

INFLUÊNCIA DA MÁQUINA DE ENSAIO NA FADIGA TERMOMECÂNICA DE FIOS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

Carlos José de Araújo

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica

Caixa Postal: 10069

Campina Grande – PB BRASIL

e-mail: carlos@dem.ufpb.br

Marie J. Bignon, Michel Morin, Gérard Guénin

INSA de Lyon, Laboratoire GEMPPM, Bat. 502, 1^{er} étage

20, Av. Albert Einstein – 69621 Villeurbanne FRANÇA

Resumo:

A capacidade que os elementos fabricados à base de ligas com efeito memória de forma possuem de produzir um deslocamento mesmo quando submetidos a um carregamento mecânico considerável é responsável pelo crescente interesse nestes materiais ativos. A utilização repetida do elemento à memória de forma pode levar a um fenômeno de fadiga termomecânica não convencional. Neste trabalho, a fadiga até a ruptura de fios que apresentam o efeito memória de forma é estudada utilizando duas máquinas de ensaio diferentes e especialmente concebidas para testar estes materiais. Na primeira delas, denominada MF1, a carga é aplicada e mantida constante por um sistema pneumático original, enquanto na segunda, denominada MF2, o carregamento é assegurado por intermédio de pesos. Nos dois casos, o aquecimento do material é realizado essencialmente por efeito Joule. Os resultados obtidos mostram que, mesmo que o efeito memória de forma sob carga seja praticamente o mesmo nas duas máquinas, a vida em fadiga dos fios é bastante reduzida quando se utiliza a máquina MF1. Estes resultados são discutidos em função das especificidades de cada máquina no que se refere as condições de ensaio.

Palavras chave: Fios, efeito memória de forma, fadiga, atuadores.

1. INTRODUÇÃO

O efeito memória de forma (EMF) corresponde a habilidade que alguns materiais possuem de recuperar uma deformação plástica, ou “aparentemente plástica”, por intermédio de um aquecimento simples. Esta recuperação da forma, podendo ser acompanhada de um trabalho mecânico, permite que tais materiais possam ser intrinsecamente considerados como atuadores termomecânicos. Esta propriedade, associada a sensibilidade a temperatura que eles demonstram, resultou na introdução recente destes

materiais em uma nova área de pesquisa e desenvolvimento, denominada estruturas e materiais adaptáveis (*smart structures and materials*) (Culshaw, 1996).

Atualmente, as aplicações que vem encontrando maior sucesso são aquelas que utilizam as ligas metálicas com EMF como atuadores termomecânicos no domínio da robótica, das estruturas inteligentes e no campo médico-odontológico (Melton, 1998). Vale ressaltar que quando estes materiais são usados como atuadores a operação que eles realizam sob carga é geralmente repetitiva. A figura 1 ilustra esquematicamente a operação de um fio atuador com EMF desenvolvendo um efeito memória reversível sob carga, que neste trabalho será denominado Efeito Memória de Duplo Sentido Assistido (EMDSA). O ponto B corresponde a posição baixa temperatura (PBT) sob carga, enquanto que o ponto C corresponde a posição alta temperatura (PAT). Estas posições podem variar em função do número de ciclos térmicos e a repetição da operação em EMDSA torna estes materiais susceptíveis a um fenômeno de fadiga que, antes da falha completa do atuador, pode ser responsável por uma degradação do EMDSA (De Araújo *et al.*, 1997; De Araújo, 1999). O problema da fadiga das ligas com EMF têm limitado algumas aplicações específicas no domínio da robótica (Mackenzie *et al.*, 1996).

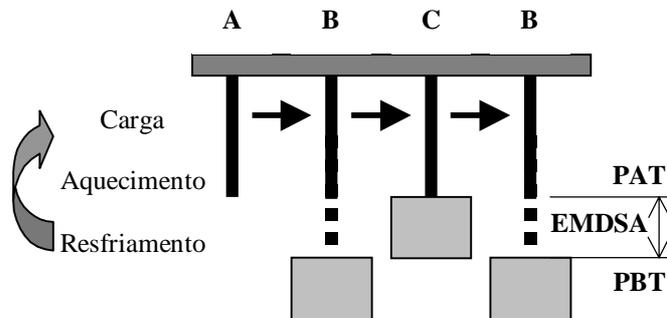


Figura 1 – Esquema simplificado do EMDSA desenvolvido por um fio trabalhando em tração uniaxial.

Infelizmente não existem normas técnicas que regulem os testes de fadiga destes materiais submetidos a ciclagem térmica sob carregamento mecânico, numa configuração semelhante aquela da figura 1. Isto faz com que as diferenças de vida em fadiga encontradas na literatura, para materiais semelhantes, sejam algumas vezes enormes e incompreensíveis. A realização deste trabalho foi motivada exatamente por essa constatação. Assim sendo, visando analisar os aspectos macromecânicos da fadiga de fios atuadores com memória de forma, duas máquinas (denominadas MF1 e MF2) foram especialmente projetadas e construídas. A primeira, MF1, possui um sistema de aplicação e controle de carga que se aproxima mais das máquinas clássicas, enquanto a segunda, MF2, foi totalmente inspirada na figura 1, sendo portanto a aplicação da carga realizada diretamente através de pesos. Os resultados obtidos permitem elucidar boa parte das divergências encontradas na literatura e são discutidos em função das especificidades de cada máquina.

2. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

2.1. As máquinas de ensaio MF1 e MF2

As duas máquinas de ensaio, MF1 e MF2, especialmente projetadas e construídas para o estudo das propriedades termomecânicas das ligas com EMF são mostradas na figura 2.

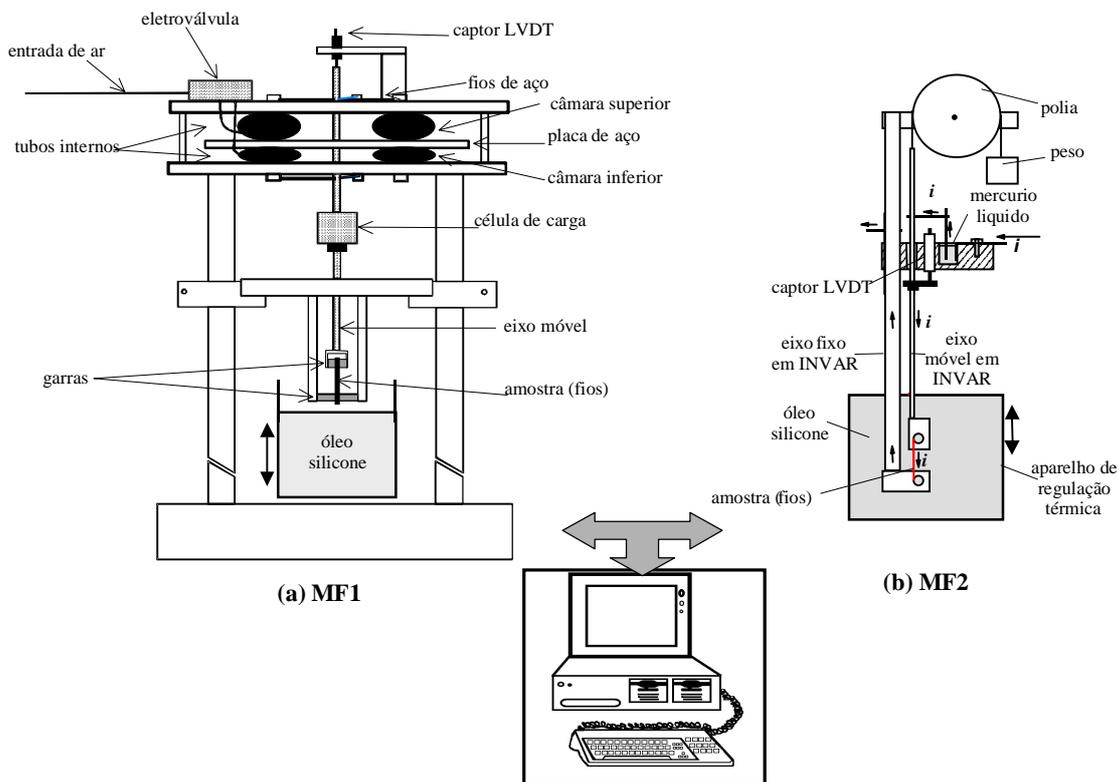


Figura 2 – Esquema das máquinas de ensaio especificamente concebidas para o estudo das propriedades termomecânicas de fios com EMF. (a) Máquina MF1. (b) Máquina MF2.

Na máquina MF1 (fig.2a), o sistema motor localizado na parte superior é pneumático. O carregamento mecânico é produzido através de duas câmaras de ar separadas por uma placa de aço solidária ao eixo móvel. Quando a câmara inferior é inflada enquanto a superior se esvazia, o eixo móvel sobe. A operação inversa produz o movimento de descida do eixo móvel. A distribuição de ar comprimido entre as duas câmaras pode ser controlada por uma eletroválvula. Para evitar qualquer problema de atrito, o eixo móvel da máquina pode ser elasticamente guiado usando dois conjuntos de fios de aço corda de piano. A máquina é equipada com uma célula de carga de 500N e um captor de deslocamento LVDT (Linear Variable Differential Transducer) capaz de medir um deslocamento de 5mm com uma resolução da ordem de $2\mu\text{m}$. É possível trabalhar em regime de tensão controlada ou em controle de deformação. A região da máquina que prende a amostra pode ser imersa em um banho de óleo silicone termicamente regulado para obter uma temperatura homogênea e estável. O aquecimento da amostra para produzir o EMDSA pode também ser realizado por corrente elétrica (efeito Joule). Neste caso a célula de carga da máquina é protegida por um isolante elétrico. A máquina é pilotada por

um sistema de controle e aquisição de dados instalado em um computador. Para a operação em EMDSA segundo a figura 1, o sistema mantém a carga constante, comanda o aquecimento da amostra através do controle da passagem de corrente elétrica e faz a aquisição da carga medida pela célula de carga, do deslocamento medido pelo captor LVDT e da temperatura do banho de óleo medida por uma sonda de platina.

Na máquina MF2 (fig.2b), o carregamento da amostra de fio com EMF é assegurado por intermédio de pesos, seguindo totalmente o esquema da figura 1. Esta configuração limita a carga máxima sobre a amostra em 10kg. Existe um contato elétrico móvel efetuado com mercúrio líquido que permite fazer a corrente elétrica (i) passar pela amostra sem produzir nenhum carregamento adicional sobre a mesma. A instrumentação e o sistema de controle e aquisição é semelhante aquele utilizado na máquina MF1.

As diferenças no projeto dessas duas máquinas impõem necessariamente condições de aquecimento elétrico diferentes as amostras testadas. Para a máquina MF1, o aquecimento da amostra por corrente elétrica deve ser lento e gradual para que o sistema eletrônico que pilota a máquina tenha tempo suficiente para controlá-la mantendo sobretudo a carga constante (esquema do EMDSA ilustrado na figura 1). Este problema não existe na máquina MF-2 pois o carregamento mantido constante pelos pesos permite que o aquecimento elétrico seja feito muito rapidamente, através de pulsos de corrente elétrica de curta duração. A figura 3 mostra um esquema dos modos de aquecimento elétrico usados nas duas máquinas. Observa-se que um ciclo de aquecimento – resfriamento dura aproximadamente 80s na máquina MF1, enquanto que com a máquina MF2 este ciclo pode ser realizado em apenas 6s. Estes tempos são válidos para fios de ligas Ti-Ni com EMF tendo aproximadamente 0.5mm de diâmetro. A corrente máxima ($i_{m\acute{a}x}$) é obtida experimentalmente, para cada valor da carga externa, aumentando-se gradativamente a corrente até obter-se a saturação do EMDSA (ponto C na figura 1).

Em ambas as máquinas o deslocamento do fio atuador é medido em termos da sua deformação (ϵ) através da equação:

$$\epsilon = \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right) \times 100(\%) \quad (1)$$

onde l é o comprimento instantâneo do fio e l_0 é o comprimento inicial medido na temperatura ambiente.

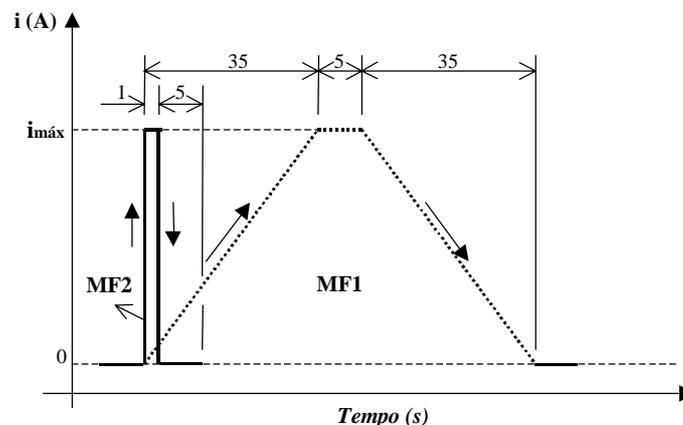


Figura 3 – Esquema dos modos de aquecimento elétrico utilizado nas máquinas MF1 e MF2. A temperatura do óleo silicone é mantida constante.

2.2. Material e condições de ensaio

Foram utilizados fios de uma liga Ti-Ni-Cu com EMF fornecidos pela empresa belga *Advanced Materials Technologies Inc.* Todas as amostras apresentam a composição nominal Ti-45.0Ni-5.0Cu (at%), diâmetros de 0.5 mm e foram obtidas por trefilação à frio com redução total de área de 35% durante a fabricação. Os fios foram recozidos à 425°C durante 1h e posteriormente resfriados ao ar ambiente.

Todas as amostras testadas tiveram comprimentos entre 27 e 32mm. O aquecimento e resfriamento das amostras foi realizado segundo o esquema da figura 3, mantendo a temperatura do banho de óleo silicone constante em aproximadamente 10°C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 4 mostra a evolução do EMDSA e das posições PBT e PAT em função do número de ciclos térmicos (N) utilizando a máquina MF2. Os resultados obtidos para dois níveis de carregamento externo, 175MPa e 225MPa, podem ser comparados nas figuras 4(a) e 4(b).

Observa-se nas figuras 4(a) e 4(b) que as posições PBT e PAT evoluem mais rapidamente no período inicial de ciclagem. Este comportamento, que depende da intensidade do carregamento externo, traduz um efeito de fluência da amostra, responsável por um alongamento permanente da mesma que resulta em uma degradação do EMDSA antes da ruptura abrupta. Qualitativamente, o comportamento obtido com a máquina MF1 é bastante semelhante. Quantitativamente, para um carregamento mecânico idêntico, as deformações correspondentes as posições PBT e PAT evoluem mais intensa e rapidamente quando se trabalha com a máquina MF1, porém o EMDSA obtido em geral é da mesma ordem de grandeza daquele verificado durante os ensaios com a máquina MF2. Esta evolução mais intensa das deformações PBT e PAT na máquina MF1 reduz bastante a vida útil dos fios com EMF. A figura 5 mostra as curvas de Wöhler dos fios testados até a falha completa nas máquinas MF1 e MF2. A flecha na figura 5(b) indica que, para um carregamento mínimo equivalente a 75MPa (~1.5kg), não houve ruptura dos fios testados com a máquina MF2 após 200000 ciclos. Para esse mesmo nível de carga e utilizando a máquina MF1, a vida em fadiga dos fios é bastante reduzida, podendo chegar a valores situados em torno de apenas 10000 ciclos, conforme indica a figura 5(a).

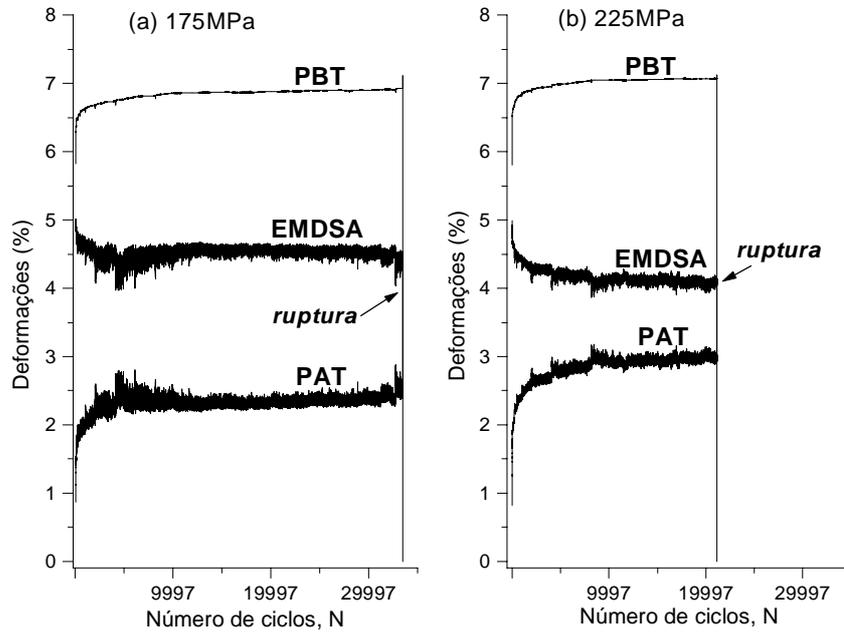


Figura 4 – Comportamento dos fios com EMF durante a ciclagem térmica por efeito Joule utilizando a máquina MF2. (a) 175MPa. (b) 225MPa.

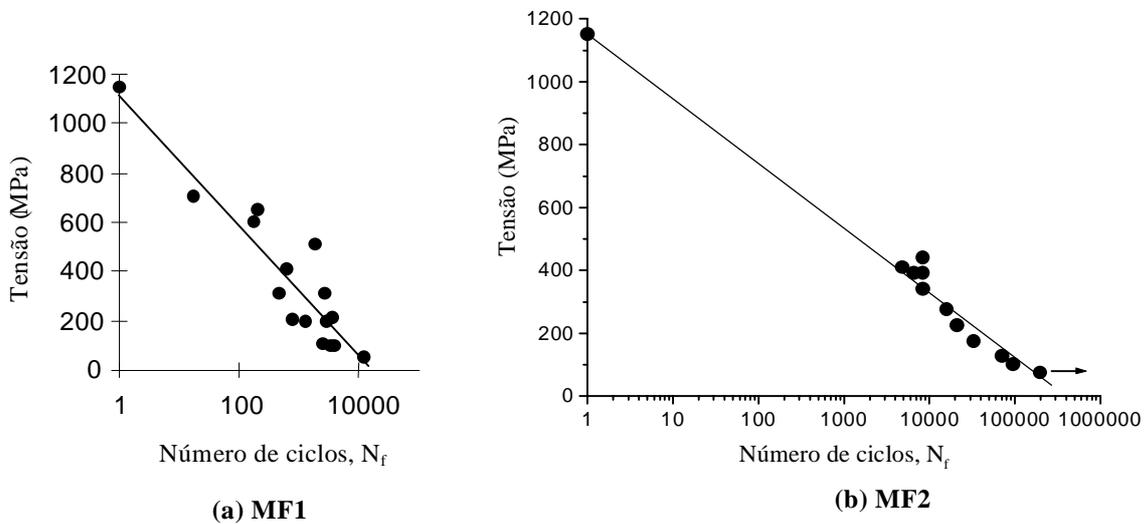


Figura 5 – Curvas de Wöhler para os fios testados. (a) Número de ciclos até a ruptura com a máquina MF1. (b) Número de ciclos até a ruptura com a máquina MF2.

Comparando as figuras 5(a) e 5(b) para a faixa de tensão situada entre 100 e 450MPa, verifica-se que existe um fator multiplicativo de aproximadamente 10 entre as vidas em fadiga dos fios avaliadas através das duas máquinas, isto é, os resultados obtidos com a máquina MF2 são dez vezes maiores. Com relação a literatura, não existem muitos

estudos específicos sobre a fadiga do EMDSA. Tautzenberg *et al.* (1992) encontraram valores de vida em fadiga intermediários aqueles mostrados nas figuras 5(a) e 5(b) para a faixa de tensão situada entre 50 e 200MPa, porém estes autores não detalham o equipamento utilizado. Em um outro estudo, Filip e Mazanec (1994) encontraram valores de vida em fadiga algumas vezes melhores que aqueles da figura 5(b) e utilizando um equipamento de configuração bastante semelhante a máquina MF2, mas os tratamentos termomecânicos aplicados aos fios diferem do nosso. Na realidade, não encontram-se registros de fios de materiais idênticos testados em equipamentos de concepção diferenciada como nesse trabalho.

As diferenças de vida útil evidenciadas na figura 5 podem ser explicadas pelas diferenças no modo de ciclagem utilizado em cada máquina. Verifica-se na figura 3 que os fios passam muito mais tempo sendo aquecidos sob carga quando se utiliza a máquina MF1. Além disso, nesta máquina a amostra permanece aproximadamente 5s submetida a corrente máxima ($i_{máx}$). Este tempo é excessivo, mas necessário para que o sistema eletrônico possa controlar adequadamente a máquina mantendo sobretudo a carga constante. Estas condições impostas a amostra faz com que as deformações correspondentes as posições PBT e PAT evoluam muito mais intensamente na máquina MF1, causando uma ruptura precoce. Além disso, para os carregamentos mais intensos, a partir de 300MPa, tais condições podem causar o aparecimento do fenômeno de stricção na região da ruptura dos fios. Assim sendo, a vida em fadiga depende não apenas da carga aplicada, mas também do tempo de aquecimento. Para confirmar essa hipótese, pulsos de corrente de duração entre 1 e 5s foram aplicados as amostras utilizando a máquina MF2. A figura 6 mostra a vida em fadiga até a ruptura dos fios em função do tempo de aquecimento para um nível de carga específico (275MPa), assim como os dois tipos de ruptura observados.

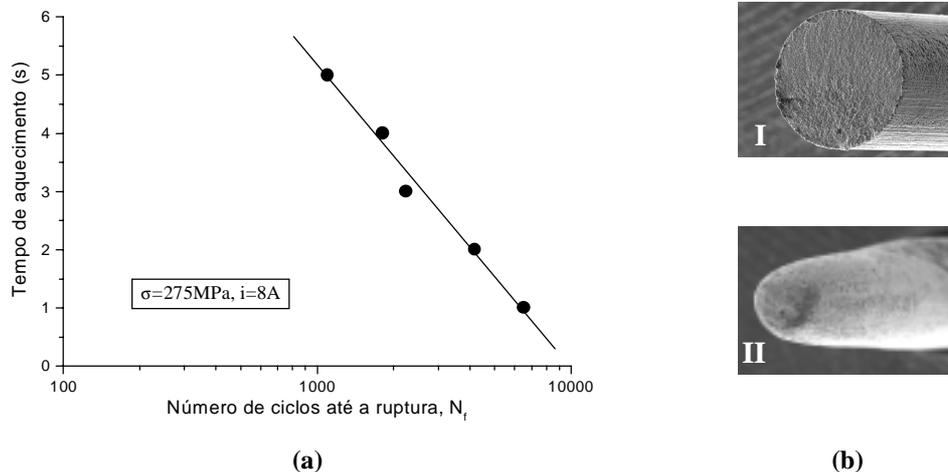


Figura 6 – (a) Vida em fadiga dos fios em função do tempo de aquecimento para uma carga de 275MPa utilizando a máquina MF2. (b) Tipos de ruptura.

Verifica-se na figura 6(a) que a utilização de tempos de aquecimento superiores a 1s reduz bastante a vida em fadiga quando se utiliza um mesmo equipamento de ensaio. Este resultado ajuda a explicar as diferenças de vida útil dos fios evidenciadas na figura 5, quando se compara as máquinas MF1 e MF2. Durante os ensaios que resultaram na figura

6(a), isto é, para uma carga correspondente a 275MPa e tempos de aquecimento entre 1 e 5s, nenhum fenômeno de stricção foi observado e as rupturas foram todas do tipo I, conforme mostra a figura 6(b). Na realidade, rupturas do tipo II mostrada na figura 6(b) foram observadas apenas para carregamentos iguais ou superiores a 300MPa na máquina MF1 e para carregamentos idênticos a esses quando se ultrapassa um tempo limite de 2s na máquina MF2. Assim sendo, para carregamentos entre 75MPa e 450MPa, o fenômeno de stricção não aparece nos fios testados na máquina MF2 quando se utiliza pulsos de corrente de curta duração, menores ou iguais a 1s.

Estas constatações traduzidas pelas figuras 5 e 6 são bastante importantes na medida em que verifica-se na literatura que o acionamento de elementos do tipo fios à memória de forma, para aplicações no domínio da robótica, é geralmente efetuado através de pulsos de corrente de curta duração (Furuya e Shimada, 1990). Mesmo que alguns autores (Furuya e Shimada, 1990) sejam induzidos a não considerarem a fadiga dos elementos Ti-Ni como um problema técnico muito importante, os resultados das figuras 5 e 6, associados aos baixos valores de vida em fadiga encontrados durante algumas tentativas de aplicações específicas no domínio da robótica (MacKenzie *et al.*, 1996), revelam que o comportamento em fadiga depende das condições de aplicação do carregamento termomecânico.

Vale salientar também que os baixos valores de vida em fadiga encontrados utilizando a máquina MF1 desaconselham o emprego de máquinas de ensaio clássicas (MTS ou INSTRON por exemplo) para o estudo deste tipo específico de fadiga, já que elas limitariam as condições de aquecimento das amostras, por razões semelhantes aquelas apresentadas para a máquina MF1.

4. CONCLUSÕES

A construção de duas máquinas de ensaio especificamente concebidas para o estudo das propriedades termomecânicas de fios atuadores com EMF, sob carregamento trativo uniaxial, permitiu demonstrar experimentalmente que as enormes discrepâncias entre os valores de vida em fadiga publicados na literatura podem estar muitas vezes associados as condições impostas pelo equipamento utilizado em detrimento dos aspectos mecano-metalúrgicos relativos as amostras testadas. Foi demonstrado que o aumento do tempo de aquecimento dos fios com EMF mantidos sob carga é responsável por um aumento da potência dissipada sobre os mesmos, reduzindo significativamente seus desempenhos. Levando em consideração os resultados obtidos com a máquina MF1 e a inexistência de normas que regulem os testes de fadiga de atuadores à memória de forma, não é recomendado o emprego de máquinas de ensaio clássicas para a caracterização do comportamento em fadiga destes elementos. Como a grande maioria das aplicações cíclicas no domínio da robótica utilizam pulsos de corrente de curta duração ($t < 1s$), este trabalho revela que uma eventual análise da vida em fadiga de fios com EMF deve ser preferencialmente realizada em um equipamento semelhante a máquina MF2 apresentada nesse estudo.

Agradecimentos

C. J. De Araújo agradece o apoio da Capes durante seu doutoramento no INSA de Lyon – França (Proc. n° 0073/95-13).

REFERÊNCIAS

- Culshaw., B., 1996, Smart Structures and Materials. Artech House Publishers, 201p.
- De Araújo, C. J., Morin, M. and Guénin, G., 1997, Fatigue behavior of Ti-Ni-Cu thin wires SME, Journal de Physique IV, Colloque C5, pp. C5-501 – C5-505.
- De Araújo, C. J., 1999, Comportement cyclique de fils en alliage à mémoire de forme Ti-Ni-Cu: analyse electro-thermomécanique, dégradation et fatigue par cyclage thermique sous contrainte, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 177p.
- Filip, P. & Mazanec, K., 1994, Influence of cycling on the reverse martensitic transformation and shape memory phenomena in Ti-Ni alloys, Scripta Metallurgica e Materialia, vol. 30, pp. 67-72.
- Furuya, Y. & Shimada, H., 1990, Shape memory actuators for robotic applications. In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. Edited by T. W. Duerig. Butterworth-Heinemann, London, pp. 338-354.
- MacKenzie, M., An, N., Giere, M., Stori, J. and Wright, P., 1996, Experiences with shape memory alloy: robot grippers for sub-millimeter hard disc drive components. In Proceedings SPIE Vol. 2906, Microrobotics: Components and Applications, Edited by A. Sulzmann, pp. 25-36.
- Melton, K. N., 1998, General applications of SMA's and smart materials. In Shape Memory Materials, Edited by K. Otsuka and C. M. Wayman, Cambridge University Press, pp. 220-239.
- Tautzenberg, P., Kehrer, H-P., Nußkern, H. and Kocher, H. H., 1992, Stability of the shape memory effect and mechanical fatigue of Ni-Ti-Cu and Ni-Ti elements. In Proceedings of the International Conference on the Martensitic Transformation, Monterey, California, pp. 1295-1300.