

# Curvas de Vida em Fadiga de Ligas de NiTi – o efeito “Z”

Ana Maria Gontijo Figueiredo, Departamento de Engenharia de Estruturas - UFMG, e-mail: [anamaria@dees.ufmg.br](mailto:anamaria@dees.ufmg.br)

Paulo José Modenesi, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais– UFMG, e-mail: [modenesi@demet.ufmg.br](mailto:modenesi@demet.ufmg.br)

Vicente Tadeu Lopes Buono, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais– UFMG, e-mail: [ybuono@demet.ufmg.br](mailto:ybuono@demet.ufmg.br)

## Introdução

Superelasticidade, um tipo especial de Efeito Memória de Forma, é a propriedade, apresentada por alguns materiais, de recuperar grandes deformações, à mesma temperatura em que foram deformados. Deve-se a transformações de fase cristalograficamente reversíveis, de uma fase austenítica (FA) para uma martensítica (FM) – transformações martensíticas (TM), induzidas por tensão e/ou temperatura. O mecanismo de recuperação é a transformação reversa (TR), da FM para a FA. Destacam-se as ligas aproximadamente equiatômicas de NiTi, adequadas às aplicações médicas e dentárias, uma vez que o efeito pode ser conseguido na faixa de temperaturas entre a ambiente e a do corpo humano<sup>(1-3)</sup>. A TM destas ligas ocorre com variação negativa de volume ( $\sim -0,5\%$ )<sup>(4-7)</sup>. Na maioria de suas aplicações, este material é submetido a solicitações térmicas e/ou mecânicas cíclicas ou variáveis<sup>(8)</sup>, tornando a vida mecânica útil do componente (vida em fadiga) um parâmetro importante, que tem sido estudado, no caso de controle de deformação, através principalmente de ensaios de flexão rotativa<sup>(9,11-14,16-19)</sup>. Muitos dispositivos biomecânicos têm sido produzidos com essas ligas, tais como *stents* auto-expansivos, filtros de veia cava, instrumentos cirúrgicos endoscópicos, fios ortodônticos, limas endodônticas e próteses ortopédicas. Entretanto, a natureza não-linear da superelasticidade dificulta a modelagem de seu comportamento através das teorias convencionais e muitas questões ainda encontram-se mal compreendidas.

## Materiais e métodos

No presente trabalho, compara-se as curvas  $\epsilon_a-N_f$  obtidas com ensaios de flexão rotativa de fios de NiTi em três formas diferentes: austenítico estável - A0(90°C), superelástico - A0 e martensítico - A45, além de um fio de aço inoxidável austenítico<sup>(10)</sup>. Os resultados

são comparados, também, com as curvas obtidas na literatura<sup>(12-19)</sup>. Após a caracterização do material por calorimetria diferencial de varredura, difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura e ensaios de tração, a vida em fadiga foi obtida através de ensaios de flexão rotativa, realizados em equipamento desenvolvido no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. Para a construção das curvas  $\epsilon_a-N_f$ , foram realizados 244 ensaios com os fios de NiTi e 27 ensaios com o fio de aço. Para minimizar alterações nas propriedades do material<sup>(11,13-18)</sup>, a temperatura dos fios de NiTi durante os ensaios, medida com termopar, foi controlada através da velocidade de rotação do fio<sup>(10)</sup>.

## Resultados e discussão

Os resultados da caracterização do material permitem considerar que, visando sua utilização em ensaios de fadiga e tomando o fio A0 como padrão, o fio A45 comporta-se como o fio A0 a uma temperatura na qual apresentaria microestrutura martensítica estável. O comportamento de um fio austenítico estável foi obtido com o fio A0 ensaiado à 90°C. Os valores médios de  $N_f$  obtidos para cada  $\epsilon_a$  nos ensaios de fadiga por flexão rotativa, tanto para os fios de NiTi quanto para o aço, estão apresentados na figura 1, com as respectivas curvas de tendência.

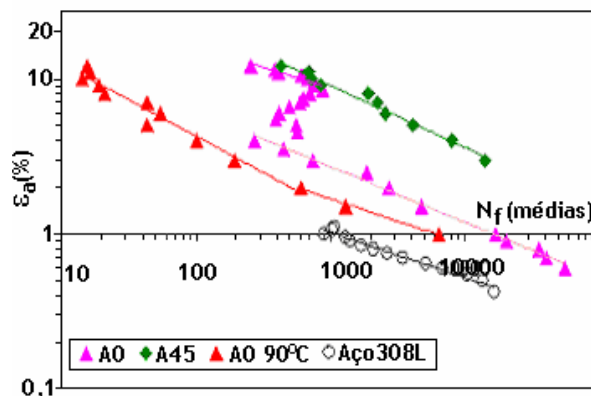


Figura 1: Curvas  $\epsilon_a-N_f$  para NiTi (A0, A0(90°C), A45) e aço 308L.

Os fios de NiTi, nas três formas e faixa de deformações ensaiadas, apresentaram maior vida em fadiga do que o aço. Do conjunto das três curvas dos fios de NiTi observa-se que a do fio A0 encontra-se no espaço limitado pelas curvas dos fios A0(90°C) e A45, e inicialmente próximas à do primeiro. Para deformações acima de determinados valores, verifica-se a tendência incomum de crescimento de  $N_f$  com a deformação, até que seja alcançada a região da curva do fio A45, a partir de onde estas duas curvas praticamente se superpõem. Como resultado, nesta região a curva do fio A0 (temperatura ambiente) adquire a forma aproximada de um “Z”. As curvas dos fios A0(90°C) e A45 apresentam a forma usual. O fio A0(90°C) parece, de fato, não sofrer transformação martensítica, comportando-se como um material metálico convencional. A curva do fio A45 é também semelhante às convencionais e mostra vida em fadiga aproximadamente 100 vezes maior que a do fio A0(90°C). Os resultados do fio A0 encontram-se dentro da faixa limitada pelas curvas dos outros autores<sup>(12-19)</sup>.

### Conclusão

Os resultados obtidos permitem considerar a hipótese de que o fio de NiTi, ensaiado numa faixa de temperaturas na qual seria esperado comportamento superelástico, responde de maneira semelhante ao material na sua forma austenítica estável - curva do fio A0(90°C), mesmo sob amplitudes de deformação maiores do que as que produzem o início da TM em ensaios de tração (2%). Tal fato parece corroborar a hipótese de que a TM, que em princípio poderia ocorrer na(s) ponta(s) da(s) trinca(s), foi afetada, ou mesmo inibida, pela variação negativa de volume que a acompanha. Entretanto, a elevação da amplitude de deformação acima de determinado valor (~4% no caso do fio A0) parece induzir TM na ponta das trincas em volume crescente, produzindo inesperado aumento de  $N_f$  com  $\epsilon_a$ , até que a resposta atinja a região do material martensítico (curva do fio A45), quando passa a se comportar como este último, com curvas praticamente superpostas.

### Referências bibliográficas

1. Melton, K.N., In: Otsuka, K.; Wayman, C.M. Shape Memory Materials, 1 ed. United Kingdom:

- Cambridge University Press, 1998, 284p., Cap. 10, p.220-239.
2. Wayman, C.M., Journal of Metals, p.129-1137, June, 1980
3. Otsuka, k.; Wayman, C.M. Shape Memory Materials, 1 ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 1998, 284p.
4. Melton, K.N.; Mercier, O., Acta Metallurgica, v.27, p.137-144, 1979.
5. Dauskardt, R.H.; Duerig, T.W.; Ritchie, R.O. In: Otsuka, K.; Shimizu, K., editors. Proc. MRS International Meeting on Advanced Materials. v.9, Pittsburgh: Materials Research Society; p.243-249, 1989.
6. Holtz, R.L.; Sadananda, K.; Iman, M.A., International Journal of Fatigue, v.21, p.S137-S145, 1999.
7. McKelvey, A.I.; Ritchie, R.O., Metallurgical and Materials Transactions A, v. 32A, p.731-743, 2001.
8. Humbeeck, J.V.; Stalmans, R., In: Otsuka, K.; Wayman, C.M. Shape Memory Materials, 1 ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 1998, 284p., Cap. 7, p.149-183.
9. Duerig, T.; Pelton, A.; Stockel, D., Materials Science and Engineering A, v.273-275, p.149-160, 1999.
10. Figueiredo, A.M.F. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006 (235 p.).
11. Melton, K.N.; Mercier, O., Materials Science and Engineering, v.40, n.1, p.81-87, 1979.
12. Tobushi, H.; Hachisuka, T.; Yamada, S.; Lin, P., Mechanics of Materials, v.26, p.35-42, 1997.
13. Tobushi, H.; Nakahara, T.; Shimeno, Y.; Hashimoto, T., Trans. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, v.112, p.186-191, 2000.
14. Yang, J., SMST97: Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Asilomar Conference Center, Pacific Grove, California, USA, p.479-484, 1997.
15. Miyazaki, S.; Mizukoshi, K.; Ueki, T.; Sakuma, T.; Liu, Y., Materials Science and Engineering A, v.273-275, p.658-663, 1999.
16. Sawagushi, T.; Kaustrater, G.; Yawny, A.; Wagner, M.; Eggeler, G., Metallurgical and Materials Transactions A, v.34A, p.2847-2860, 2003.
17. Eggeler, G.; Hornbogen, E.; Yawny, A.; Heckmann, A.; Wagner, M., Materials Science and Engineering, v.378, p.24-33, 2004.
18. Wagner, M.; Sawagucchi, T.; Kaustrater, G.; Hoffken, D.; Eggeler, G., Materials Science and Engineering, v.378, p.105-109, 2004.
19. Young, J.M.; Van Vliet, K.J. Journal of Biomedical Materials Research, v.72B, 1, p.17-26, 2004 .