

## Análise experimental do comportamento em fadiga de fios superelásticos de ligas com memória de forma Ni-Ti em flexão simples alternada

M. S. O. Araújo<sup>1\*</sup>, P. C. S. Sales<sup>2</sup>, O. B. Melo<sup>1</sup>, C. J. de Araújo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande

<sup>2</sup>Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande

\*Aprígio Veloso 882, Bodocongó, Campina Grande, PB – CEP 58429 – 900

(Recebido em 12/04/2016; revisado em 05/07/2016; aceito em 10/08/2016)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento em fadiga de fios superelásticos de Liga com Memória de Forma (LMF) Ni-Ti com seção transversal circular e retangular submetidos a ensaios dinâmicos em modo de flexão simples (single cantilever), utilizando um equipamento de Análise Dinâmica Mecânica (DMA - Dynamic Mechanical Analysis). A vida em fadiga dos fios Ni-Ti foi avaliada por meio do número de ciclos até a ruptura em função das amplitudes de deformação aplicadas durante o processo de ciclagem mecânica. Adicionalmente, a fadiga funcional foi verificada 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 leve aumento, de aproximadamente 5%, durante os primeiros ciclos, tendendo a se estabilizar e permanecendo praticamente constante até iniciar um decaimento devido ao processo de ruptura cíclica. Constatou-se também, através das curvas de Wöhler, que o fio de seção circular possui uma vida em fadiga superior àquela do fio de seção retangular. Além disso, o número de ciclos até a fratura dos fios Ni-Ti dependem de forma direta da amplitude de deformação cíclica, situando-se na faixa de 103 a 105 ciclos, caracterizando uma fadiga de baixo ciclo.

**Palavras-chave:** Ligas com memória de forma; superelasticidade; ligas Ni-Ti; fadiga.

### Abstract:

This study aims to analyze the fatigue behavior of Ni-Ti Shape Memory Alloy (SMA) superelastic wires with circular and rectangular cross sections, subjected to dynamic tests using a dynamic mechanical analysis (DMA) equipment. The fatigue life of the Ni-Ti wires was evaluated by means of the number of cycles until failure 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 with the number of cycles for different strain amplitudes. It was observed that this force undergoes a small increase, of the order of 5%, during the first cycles, tending to stabilize and remaining constant until starting a cyclic decay due to rupture process. It was also found by the Wöhler curve, the circular cross section Ni-Ti wire has a greater fatigue life than the ones with of rectangular cross section. Furthermore, the number of cycles to fracture of the Ni-Ti wires, in the range 103-105 cycles, dependent directly of amplitude cyclic strain, characterizing a low cycle fatigue.

**Keywords:** Shape memory alloys; superelasticity; Ni-Ti alloys; fatigue.

### 1. Introdução

As Ligas com Memória de Forma (LMF) pertencem a uma classe de materiais metálicos especiais que apresentam a capacidade de recuperar totalmente uma deformação residual (pseudoplástica) por meio de um aquecimento à determinada temperatura (Efeito Memória de Forma - EMF). Além disso, essas LMF apresentam o fenômeno de superelasticidade (SE) em determinada faixa de temperatura, ou seja, podem sofrer grandes deformações e, após a retirada do esforço mecânico, recuperar a forma original sem que ocorra deformação plástica ou falha do material [1].

O EMF está associado a uma transformação martensítica termoelástica cristalograficamente reversível induzida por temperatura. Neste caso, a LMF, em sua estrutura martensítica, pode ser facilmente deformada de maneira pseudo plástica. Porém, quando aquecida à determinada temperatura, pode reverter sua estrutura martensítica para austenita e recuperar a sua forma original, caracterizando o chamado EMF. As temperaturas em que as LMF alteram sua estrutura cristalina de maneira reversível são características de cada tipo de liga metálica, de acordo com os elementos que a compõe [2].

O fenômeno de SE, de maneira semelhante, também está associado a uma transformação martensítica termoelástica

\*Email: magnasilmara@hotmail.com (M. S. O. Araújo)

cristalograficamente reversível, porém induzida por carregamento mecânico (tensão) a partir da fase de mais alta temperatura (austenita). Neste caso, o material recupera sua forma após a retirada da carga, sem a necessidade de aquecimento, estando associada à reversão da estrutura martensítica induzida por tensão mecânica a partir da austenita [2].

Dentre as LMF existentes, a mais desenvolvida e utilizada é a liga de Níquel-Titânio (Ni-Ti), 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 metálico biocompatível e de boa resistência à corrosão [3].

Na maioria das aplicações destes tipos de ligas, 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 funcionais da liga, dentre elas o EMF e a SE, e fadiga estrutural, associada aos danos microestruturais do material e número de ciclos até a falha [4,5].

Na literatura encontram-se diversos trabalhos referentes ao estudo da vida em fadiga de elementos e instrumentos de LMF, principalmente em ligas Ni-Ti, sob diferentes condições de ensaios [6-11]. No entanto, existem poucos trabalhos que avaliam o comportamento em fadiga de LMF em modo de flexão simples alternada (*single cantilever*), principalmente utilizando equipamento de Análise Dinâmica Mecânica (DMA - *Dynamic Mechanical Analysis*) [12, 13].

Com o uso 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. Assim, quando se trata de ensaios realizados em corpos de prova com pequenas seções transversais, podem-se obter resultados muito mais precisos e confiáveis em comparação com máquinas de teste padrão. Entretanto, a experiência de utilização de equipamentos não padrão para testes de fadiga é relativamente pequena, apontando a necessidade de uma melhor compreensão sobre o assunto [14].

Diante disso, o presente trabalho visa um maior entendimento do comportamento sob fadiga de fios de LMF Ni-Ti em estado austenítico, com seção transversal circular e retangular em modo de flexão simples alternada (*single cantilever*), utilizando um equipamento de DMA.

## 2. Materiais e Métodos

Foram utilizados fios de Ni-Ti provenientes de arcos ortodônticos superelásticos, de seção transversal circular (0,5mm de diâmetro) e retangular (0,55 x 0,40mm), no estado como recebidos. Estes arcos são distribuídos em mercado nacional pela empresa Dental Morelli (São Paulo, SP).

Os corpos de prova (CP) foram extraídos das regiões retilíneas dos arcos ortodônticos, com o objetivo de minimizar

interferências da curvatura nos resultados. Cada arco ortodôntico gerou dois CP's, com aproximadamente 30 mm de comprimento cada um. Esta forma de obtenção de CP's também foi utilizada por Ramos, 2012 [15].

### 2.1. Caracterização Pré-fadiga

#### 2.1.1. Análise de Superfície: Microscopia Eletrônica de Varredura

A observação da qualidade superficial dos fios LMF Ni-Ti (como recebidos) foi realizada através de 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.

#### 2.1.2. Análise Térmica via Calorimetria Diferencial de Varredura

Quando se trabalha com LMF é de fundamental importância conhecer as temperaturas de transformação de fase, uma vez que estas temperaturas influenciam o comportamento termomecânico das mesmas.

Para obtenção das temperaturas e entalpias de transformação dos fios LMF Ni-Ti foi utilizada a técnica de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC - *Differential Scanning Calorimetry*). Esta técnica permite medir a quantidade de calor absorvido ou liberado 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.

#### 2.1.3. 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. Utilizou-se a máquina de ensaios eletrodinâmica Instron, modelo Electropuls E10000, equipada com uma célula de carga de 10 kN.

Neste caso, os ensaios foram realizados nos fios Ni-Ti com comprimento útil de aproximadamente 30 mm, no estado como recebidos, à temperatura ambiente de  $25 \pm 2$  °C segundo a norma ASTM F2516-14, que trata dos testes de tração em fios de LMF superelásticas. 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. No presente trabalho foi utilizada a taxa de 1,2 mm/min para o primeiro

ciclo, seguido pelo segundo ciclo até a ruptura com taxa mais rápida, de 12 mm/min.

## 2.2. Fadiga Mecânica

Uma vez que a análise usando 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 Ni-Ti. Os testes de fadiga foram realizados utilizando um DMA modelo Q800, da marca TA Instruments, no modo flexão simples alternada em viga simplesmente engastada (*Single Cantilever*). Nesta modalidade uma das extremidades do fio Ni-Ti permanece fixa (engastada) e a outra móvel.

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

Através 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, foram construídas curvas 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 Ni-Ti. 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.

## 2.3. Caracterização Pós-fadiga

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

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Caracterização Pré-fadiga

#### 3.1.1. Análise de Superfície: Microscopia Eletrônica de Varredura

As superfícies dos fios Ni-Ti superelásticos, de seção transversal circular e retangular, no estado como recebidos, foram analisadas via MEV quanto ao acabamento superficial, com aumentos de 200x e 3000x. As imagens obtidas estão apresentadas nas Figuras 1 e 2. Foi observada a presença de ranhuras, principalmente com orientação longitudinal, e pequenos poros em ambos os fios Ni-Ti, com maior incidência nos fios com seção transversal retangular. Tais defeitos superficiais podem ser oriundos do processo de fabricação por trefilação dos fios, podendo afetar a vida em fadiga dos mesmos, diminuindo o número de ciclos até a ruptura.

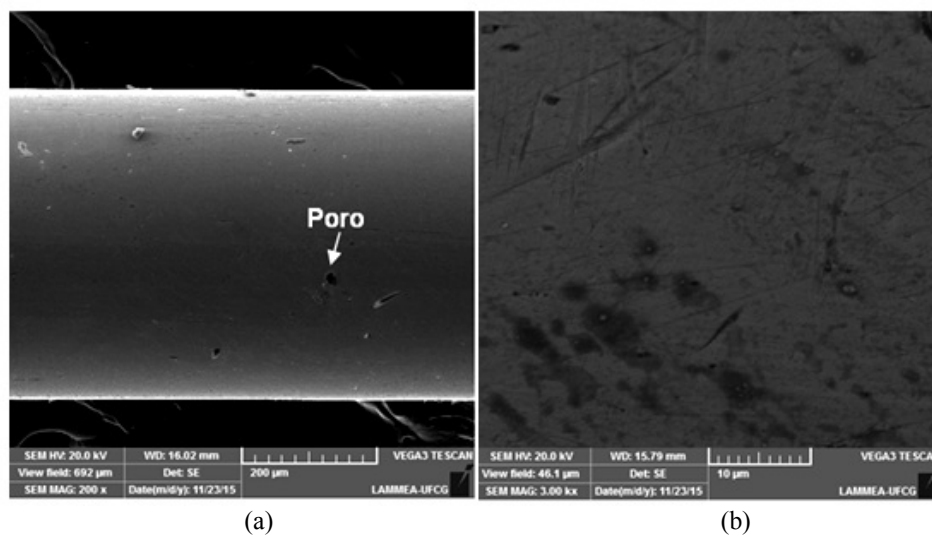


Figura 1. Imagens obtidas por MEV do fio Ni-Ti superelástico com seção transversal circular. (a) Aumento de 200x. (b) Aumento de 3000x

#### 3.1.2. Análise Térmica via Calorimetria Diferencial de Varredura

Nesta etapa, foram realizados ciclos térmicos nos fios Ni-Ti novos, monitorando a variação do fluxo de calor em função da temperatura. A partir das curvas de DSC obtidas 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  $A_p$ . Além das temperaturas de transformação de fase, foram obtidos os valores de histerese térmica ( $H_t$ ) e das entalpias de transformação ( $\Delta H$ ) para todos

os casos estudados. Estes resultados podem ser visualizados na Figura 3 e Tabela 1.

Tabela 1. Valores obtidos de histerese térmica e entalpias de transformação dos fios Ni-Ti

Fios Ni-Ti	$\Delta H(J/g)$		Ht (°C) ( $A_p-R_p$ )
	Resfriamento	Aquecimento	
Seção Circular	2,5	1,7	5,2
Seção Retangular	3,1	3,0	4,6

Observa-se que os fios Ni-Ti, tanto de seção transversal circular como retangular, apresentam os picos característicos da transformação martensítica direta (resfriamento) e reversa (aquecimento). Além disso, verifica-se que os mesmos apresentam a fase austenita estável a partir de aproximadamente 25,1°C para o fio de seção transversal circular e 30,5 °C para o fio de seção transversal retangular. 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.

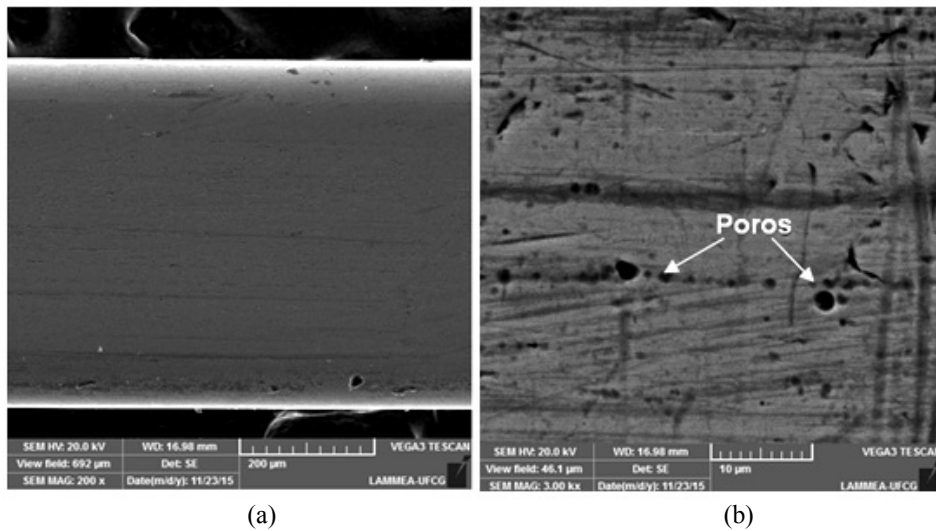


Figura 2. Imagens obtida por MEV do fio Ni-Ti superelástico com seção transversal retangular. (a) Aumento de 200x. (b) Aumento de 3000x

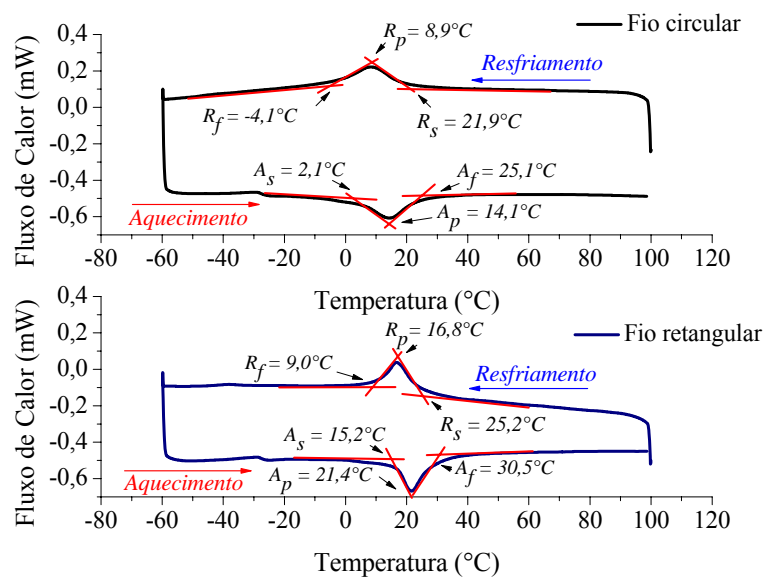


Figura 3. Análise térmica DSC dos fios Ni-Ti superelásticos

De acordo com a Tabela 1, verifica-se que ambos os fios apresentaram histerese térmica estreita, limitada a  $5,2^{\circ}\text{C}$  para o fio de seção circular e  $4,6^{\circ}\text{C}$  para o fio de seção retangular. Os valores reduzidos de histerese térmica e das entalpias de transformação indicam que as transformações de fase observadas 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 [1,16].

### 3.1.3. Resistência Mecânica: Ensaios 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 Ni-Ti foram submetidos a ensaios de tração quase estáticos baseados na norma ASTM F2516-14. As curvas tensão-deformação obtidas podem ser observadas na Figura 4. Estas curvas apresentam três regiões distintas, correspondentes a diferentes estágios do material até a ruptura:

Região I: os fios Ni-Ti, no estado austenítico, apresentam uma deformação elástica praticamente linear até aproximadamente 2%. Nesse estágio, ao cessar o carregamento mecânico, os fios retornam 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, os fios voltarão 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 [17, 18];

Região III: nessa última região os fios apresentam 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.

De uma maneira global, não se observa na Figura 4 qualquer anomalia nas curvas de superelasticidade que possam ser associadas a deformação oriundas da fase R, conforme observado algumas vezes na literatura [1].

Foi constatado que ambos os fios Ni-Ti superelásticos, de seção transversal circular e retangular, apresentaram 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% [19].

Adicionalmente, verifica-se que após a deformação superelástica inicial de 6%, seguida de descarregamento mecânico, o fio de seção transversal retangular apresentou uma pequena deformação residual, relativamente maior que o fio de seção circular, porém inferior a 0,4%. Isto ocorre devido ao fato da temperatura de transformação  $A_f$  dos fios estarem próximas da temperatura de ensaio, que é da ordem de  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$  (enquanto  $A_f$  é de  $25,1^{\circ}\text{C}$  para o fio de seção circular e de  $30,5^{\circ}\text{C}$  para o fio de seção retangular). Assim sendo, pode existir alguma fração de martensita mínima (fase R, nesse caso) nos fios, originando alguma deformação residual.

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 uma fadiga de alto ciclo.

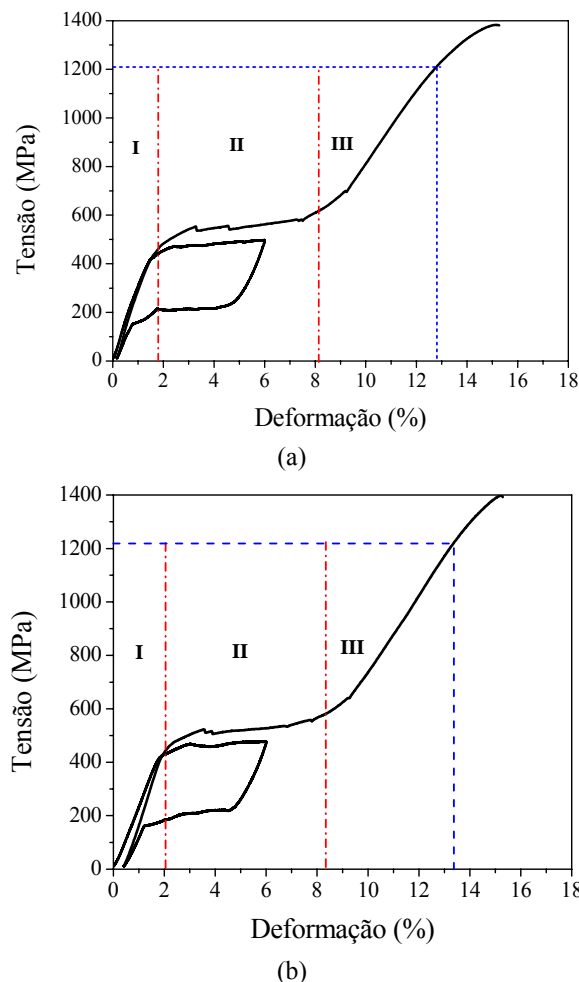
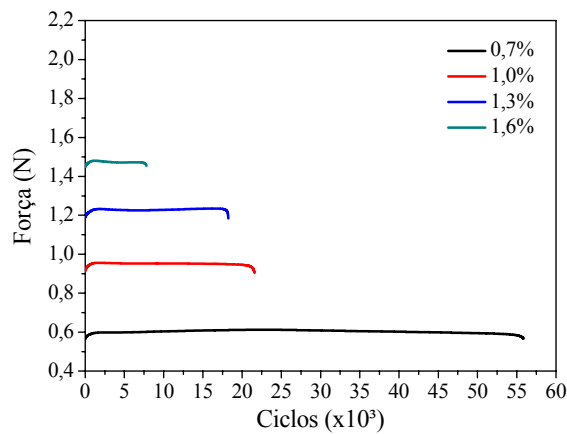


Figura 4. Curvas tensão-deformação dos fios Ni-Ti superelásticos. (a) Seção transversal circular. (b) Seção transversal retangular

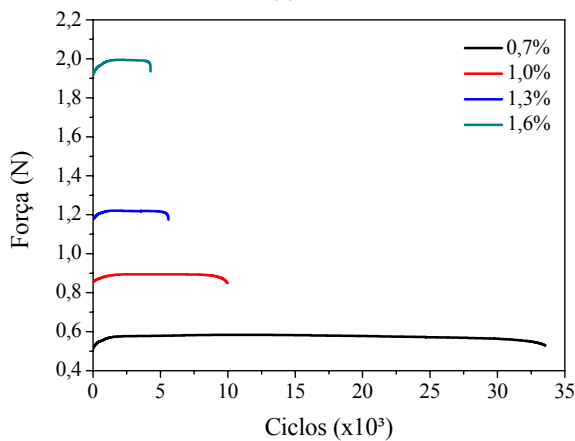
### 3.2. Fadiga Mecânica

A fadiga funcional dos fios Ni-Ti 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 Figura 5.

De uma forma geral, observa-se que a força aumenta aproximadamente 5% durante os primeiros ciclos, devido ao processo de encruamento (endurecimento) gerado pelo acúmulo de defeitos durante a ciclagem mecânica. Em seguida, essa força se estabiliza e permanece praticamente constante até iniciar um decaimento indicativo do início do processo de ruptura cíclica. Além disso, verifica-se, em ambos os fios, que o nível do patamar de força aumenta à medida que a amplitude de deformação imposta nos ensaios aumenta.



(a)



(b)

Figura 5. Evolução do comportamento dos fios Ni-Ti superelásticos para os ensaios de fadiga com frequência de 1Hz e amplitudes de 0,7; 1,0; 1,3 e 1,6%. (a) Seção transversal circular. (b) Seção transversal retangular

A força necessária para gerar uma mesma deformação é ligeiramente maior nos fios de seção circular em comparação

com os fios de seção retangular, exceto no caso da amplitude de deformação de 1,6%, para o qual a força é de aproximadamente 2N para os fios de seção retangular, enquanto que nos fios de seção circular é de aproximadamente 1,5N.

A partir dos dados obtidos nos ensaios cíclicos no DMA foram traçadas curvas de Wöhler para os fios Ni-Ti de seção circular e retangular, 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 Figura 6. Verifica-se que os fios de seção transversal circular apresentaram maior vida em fadiga estrutural em comparação com os fios de seção transversal retangular. Para uma amplitude de deformação de 1,0%, por exemplo, o fio com seção circular apresentou números de ciclos até a ruptura de aproximadamente 22000 ciclos, enquanto o fio de seção retangular, para esta mesma amplitude de deformação, suportou aproximadamente 10000 ciclos. Esta diferença ocorre provavelmente em virtude do fio de seção retangular apresentar uma maior quantidade de defeitos superficiais (ranhuras e poros), conforme evidenciado nas análises de MEV (Figuras 1 e 2), além de cantos, que mesmo ligeiramente arredondados, podem atuar como concentradores de tensão.

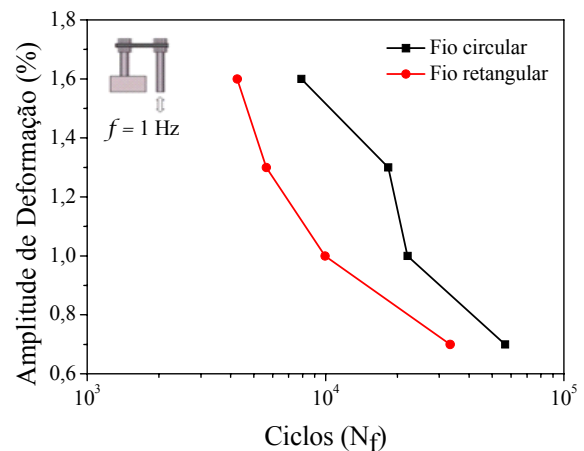


Figura 6. Curvas de Wöhler para amplitudes de 0,7; 1,0; 1,3 e 1,6% e frequência fixa de 1Hz

Adicionalmente, é possível também observar, em ambos os fios, a influência direta da amplitude de deformação imposta nos ensaios, já que quanto maior a amplitude de deformação menor é o número de ciclos até a fratura ( $N_f$ ). Os fios Ni-Ti 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, para ambos os fios Ni-Ti, constatou-se um fenômeno de fadiga de baixo ciclo ( $10^3 < N_f < 10^5$ ), contrariamente ao que se poderia esperar pelo fato das solicitações mecânicas não terem ultrapassado o limite de 2% de deformação (limite elástico, Figura 4).

### 3.3. Caracterização Pós-fadiga

Após serem solicitadas mecanicamente até a ruptura em diferentes amplitudes de deformação, as superfícies de fratura dos fios de LMF Ni-Ti foram analisados 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 Figuras 7 e 8 para os três maiores níveis de deformação.

De uma maneira geral, as superfícies de fratura, tanto dos fios de seção circular quanto os de seção retangular submetidos ao ensaio de fadiga no DMA 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. Além disso, observando as imagens com ampliação de 1000x, nota-se que o aspecto das superfícies dos fios, de geral, revela uma mistura de fratura frágil e dúctil, revelando um aspecto escavado (*dimples*) em algumas regiões e uma superfície mais lisa em outras.

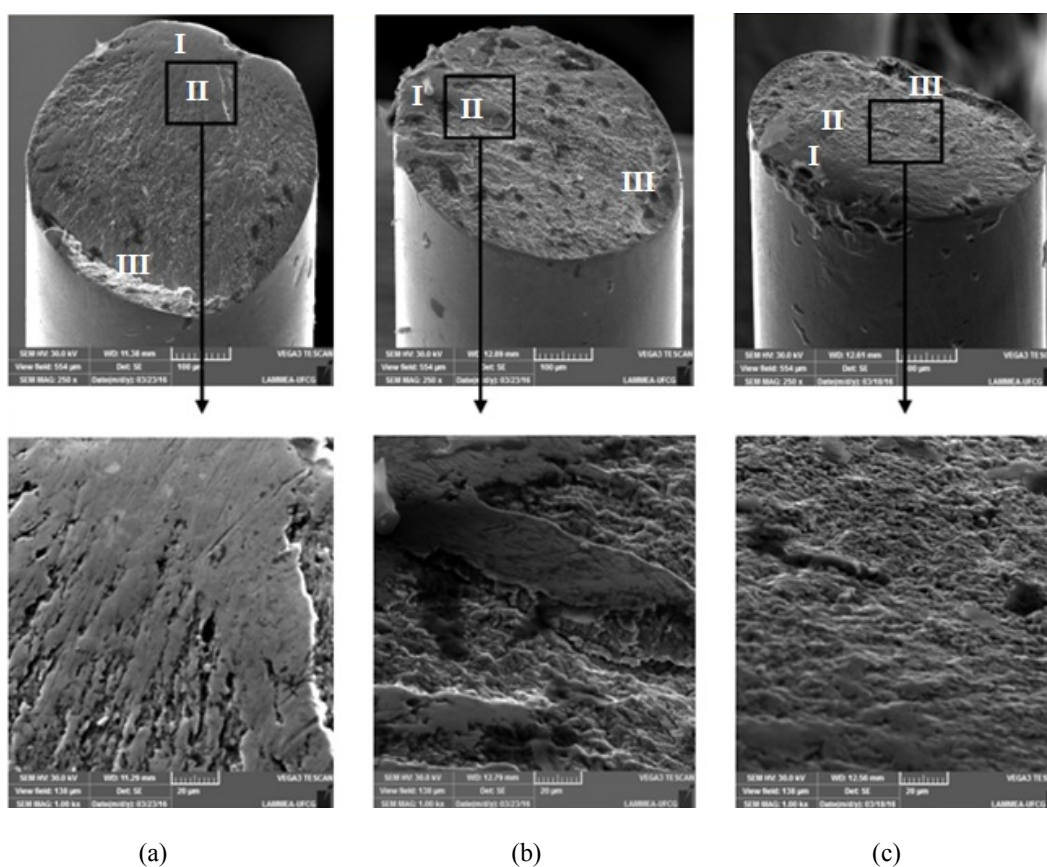


Figura 7. Detalhamento das superfícies de fratura dos fios Ni-Ti de seção transversal circular. Amplitude de deformação de (a) 1,0% (22080 ciclos); (b) 1,3% (18300 ciclos); (c) 1,6% (7920 ciclos)

Verifica-se ainda que as superfícies de fratura dos fios Ni-Ti com seção transversal retangular apresentam maior proporção de regiões características de fraturas frágeis em comparação com os fios de seção circular. Isto pode ocorrer devido ao tipo de geometria utilizada na ferramenta de trefilação dos fios retangulares, induzindo uma maior quantidade de discordâncias durante o processo de fabricação. Isto justifica, além de uma maior presença de poros e

ranhuras, uma conseqüente menor vida em fadiga para fios Ni-Ti com seção retangular.

Observa-se que apesar das vidas em fadiga serem diferentes para os fios Ni-Ti com seções transversais distintas e 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.

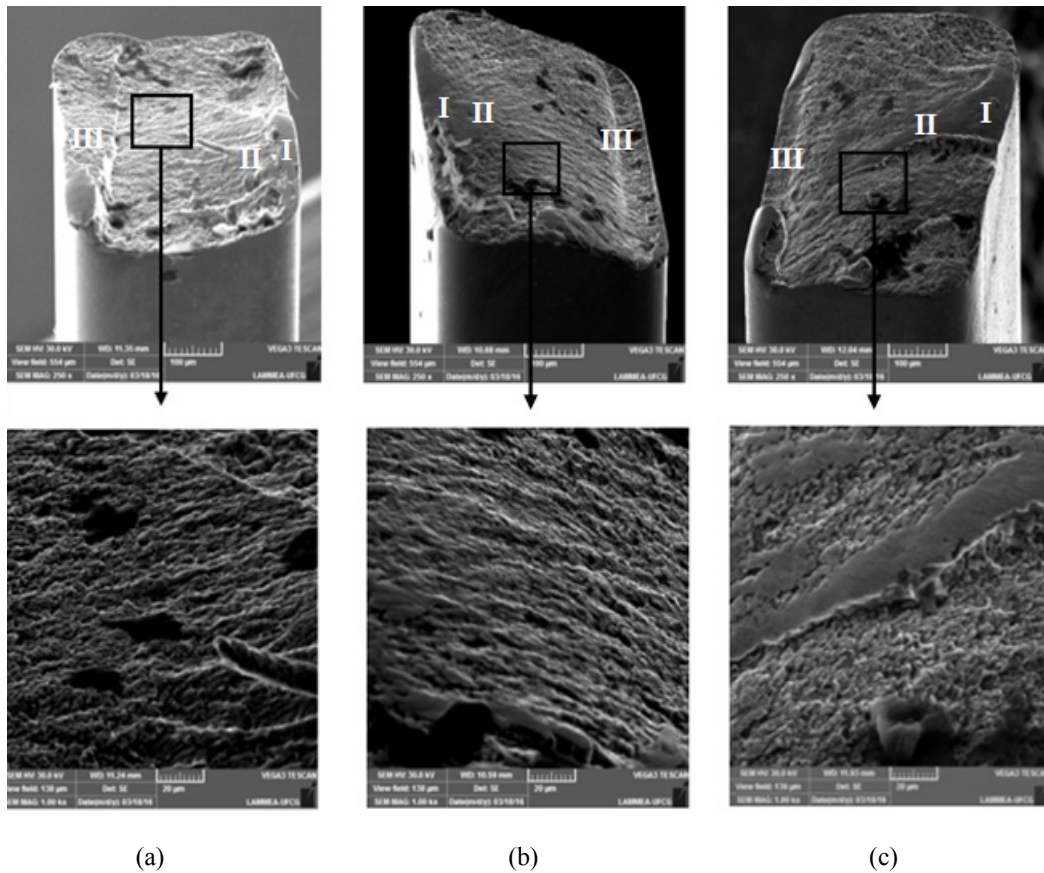


Figura 8. Detalhamento das superfícies de fratura dos fios Ni-Ti de seção transversal retangular. Amplitude de deformação de (a) 1,0% (9960 ciclos); (b) 1,3% (5640 ciclos); (c) 1,6% (6480 ciclos)

#### 4. Conclusões

Neste trabalho foram estudados fios de LMF Ni-Ti de seções circular e retangular 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 temperatura de transformação medidos usando DSC, permitiram comprovar o regime de superelasticidade dos fios de Ni-Ti a 35°C (temperatura do ensaio de fadiga);

A partir dos ensaios cíclicos, foi possível constatar que fatores como a amplitude de deformação e a seção transversal dos fios, influenciam diretamente a vida em fadiga de fios Ni-Ti em regime de ciclagem mecânica utilizando DMA. À medida que a amplitude de deformação aumenta, há uma diminuição na vida em fadiga tanto nos fios com seção transversal circular quanto com seção retangular;

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 %)

em ambos os fios, devido a um fenômeno de endurecimento causado pelo 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;

No geral, os fios Ni-Ti de seção transversal circular (0,5 mm) apresentaram maior vida em fadiga que os fios de seção retangular (0,40 x 0,55 mm). Para níveis de amplitude de deformação entre 0,7% e 1,6%, em ambas as seções transversais, a vida em fadiga ficou situada entre 103e 105 ciclos, caracterizando uma fadiga de baixo ciclo.

#### 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).



**Referências**

- [1] Otsuka, K., Wayman, C. M. Shape memory materials. Cambridge University Press, 1998..
- [2] Lagoudas, D. C. Shape memory alloys: modeling and engineering applications. Texas: Springer, 2008.
- [3] Yahia, L'H. Shape memory implants. Springer Verlag, 2011. ISBN 9783642597688.
- [4] Van Humbeeck, J., Stalmans, R. Characteristics of shape memory alloys, In: Otsuka, K., Wayman, C. M. Shape memory materials. (Ed.). United Kingdom: Cambridge University Press, 1998. p. 149-183.
- [5] Eggeler, G., Hornbogen, E., Yawny, A., Heckmann, A., Wagner, M. Structural and functional fatigue of Ni-Ti shape memory alloys. Materials Science and Engineering A, 378, 24-33, 2004.
- [6] Figueiredo, A. M. G., Modenesi, P. J., Buono, V. T. L. Curvas de vida em fadiga de baixo ciclo de ligas superelásticas de Ni-Ti. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, 3 (2), 55-59, 2006
- [7] Nespoli, A., Villa, E., Passaretti, F. Functional properties and morphology of Ni-Ti articulated actuation elements during thermo-mechanical cyclic tests. Metals and Materials International, 21 (3), 504-510, 2015.
- [8] Saikrishna, C. N., Ramaiah, K. V., Vidyashankar, B., Bhaumik, S. K. Functional fatigue in Ni-Ti shape memory alloy wires – a comparative study. National Conference on Smart Materials Structures and Systems, Coimbatore, Índia, 2012.
- [9] Chluba, C., Ge, W., Miranda, R. L., Strobel, J., Kienle, L., Quandt, E., Wuttig, M. Ultralow-fatigue shape memory alloy films. Science, 348 (6238), 1004-1007, 2015.
- [10] Kang, G., Song, D. Review on structural fatigue of Ni-Ti shape memory alloys: pure mechanical and thermo-mechanical ones. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 5 (6), 245-254, 2015.
- [11] Lin, Z., Pike, K., Schlun, M., Zipse, A., Draper, J. Ni-Tinol fatigue life for variable strain amplitude fatigue. Journal of Materials Engineering and Performance, 21 (12), 2012.
- [12] 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.
- [13] Roy, D., Buravalla, V. Mangalgi, P. D. Allegavi, S. Ramamurty, U. Mechanical characterization of Ni-Ti SMA wires using a dynamic mechanical analyzer. Materials Science and Engineering A, 494, 429-435, 2008.
- [14] Araújo, S. S. Comportamento Dinâmico e Fadiga Termomecânica de atuadores de ligas CuAlNi com memória de forma. 2015. 116f. [Dissertação de Mestrado] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.
- [15] Ramos, A. D. O. Fadiga funcional e estrutural de fios de ligas Ni-Ti com memória de forma em regime superelástico. 2012. 106f. [Dissertação de Mestrado] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- [16] Grassi, E. N. D. Comportamento termomecânico de minimolas superelásticas de Ni-Ti: influência de tratamentos térmicos. 2014. 115f. [Dissertação de Mestrado] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- [17] 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.
- [18] Fercec, J., Anzel, I., Rudolf, R. Stress dependent electrical resistivity of orthodontic wire from the shape memory alloy Ni-Ti. Materials & Design, 55, 699-706, 2014.
- [19] Callister, W. D. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. LTC Editora S.A, 5ª Edição, 2000.