

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

FADIGA DE FIOS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti DE SEÇÃO QUADRADA EM REGIME DE SUPERELASTICIDADE

Allysson Daniel de Oliveira Ramos, allyssondaniel@hotmail.com¹

Henrique Martinni Ramos de Oliveira, henriquemartinni@hotmail.com²

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br³

Estephania Nobre Dantas Grassi, end.grassi@hotmail.com⁴

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br⁵

¹Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 882, Campina Grande - PB, CEP: 58429-140, Brasil.

Resumo: Ligas com memória de forma (LMF) do sistema Ni-Ti, que podem trabalhar em regime superelástico, tem sido empregadas em vários setores, abrangendo áreas como a medicina, a odontologia e as engenharias. Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento de fios desses materiais especiais quando submetidos a tensões mecânicas cíclicas (fadiga). Neste sentido, foram realizados testes de tração mecânica cíclicas com controle de carga, a fim de avaliar a evolução das propriedades funcionais e a vida em fadiga de fios de LMF Ni-Ti de seção transversal quadrada, com 0,4 mm de lado, em regime superelástico. Os parâmetros funcionais (energia dissipada, tensões de transformação, deformação acumulada e deformação superelástica) foram determinados com base no valor de pico do esforço de tração mecânica, que variou entre 500 MPa e 800 MPa, numa frequência fixada em 1 Hz. Verificou-se que as propriedades funcionais do fio Ni-Ti de seção quadrada são afetadas pelo nível de tensão de tração aplicada nos ensaios. Para tensões superiores ao limite elástico linear (700 MPa e 800 MPa), verificou-se que as tensões de transformação de fase, a deformação superelástica (ϵ_{SE}) e a energia dissipada (E_D) diminuem com o aumento dos picos de tensão máxima, ao passo que a deformação acumulada (ϵ_p) aumenta. Por meio da curva de Wohler obtida, constatou-se que a vida em fadiga do fio diminui com o aumento da tensão máxima aplicada, atingindo valores situados entre 3×10^3 e 1×10^4 ciclos, caracterizando uma fadiga de baixo ciclo.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma, Ligas Ni-Ti, Superelasticidade, Fadiga Funcional, Fadiga Estrutural, Controle de Tensão.

1. INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) são materiais considerados ativos ou inteligentes que possuem a capacidade de recuperar grandes deformações (superiores a 1 %), retornando a forma anterior ao carregamento quando o mesmo for cessado, ou por aquecimento. Quando a recuperação de uma pseudo deformação residual dá-se por aquecimento, o fenômeno é denominado de Efeito Memória de Forma (EMF). Nesse caso, uma deformação imposta ao material numa fase cristalográfica de baixa temperatura e rigidez (martensita) é totalmente recuperada por meio de simples aquecimento até uma fase de mais alta temperatura e maior rigidez (austenita), voltando ao seu estado inicial. Quando a recuperação da deformação imposta ocorre a temperatura constante apenas com a retirada da força aplicada inicialmente na fase austenita, o fenômeno é denominado de Superelasticidade (SE) (Otsuka e Wayman, 1998; Lagoudas, 2008). Esse fenômeno de SE ter origem na formação e reversão de martensita induzida por tensão e se caracteriza também pela dissipação de energia presente em cada ciclo mecânico de carregamento e descarregamento, devido às irreversibilidades nesse ciclo que ocasionam um comportamento histerético (Otsuka e Wayman, 1998). As duas propriedades funcionais de EMF e SE estão ligadas a transformações martensíticas adifusionais. A cristalografia da fase matriz (austenita), condições de tratamento térmico, a composição do material e o estado de tensão antes e durante a transformação são fatores que influenciam consideravelmente a transformação martensítica e consequentemente a morfologia da fase produto (martensita). Dentre as ligas metálicas que apresentam EMF e SE, destacam-se aquelas do sistema Ni-Ti aproximadamente equiatômico, que vêm sendo empregadas tecnologicamente, com sucesso, em áreas como a engenharia, medicina e odontologia.

O regime superelástico das LMF ocorre acima de uma temperatura de transformação de fase denominada temperatura final da transformação austenítica (A_f), significando que toda a estrutura do material se encontra inicialmente na fase cristalográfica conhecida por austenita. As aplicações do fenômeno da superelasticidade estão presentes em diversos elementos mecânicos como parafusos superelásticos (Travassos, 2010), arruelas Belleville (Pereira et al, 2011) além de dispositivos ortodônticos como micro-molas, stents e fios, onde a liberação da força durante o descarregamento ocorre de maneira mais constante e suave que outros materiais clássicos (Dos Reis, 2007). Além das aplicações em regime estático, a superelasticidade é desejável em regime dinâmico graças à capacidade de dissipação de energia em cada laço histerético de tensão-deformação-recuperação. Nesse contexto, inúmeros dispositivos utilizando LMF superelásticas como absorvedores de vibração e impactos vêm sendo desenvolvidos, conforme informado recentemente por De Aquino (2011).

Nos mais variados âmbitos da aplicação desses materiais, o comportamento em fadiga dos mesmos é fator preponderante no projeto e execução de dispositivos, como sensores e atuadores, que apresentam o fenômeno da Superelasticidade como principal característica. Sobretudo em aplicações cujo regime de trabalho é dinâmico, o estudo da vida em fadiga é primordial para garantir não somente as funções estruturais do material, mas também a funcionalidade do elemento ativo sob as condições de trabalho. Pode-se encontrar na literatura trabalhos à respeito da vida em fadiga de elementos de LMF de Ni-Ti em várias condições de ensaio, como estudos da vida em fadiga torcional em instrumentos endodônticos rotatórios de vários fabricantes, verificando a influência de design, acabamento superficial (Tripi et al, 2006; Larsen et al, 2009); influência de tratamentos térmicos na fadiga termomecânica (Li et al, 2009); comportamento cíclico a várias frequências e amplitudes sob controle de deformação (Branco et al, 2012); fadiga superelástica sob controle de tensão mecânica para diferentes razões de tensão ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) (Kang et al., 2012); e Propriedades de fadiga de uma liga de Ni-Ti pseudoelástica: deformação *ratcheting* e histerese sob carregamento cíclico de tração (Maletta et al, 2014).

Em LMF, é possível classificar o estudo de fadiga em dois tipos: fadiga funcional e fadiga estrutural. A fadiga funcional nesses materiais pode ser entendida como o número de ciclos a partir do qual o material apresenta a degradação de suas propriedades associadas ao EMF e SE, afetando a funcionalidade global do sistema no qual está inserido. Já a fadiga estrutural, é um processo convencional de fadiga associados aos danos microestruturais acumulados durante a carga cíclica (Eggeler et al. 2004), levando a uma possível falha do material ou componente por fratura. Como exemplo da fadiga funcional pode-se mencionar uma diminuição na deformação recuperável medida como a deformação do efeito de SE. Na superelasticidade, este tipo de fadiga é considerada como o número máximo de ciclos onde assegura-se que a funcionalidade da LMF superelástica não seja comprometida, podendo ser determinada pela variação da deformação do efeito superelástico e da energia dissipada (E_D) (Kang et al, 2012). Esta, por sua vez, pode ser observada como a histerese mecânica no comportamento tensão vs. deformação e que diminui à medida que o número de ciclos aumenta, estabilizando com a evolução dos ciclos. Além disso, o aumento da deformação acumulada (ϵ_p) e a variação das tensões de transformação de fase são também caracterizados como um efeito de fadiga funcional em LMF, pois comprometem o seu pleno funcionamento. A vida de fadiga estrutural de LMF é avaliada da mesma forma que para os materiais clássicos de engenharia, correspondendo ao número de ciclos no qual ocorre a ruptura, sob um determinado nível de tensão mecânica, geralmente mais baixa do que a tensão máxima no material em um teste de tração quase-estático. Além do número de ciclos, a vida em fadiga estrutural depende de muitos outros fatores, tais como: o nível de tensão aplicada, acabamento da superfície, a presença de concentradores de tensão, entre outros (De Souza, 2005). No caso particular de LMF superelásticas, a vida em fadiga estrutural é também influenciada pela acumulação de deformação devido à aplicação de amplitudes de tensão constante (Kang et al, 2012).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento em fadiga de fios superelásticos de uma LMF Ni-Ti com seção transversal quadrada, sob carregamento cíclico em ensaios de tração dinâmicos com controle de tensão. Ênfase é dada as fadigas funcional e estrutural, investigando a influência da tensão máxima aplicada no material, para uma frequência de ensaio constante em 1 Hz.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os fios de LMF Ni-Ti de seção transversal quadrada, com 0,40 mm de lado, usados neste trabalho, foram obtidos a partir das regiões retilíneas de arcos ortodônticos da marca nacional Dental Morelli (São Paulo – SP). Os testes de fadiga em tração foram realizados em uma máquina de ensaios eletrodinâmica da marca Instron, modelo Electropuls E10000 com valores de tensão máxima pré-definidos e numa frequência de oscilação fixada em 1 Hz. Na Fig. 1 é possível visualizar uma sequência de imagens correspondente a obtenção dos fios LMF Ni-Ti (a), a máquina de fadiga Electropuls E10000 (b) e as garras utilizadas (c).

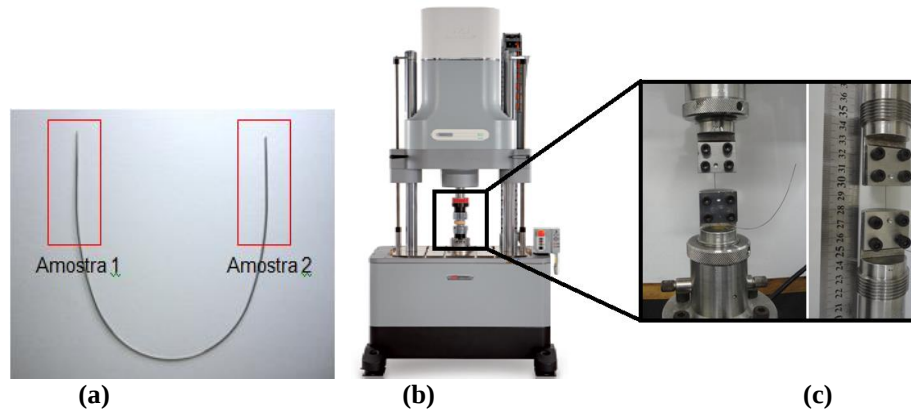


Figura 1. Sequência fotográfica ilustrativa dos testes de superelasticidade em um fio LMF de Ni-Ti. (a) Arco ortodôntico de Ni-Ti superelástico, de 0,40 mm de lado. (b) Máquina de ensaios Instron Electropuls E10000. (c) Detalhe do fio de Ni-Ti pronto para realização dos ensaios de fadiga.

Um ensaio quase estático de tração foi realizado em um fio Ni-Ti para determinar os níveis de tensão mecânica a serem usados no estudo da vida em fadiga. A frequência de ciclagem foi fixada em 1Hz para cada valor de tensão máxima. Este valor de frequência de ciclagem foi selecionado por permitir a dissipação do calor latente gerado no fio Ni-Ti devido às transformações de fase direta e reversa, não acarretando no seu auto aquecimento e consequente enrijecimento do material devido a um eventual aumento de sua temperatura (De Oliveira et al, 2012).

A partir do ensaio de tração simples foram escolhidos quatro valores de tensão para abranger as três situações em que uma LMF superelástica pode ser encontrada: fase austenítica (regime elástico); uma mistura das duas fases, durante a formação da fase martensítica induzida por tensão (regime superelástico parcial); e fase martensítica induzida por tensão (regime superelástico completo). Além disso, para cada nível de pico de tensão mecânica foram realizados quatro ensaios, de modo a permitir uma análise estatística mínima.

Seguindo a função do tipo 2ⁿ ciclos (1^o ciclo, 2^o, 4^o, 8^o, 16^o, 32^o, 64^o, ...), os comportamentos tensão-deformação foram avaliados possibilitando a análise da fadiga funcional do fenômeno da superelasticidade. Os parâmetros estudados para avaliar este tipo de fadiga foram: a variação da energia dissipada por unidade de volume (E_D , em MJ/m³), calculada aplicando a Eq. (1), que corresponde a integral fechada da curva tensão-deformação (Kang et al, 2012), equivalente à área contida em cada laço de histerese; a deformação acumulada (ϵ_p), resultante do acúmulo de tensões internas causadas pela introdução de defeitos durante a ciclagem mecânica, e ainda a deformação superelástica (ϵ_{SE}), do primeiro ao último laço superelástico em cada condição de carregamento.

$$E_d = \oint \sigma d\epsilon \quad (1)$$

Na Fig. 2 é mostrado o comportamento tensão-deformação esquemático a partir do qual os parâmetros funcionais acompanhados em função do número de ciclos são avaliados.

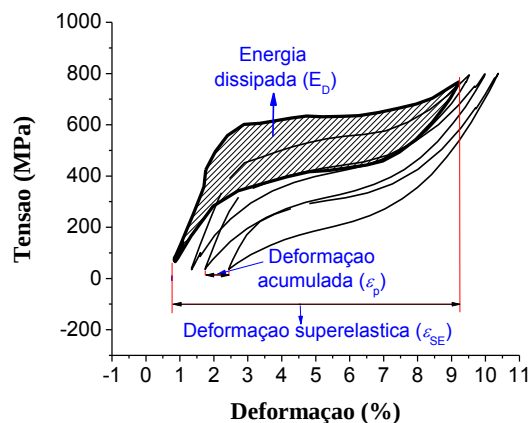


Figura 2. Esquema representativo do comportamento superelástico em fadiga para os n ciclos de deformação até a ruptura.

Para a determinação da variação das tensões de transformação (σ_{Ms} , σ_{Mf} , σ_{As} e σ_{Af}) utilizou-se o método das tangentes nas curvas tensão – deformação. Nesse método são traçadas retas a partir dos pontos de início e fim das regiões de transformação de fase induzida por tensão, conforme ilustrado na Fig. 3. As tensões de transformação em cada ciclo superelástico para as várias condições de carregamento foram determinadas para posterior análise.

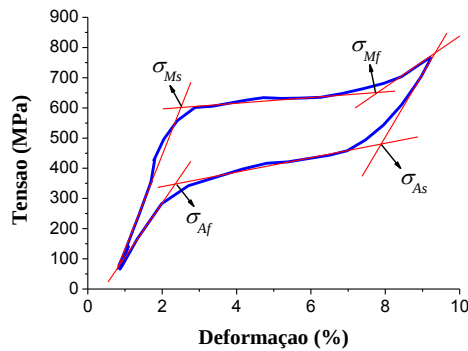


Figura 3. Esquema demonstrando o método das tangentes usado para determinação das tensões de transformação de fase no ciclo de deformação superelástica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização Pré-Fadiga

3.1.1 Temperaturas de Transformação

As temperaturas de transformação do fio de LMF Ni-Ti no estado como recebido (novo) e rompido no ensaio de tração monotônico, foram determinadas por calorimetria diferencial de varredura (DSC) e são mostradas na Fig. 4.

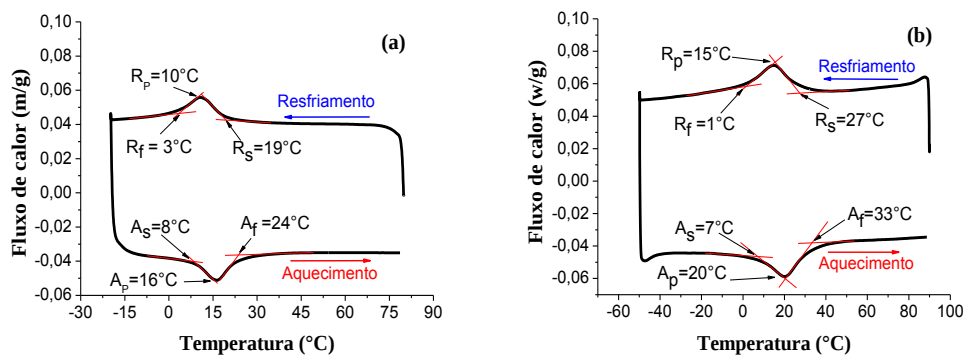


Figura 4. Temperaturas de transformação do fio de LMF Ni-Ti. (a) Estado como recebido (novo). (b) Rompido durante ensaio de tração monotônica.

Para determinar as características termomecânicas do fio Ni-Ti, realizou-se um ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) (Fig. 5). Este ensaio consiste em submeter uma amostra do material e uma amostra de referência, inerte, a uma variação de temperatura simultânea. O ensaio foi realizado variando a temperatura da amostra entre -70°C e $+100^{\circ}\text{C}$ a uma taxa de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Nota-se, que as temperaturas de transformação do fio Ni-Ti confirmam o seu estado austenítico à temperatura ambiente ($A_f = 24^{\circ}\text{C}$), indicando a presença de superelasticidade na temperatura ambiente. Além disso, uma comparação entre os resultados das Figs. 4(a) e 4(b) permitem constatar que as temperaturas de transformação aumentam em aproximadamente 5°C (tendo por base os picos de DSC) após o fio sofrer ruptura no ensaio de tração realizado de acordo com a norma ASTM F2516 (2008) (Fig. 6). Adicionalmente, considerando a reduzida histerese em temperatura ($A_p - R_p \sim 5^{\circ}\text{C}$) e a baixa energia de transformação (área abaixo dos picos), a literatura indica que a transformação de fase nesses fios Ni-Ti superelásticos ocorre da austenita para uma martensita romboédrica denominada de fase R (Otsuka & Wayman, 1998).

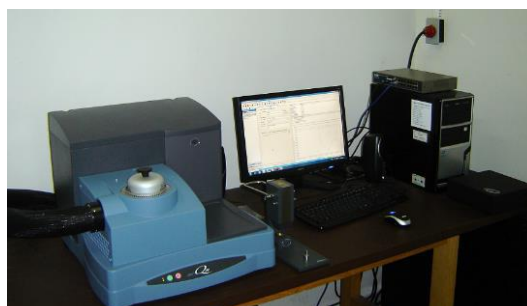


Figura 5. Equipamento DSC modelo Q20 da TA Instruments.

3.1.2 Ensaios Monotônicos de Tração

O comportamento tensão-deformação obtido do ensaio de tração quase estático realizado no fio de LMF Ni-Ti pode ser observado na Fig. 6. Este comportamento pode ser dividido em três regiões:

- Região I [0 a 500 MPa]: microestrutura 100% austenítica com presença de deformação elástica praticamente linear até aproximadamente 2%. Ao cessar o carregamento mecânico nesta região o fio Ni-Ti retorna ao ponto de deformação nula, percorrendo um caminho de tensão-deformação também linear;
- Região II [a partir de 500 MPa até 600 MPa]: a austenita começa a transformar-se em martensita induzida pelo campo de tensão mecânica. Durante a transformação de fase o fio de Ni-Ti se deforma até cerca de 6%, sem praticamente nenhum acréscimo de tensão. Ao cessar a carga nesta região tem-se o retorno ao ponto de deformação zero, seguindo um caminho elástico não-linear. É o fenômeno chamado de superelasticidade;
- Região III [600 a ~ 1110 MPa]: microestrutura 100% martensítica, induzida pela tensão aplicada, após a completa transformação de fase do fio Ni-Ti. Após 600 MPa a martensita induzida por tensão apresenta deformação elástica quase linear até cerca de 1100 MPa. A partir deste ponto a deformação passa a ser plástica, até a ruptura.

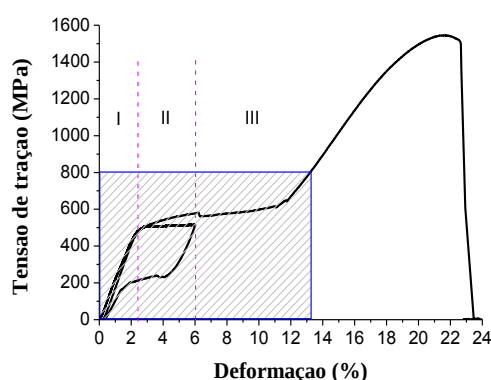


Figura 6. Curva tensão - deformação para o ensaio de tração quase estático no fio de LMF Ni-Ti.

A partir do teste monotônico até a ruptura, foram selecionados quatro níveis de tensão mecânica até a região de deformação elástica da martensita induzida (região circunscrita pelo retângulo hachurado) para a realização dos ensaios de fadiga: 500 e 600 MPa para o caso de transformação de fase parcial; e 700 e 800 MPa para o caso de transformação de fase completa.

3.2 Fadiga Funcional

Para avaliar a fadiga funcional do fio de LMF Ni-Ti, utilizou-se apenas os resultados dos corpos de prova rompidos com o número máximo de ciclos, para cada condição de teste. Os dados do número de ciclos até à falha estão resumidos na Tab. 1.

Tabela 1. Número de ciclos até a falha do fio de LMF Ni-Ti para cada condição de teste de fadiga.

Tensão / Frequência	800 MPa	700 MPa	600 MPa	500 MPa
1 Hz	T1 - 3567	T1 - 3357	T1 - 3671	T1 - 7165
	T2 - 4554	T2 - 4736	T2 - 4463	T2 - 6749
	T3 - 4934	T3 - 3794	T3 - 3611	T3 - 16588
	T4 - 3358	T4 - 5674	T4 - 5457	T4 - 10245
	Média - 4103	Média - 4390	Média - 4300	Média - 10186
	Dp - 24,057	Dp - 399,019	Dp - 547,196	Dp - 147,655

A partir da Fig. 7 observa-se a evolução do comportamento tensão - deformação em regime superelástico até a ruptura do fio Ni-Ti de seção quadrada, para a frequência de 1 Hz. As curvas são apresentadas na base da função 2^n para uma melhor visualização dos resultados, destacando o primeiro e o último ciclo dessa função antes da ruptura. Este conjunto de curvas permite evidenciar a evolução qualitativa do laço superelástico à medida que se acumulam os ciclos de deformação. Para essa análise, utilizaram-se apenas os resultados dos fios que romperam com o maior número de ciclos (Tab. 1).

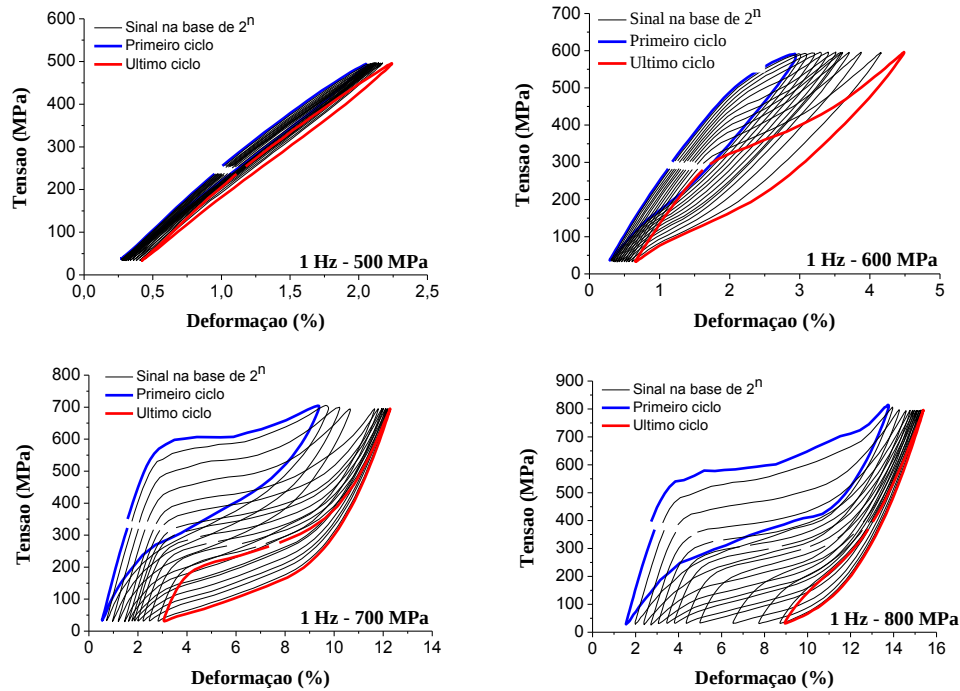


Figura 7. Evolução do comportamento superelástico do fio Ni-Ti de seção transversal quadrada para 1 Hz nas condições de ensaio estudadas (500, 600, 700 e 800 MPa).

A aplicação da Eq. (1) aos laços superelásticos da Fig. 7 levou a obtenção da Fig. 8, a qual permite observar a influência da amplitude de tensão superelástica sobre a evolução da energia dissipada para as condições de teste estudadas.

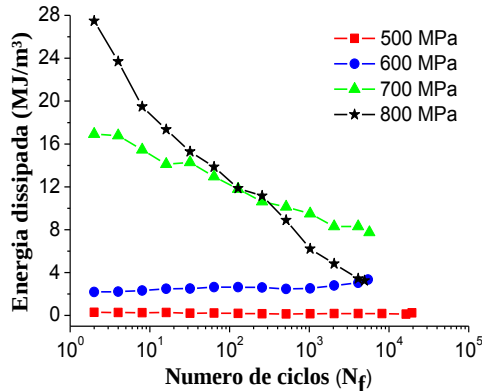


Figura 8. Energia dissipada em regime superelástico para as condições de tensão aplicadas ao fio Ni-Ti (500, 600, 700 e 800 MPa), na frequência de 1 Hz.

Para a tensão de 500 MPa, a capacidade de dissipar energia foi praticamente nula em virtude de tratar-se de uma região para a qual a transformação de fase ainda não ocorreu, ou ocorreu de forma muito limitada em alguma região do fio. Para a tensão de 600 MPa verificou-se um aumento da E_D nos primeiros ciclos até a estabilização. Observou-se nos ensaios dinâmicos realizados que este nível de tensão mecânica é inicialmente insuficiente para dar início à transformação de fase induzida por tensão. Com o aumento do número de ciclos e o consequente acúmulo de deformação plástica, cria-se um campo de tensões internas que ajuda a transformação de fase fazendo com que os fios passem a entrar em regime superelástico, aumentando a capacidade de dissipação de energia a cada ciclo, até a estabilização. Por outro lado, para as tensões de 700 e 800 MPa houve uma grande diminuição da E_D , atingindo valores, na tensão de 800 MPa, entre 28 MJ/m³ nos primeiros ciclos, até valores da ordem de 4 MJ/m³ logo antes da ruptura. Nestes níveis mais altos de tensão, a transformação de fase dá-se de forma completa desde o primeiro ciclo e, portanto, os maiores níveis de dissipação de energia são verificados no início da ciclagem. A rápida diminuição da capacidade de dissipar energia nos primeiros ciclos, por sua vez, é devida ao fenômeno da estabilização da resposta histerética do material. Durante esta estabilização ocorre a introdução de defeitos permanentes na microestrutura, criando um estado de tensão interna residual e com isso facilitando a formação das variantes martensíticas quando a LMF é tensionada.

(Lagoudas, 2008). Mecanicamente, isto significa que com a ciclagem serão necessários valores cada vez menores de energia para que a transformação de fase ocorra, até que um valor de saturação/estabilização seja atingido.

No primeiro ciclo, a quantidade de E_D depende diretamente do nível de tensão aplicado ao fio Ni-Ti e assim é esperado um aumento proporcional da capacidade de dissipar energia à medida que cresce o pico de tensão mecânica aplicado. A funcionalidade da LMF superelástica estudada se degradou bastante com a deformação cíclica para os níveis de tensão que proporcionaram já nos primeiros ciclos uma completa transformação de fase.

Na Fig. 9 observa-se a deformação acumulada pelo fio Ni-Ti até o momento da ruptura. O acúmulo de deformação plástica ocorre devido ao fato dos ensaios de tração cíclica serem realizados em controle de tensão. Esse acúmulo de deformação entre ciclos consecutivos é responsável pelo fenômeno de estabilização do comportamento superelástico e explica o comportamento da energia dissipada mostrado na Fig. 8.

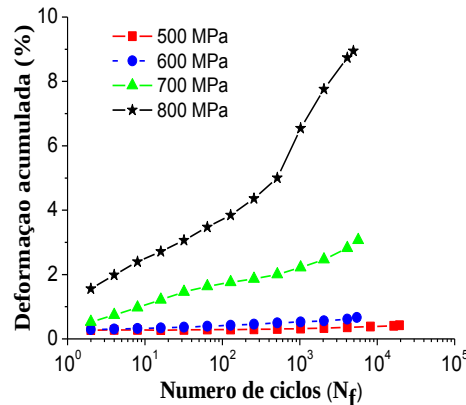


Figura 9. Deformação acumulada em regime superelástico para as condições de tensão aplicadas ao fio Ni-Ti (500, 600, 700 e 800 MPa) na frequência de 1Hz.

Fica evidente que a evolução da deformação nos primeiros ciclos é diretamente dependente do nível de tensão aplicado, ou seja, quanto maior a tensão de carregamento cíclico do ensaio, maior é a deformação acumulada até a estabilização dessa propriedade funcional. Portanto, para 500 MPa praticamente não foi observada nenhuma evolução da deformação acumulada. Para 600, 700 e 800 MPa observou-se um acúmulo gradativo, sendo tão maior quanto maior a tensão aplicada. Este acúmulo de deformação influencia a vida em fadiga estrutural dos fios, fazendo com que sofram ruptura mais cedo quando comparada com ensaios realizados nas mesmas condições, porém com controle de deformação (Kang et al, 2012), para o qual não há o acúmulo de deformação.

A evolução da deformação superelástica reversível no fio de LMF Ni-Ti submetido aos ensaios de tração cíclica pode ser verificada na Fig. 10.

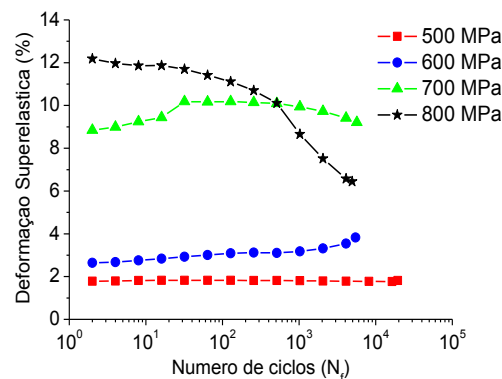


Figura 10. Deformação superelástica reversível para as condições de tensão aplicadas aos fios Ni-Ti (500, 600, 700 e 800 MPa) na frequência de 1Hz.

A redução da deformação superelástica (ε_{SE}) indica uma diminuição do laço superelástico, como mostrado na Fig. 2, causada pela introdução de defeitos na estrutura interna do material, em virtude dos vários ciclos mecânicos aos quais os fios Ni-Ti foram submetidos, fazendo com que alcancem uma estabilização na sua capacidade de recuperação da deformação, de forma semelhante a E_D .

Para 500 MPa, não foi observada praticamente nenhuma evolução desse parâmetro funcional, sendo praticamente inexistentes as alterações na ε_{SE} . Como mencionado anteriormente, trata-se de uma região de tensão para a qual a transformação de fase ainda não ocorre, ou ocorre de forma muito pontual.

Para a tensão de 600 MPa notou-se um aumento da ε_{SE} nos primeiros ciclos até a estabilização (entre 2 e 4%). De maneira similar ao ocorrido com a E_D , neste nível de tensão mecânica dá-se início à transformação de fase induzida por tensão, saindo da fase austenítica, de alta rigidez, para a fase martensítica, de baixa rigidez e melhor condição de

alcançar maiores deformações, ocorrendo posteriormente uma diminuição e estabilização dessa deformação recuperável com o aumento do número de ciclos.

Para os níveis de tensão mais altos utilizados nos ensaio de tração cíclica (700 e 800 MPa) foram constatadas as maiores deformações recuperáveis, pois a ciclagem controlada nesses níveis de tensão introduz defeitos representados por um acúmulo de deformação plástica mais severo, que aumenta ainda mais as tensões internas, as quais, somadas as tensões externas mais altas, leva sempre a uma degradação maior da ε_{SE} recuperada a cada ciclo. Na tensão mecânica de 700 MPa, observa-se nos primeiros ciclos um aumento da deformação recuperável, seguida de uma estabilização com a evolução dos ciclos mecânicos de carregamento. Este comportamento não ocorreu para a tensão de 800 MPa, para a qual uma importante redução da ε_{SE} nos primeiros ciclos se dá, tendendo a se estabilizar em valores situados próximos a 7 % de deformação superelástica reversível.

Na Fig. 11 são apresentadas as variações nas tensões de transformação (σ_T) dos fios Ni-Ti, quando submetidos a tensões cíclicas de tração de 700 (a) e 800 MPa (b). Ressalta-se que apenas a partir desses níveis de tensões mecânicas é que o fio Ni-Ti em estudo apresentou transformação completa de fase, ao contrário das tensões de 500 e 600 MPa, para as quais verifica-se transformação de fase apenas parcial. Essas alterações nas σ_{T_s} correspondem também a uma degradação da funcionalidade do material, vindo a contribuir para uma menor vida útil do fio.

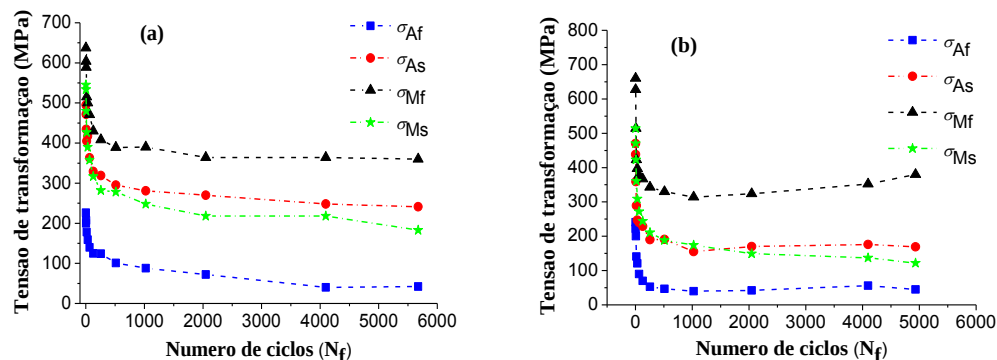


Figura 11. Evolução das tensões de transformação nos fios Ni-Ti. a) Amplitude de tensão superelástica de 700 MPa. b) Amplitude de tensão superelástica de 800 MPa.

Em situações de carregamento dinâmico, o comportamento termomecânico de LMF apresenta características específicas. No geral, observa-se uma importante redução das tensões críticas de transformação para todos os níveis de tensões máximas aplicadas. A tensão de início de formação da martensita induzida por tensão, σ_{Ms} , por exemplo, é reduzida de 500 MPa para aproximadamente apenas 150 MPa no caso mais crítico (800 MPa, 1 Hz). Toda a diminuição de tensões críticas de transformação mostrada na Fig. 11 pode ser atribuída ao apoio proporcionado a transformação de fase pelo campo de tensões internas associado aos defeitos introduzidos como resultado do acúmulo de deformação plástica na fase austenítica.

3.3 Vida em Fadiga: Curvas de Wohler

A curva de Wohler do fio Ni-Ti estudado foi determinada para quantificar a fadiga estrutural deste fio Ni-Ti em regime superelástico, traduzida em número de ciclos até a ruptura, em determinada tensão de tração numa frequência de ensaio de 1 Hz. Vale salientar que cada ponto, com seu respectivo desvio padrão, na curva da Fig. 12 representa a média de ciclos até a ruptura realizados em quatro ensaios para cada condição de carregamento (Tab. 1).

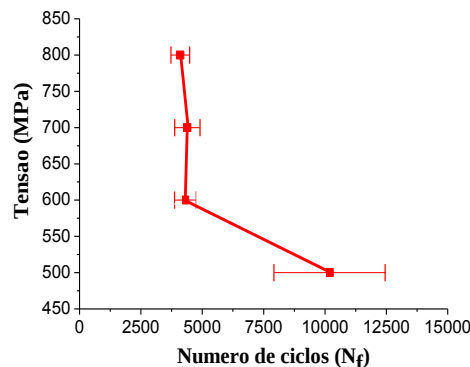


Figura 12. Curva de Wöhler para o fio Ni-Ti na frequência de 1 Hz.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudada a degradação das propriedades funcionais de fios de LMF Ni-Ti superelásticos de seção transversal quadrada, submetidos a diferentes níveis de carregamento mecânico de tração cíclica sob controle de tensão, mais especificamente em quatro tensões máximas de tração (500, 600, 700 e 800 MPa) numa frequência de carregamento fixada em 1 Hz.

Quanto à fadiga funcional dos fios Ni-Ti, observou-se que tanto a energia dissipada (E_D) como a deformação acumulada (ε_p), alcançam uma estabilização após aproximadamente 300 ciclos, isso em virtude da natureza dos ensaios. Em um primeiro momento observa-se um decréscimo da E_D e um aumento da ε_p até esse valor de estabilização. O valor estabilizado da E_D , assim como o da ε_p nos primeiros ciclos se mostrou diretamente proporcional à tensão máxima aplicada. Assim, a funcionalidade dos fios Ni-Ti se degrada mais rapidamente à medida que crescem os níveis de tensão aplicada.

A vida em fadiga estrutural, traduzida em número de ciclos até a falha, mostrou ser diretamente dependente dos níveis de tensão, pois quanto maior a tensão de carregamento menor é a vida útil dos fios.

Constatou-se que as tensões críticas de transformação de fase diminuem com os sucessivos ciclos mecânicos, sendo esse comportamento atribuído ao apoio proporcionado a transformação de fase pelo campo de tensões internas associado aos defeitos introduzidos como resultado do acúmulo de deformação plástica na fase austenítica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos 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).

Aos colegas do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG, onde este projeto foi realizado, por todo apoio e contribuição.

6. REFERÊNCIAS

- Branco, M.; Guerreiro, L.; Mahesh, K.K.; Fernandes, F.M.B.; "Effect of load cycling on the phase transformations in Ni-Ti wires for civil engineering applications". *Construction and Building Materials* 36, pp 508–519, 2012.
- Maletta, C.; Sgambitterra, E.; Furguele, F.; Casati, R.; Tuissi, A.; "Fatigue properties of a pseudoelastic NiTi alloy: Strain ratcheting and hysteresis under cyclic tensile loading". *International Journal of Fatigue*, vol. 66, pp. 78-85, 2014.
- De Aquino, A. S. "Controle de vibração de um sistema sob desbalanceamento rotativo utilizando atuador de liga com memória de forma". Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal da Paraíba, 2011.
- De Oliveira, H. M. R.; Grassi, E. N. D.; de Araújo, C. J. "Caracterização Dinâmica da Resposta Superelástica de Fios de Liga com Memória de Forma". Trabalho publicado nos anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2012, São Luís – MA, Brasil, 2012.
- De Souza, M.M., "Caracterização de uma Liga com Efeito de Memória de Forma". Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.
- Dos Reis, R. P. B., 2007. "Desenvolvimento de um sistema de caracterização de ligas com memória de forma utilizando o efeito termoeletrico". Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 51f.
- Eggeler, G.; Hornbogen, E.; Yawny, A.; Heckmann, A.; Wagner, M. Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys, *Materials Science and Engineering*, vol. 378, pp.24-33, 2004.
- Kang, G.; Kan, Q.; You, C.; Song, D.; Liu, Y. "Whole-Life Transformation Ratchetting and Fatigue of Super-Elastic Ni-Ti Alloy Under Uniaxial Stress-Controlled Cyclic Loading". *Materials Science and Engineering*, vol. 535, pp. 228-234, 2012.
- Lagoudas, D. "Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications", Editora: Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- Larsen, C. M., Watanabe, I., Glickman, G.N., He, J., 2009. "Cyclic Fatigue Analysis of a New Generation of Nickel Titanium Rotary Instruments". *Journal of Endodontics*, Vol. 35, Número 3, pp 401-403.
- Li, Y.F., Mi, X.J., Tan, J., Gao, B.D., 2009. "Thermo-mechanical cyclic transformation behavior of Ti-Ni shape memory alloy wire". *Materials Science and Engineering, A* 509, pp 8–13.
- Otsuka, K.; Wayman, C.M. "Shape Memory Materials". Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- Pereira, F. F. R., Simões, J.B., de Araújo, C.J., 2011. "Thermomechanical Tests of Shape Memory Alloy Belleville Washers". In: 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal - RN. Proceedings of COBEM 2011. Rio de Janeiro – RJ, v. 1. p. 1-10.
- Travassos, G.D. "Desenvolvimento de um Parafuso Superelástico". Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, Brasil, 2010.

Tripi, T. R., Bonaccorso, A., Condorelli, G. G., 2006. "Cyclic fatigue of different nickel-titanium endodontic rotary instruments". Journal of Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology. Elsevier, Vol. 102, Número 4, pp 106-114.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

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

FATIGUE OF Ni-Ti SHAPE MEMORY ALLOY WIRES WITH SQUARE SECTION IN SUPERELASTIC REGIME

Allysson Daniel de Oliveira Ramos, allyssondaniel@hotmail.com¹

Henrique Martinni Ramos de Oliveira, henriquemartinni@hotmail.com²

Carlos José de Araújo, carlos.araujo@ufcg.edu.br³

Estephannie Nobre Dantas Grassi, end.grassi@hotmail.com⁴

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br⁵

Federal University of Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, 882. Campina Grande – PB, CEP: 58429-140, Brazil.

Abstract. Shape memory alloy (SMA) of Ni-Ti system, which can work superelastic regime, has been employed in various sectors, covering areas such as medicine, dentistry and engineering. This work aims to study the behavior of these threads of special materials when subjected to cyclic mechanical stress (fatigue). In this regard, cyclic mechanical tensile tests with load control were performed in order to evaluate the evolution of the functional properties and fatigue life of LMF yarn NiTi square cross-section with 0.4 mm sides in superelastic regime. Functional parameters (dissipated energy, transformation stresses, accumulated strain and superelastic strain) were determined based on the peak value of the mechanical traction effort, ranging from 500 MPa to 800 MPa at a frequency fixed at 1 Hz. It was found the functional properties of the Ni-Ti wire of square section are affected by stress level applied during the tests. For stress greater than the linear elastic limit (700 MPa and 800 MPa), it was found that the phase transformation stresses, the superelastic strain (ϵ_{SE}) and the dissipated energy (E_D) decreases with the increase of the maximum peak stress, the whereas the accumulated strain (ϵ_p) increases. Through the Wohler curve obtained, it was found that the fatigue life of the wire decreases with the increase with increasing the peak stress, reaching values between 3×10^3 and 1×10^4 cycles, featuring a low cycle fatigue.

Keywords: Shape memory alloy, NiTi alloys, superelasticity, Functional Fatigue, Structural Fatigue, Stress Control.