hotmail.com¹

Paulo César da Silva Sales, paulocesarsales@outlook.com¹

Oscar Borges Melo, oscarborgesmelo@gmail.com¹

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br¹

¹Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Rua Aprígio Veloso 882, Bairro Universitário, Campina Grande, PB – CEP 58429-140

Abstract. Shape Memory Alloys (SMA) of NiTi system is the most widespread on the market and can be found in diverse applications covering mainly the medical and dental fields. However, most of these applications occur under cyclic stresses or variables, which makes it necessary to study the fatigue life of these types of materials. Given this, the present study aims to analyze the fatigue behavior of superelastic wire alloy with shape memory (LMF) NiTi with circular cross section (0.5 mm diameter), subjected to dynamic tests in alternating simple bending mode (single cantilever) using a dynamic mechanical analysis device (DMA). The fatigue life of NiTi wires was evaluated by observing the number of cycles until break as a function of applied strain amplitudes during the mechanical cycling process. In addition, functional fatigue was assessed by monitoring the evolution of the force applied on the number of cycles for different deformation amplitudes. It was observed generally that the strength undergoes a small increase approximately 5% during the first cycle, tending then to stabilize and remained virtually constant until starting a cyclic decay due to rupture process. Furthermore, the number of cycles to fracture of the NiTi wires directly dependent amplitude cyclic strain test to stand in the range 10^3 - 10^5 cycles.

| Keywords: *Shape Memory Alloys, Superelasticity, NiTi Alloys, Fatigue*