

ATUADOR TORCIONAL UTILIZANDO LIGA DE NITI COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

TORTIONAL ACTUATOR USING NITI ALLOY WITH SHAPE MEMORY EFFECT

Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes¹

¹ Professora do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG Email: marines.gomes@docente.evangelicagoianesia.edu.br

Resumo: As ligas com efeito de memória de forma (EMF) são materiais com a capacidade de retornar a sua forma anterior após sofrer um aquecimento. As ligas Nitinol (Níquel e Titânio) estão entre as ligas com memória de forma mais utilizadas em diversas aplicações. No Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) foi produzida uma liga de NiTi capaz de deformar até 9% da forma original e recuperar totalmente após ser exposta a altas temperaturas. Aproveitando essa característica foi desenvolvido um atuador de torção, visando o controle de forma de estruturas aeronáuticas. O objetivo deste trabalho é reproduzir experimentalmente o deslocamento angular e determinar o torque gerado, pela recuperação da forma da liga. Desenvolveu-se uma formulação simplificada para o projeto do atuador torcional considerando como variáveis o comprimento e o diâmetro do atuador, o diâmetro do fio e o ângulo de enrolamento. Foram determinadas expressões para o cálculo do comprimento do fio de NiTi, o deslocamento angular e o torque gerado em função dos parâmetros de projeto. O sistema de aquecimento usado para atingir a temperatura de transformação de fase é baseado em água em ebulição e desenvolveu-se um banco de prova linear para caracterizar a recuperação de forma do material, assim como as forças geradas sob deformação longitudinal. Dois diâmetros de fio de NiTi foram testados no atuador torcional: 1 mm e 2 mm. Os resultados de deslocamento angular foram de 18° para os dois fios utilizados, com deformação recuperável por EMF de aproximadamente 3%. Em termos de forças de recuperação, o fio de 1 mm apresentou 250 N na etapa de recuperação, e o fio de 2 mm uma força de 1100 N, aproximadamente quatro vezes maior.

Palavras-chaves: Efeito de Memória de Forma; Atuador Torcional; Nitinol

Abstract: Shape memory effect (EMF) alloys are materials with the ability to return to their former shape after a marked year. Nitinol alloys (Nickel and Titanium) are among the most used shape memory alloys in various applications. At the Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) it produced a NiTi alloy capable of deforming up to 9% of the original shape and fully recovering after being exposed to high temperatures. This feature was developed to act as an actuator, aiming to take advantage of the control of the shape of structures. The objective of the angular and optimized work is experimentally the displacement of the generated torque, by the recovery of the alloy shape. A simplified formulation for the design of the torsional actuator is developed, considering as variables the length and diameter of the actuator, the wire diameter and the actuation angle. Expressions were determined for the length of the NiTi wire, the angular displacement and the torque generated as a function of parameters and design. The water transformation system developed to characterize a water transformation system developed as a linear test bench developed to characterize a material recovery process, as well as the production phase carried out under longitudinal deformation. Two diameters of NiTi wire were tested in the torsional actuator: 1 mm and 2 mm. The angular displacement results were 18° for the two wires used, with an EMF recoverable strain of approximately 3%. In terms of recovery force, the 1 mm wire presented 250 N in the recovery step, and the 2 mm wire presented a force of 1100 N, four times greater.

Keywords: Shape Memory Effect, Torsional Actuator, Nitinol

INTRODUÇÃO

Durante séculos, os metais têm desempenhado um papel importante como materiais estruturais. As técnicas de produção de ligas como fundição e forjamento, têm evoluído desde as idades do bronze e do ferro. Com os avanços da ciência e tecnologia, e uma compreensão mais profunda dos efeitos na microestrutura e técnicas de processamento sobre o comportamento do material, a Ciência dos Materiais evoluiu radicalmente ao longo das décadas passadas. A capacidade de gerar diferentes propriedades nos materiais (mecânica, térmica, elétrica, etc.) para uma variedade de aplicações permite o desenvolvimento de novas ligas e compostos. Neste contexto, ligas com Memória de Forma (LEMF) são uma classe única de materiais, que apresentam habilidade de recuperar sua forma quando deformada e a temperatura é aumentada. Esse aumento na temperatura pode resultar em uma recuperação da forma mesmo sob cargas elevadas

aplicadas, resultando em altas densidades de energia na atuação. A liga NiTi apresenta este tipo de transformação martensítica é basicamente uma transformação sem difusão que ocorre por deformação de cisalhamento da estrutura de rede (movimento de átomos da sua posição original)¹. Essas ligas têm atraído grande atenção como candidatas promissoras para os materiais inteligentes, pois funcionam como sensores e atuadores. Essas ligas também apresentam boa resistência à corrosão² e é biocompatível, tornando-a adequado para utilização em aplicações biomédicas³.

O efeito de memória de forma (EMF) é um fenômeno no qual uma amostra recupera sua forma original em virtude da transformação reversa após o aquecimento à temperatura acima da temperatura final da fase austenítica^{4,5}. A aplicação de LEMF inclui uma ampla variedade de setores industriais como o aeroespacial, automotivo, biomédico, e exploração de petróleo^{6,7,8,9,10}.

No Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) têm sido desenvolvidos estudos sobre ligas com por exemplo Nitinol, com o objetivo de evitar a contaminação da liga, melhorando a pureza e assim aumentando a sua porcentagem de recuperação de forma ¹¹. Focando nestes conceitos, neste trabalho propõe-se a estudar a liga de Nitinol para observar suas características de recuperação de forma. Mais especificamente, o seu objetivo principal é desenvolver um atuador torcional com grande capacidade de carga. A aplicação pretendida para este atuador é o controle do ângulo de ataque de uma asa, e a ideia é posicionar o atuador entre duas nervuras e aproveitar o efeito de rigidez torcional para a recuperação superelástica de forma.

Relato de caso:

As ligas de NiTi utilizadas neste estudo foram produzidas no Instituto Tecnológico Aeronáutico (ITA), e a temperatura de transformação nessa liga é de 88°C¹¹. Por outro lado, o módulo de elasticidade da liga de NiTi utilizada aumenta conforme a temperatura é incrementada, como indica na Tabela 1. Um outro comportamento da liga é que o módulo de elasticidade da fase austenítica é maior do que a fase martensítica.

| T _e (°C) | E (GPa) |
|---------------------|---------|
| -30 | 16,4 |
| -10 | 20,7 |
| 0 | 18,0 |
| 20 | 22,3 |
| 40 | 26,1 |
| 60 | 38,2 |
| 80 | 61,5 |
| 100 | 61,5 |
| 120 | 61,5 |
| 190 | 61,5 |

Tabela 1: Variação do Módulo de Elasticidade da liga

Foi demonstrado por este estudo que quando o fio é alongado 9%, provavelmente obtém sua maior recuperação. Um detalhe muito importante também é que

um fio com 9% de deformação à temperatura ambiente tem maior capacidade de recuperação do que qualquer outra temperatura¹¹.

Em resumo, a liga tem uma faixa de temperatura de aplicação do EMF entre -30°C e 60°C e acima de 80°C o EMF desaparece. A recuperação da forma, que é superior a 95%, é otimizada à temperatura ambiente, o que facilita à aplicação prática desse material.

Para o estudo do comportamento do fio de forma linear desenhou-se um banco de prova, Na Figura 1 é mostrado o desenho da montagem geral e todas as partes do banco de prova linear. A célula de carga de 10 kN na parte inferior é fixada ao solo, e mede a força desenvolvida pela deformação do fio de NiTi. O canal de plástico tubular facilita a aplicação da água na temperatura de transformação de fase. Também foi adicionado no banco de prova um sensor para medição de deslocamento linear (LVDT), que tem fundo de escala de 100 mm.

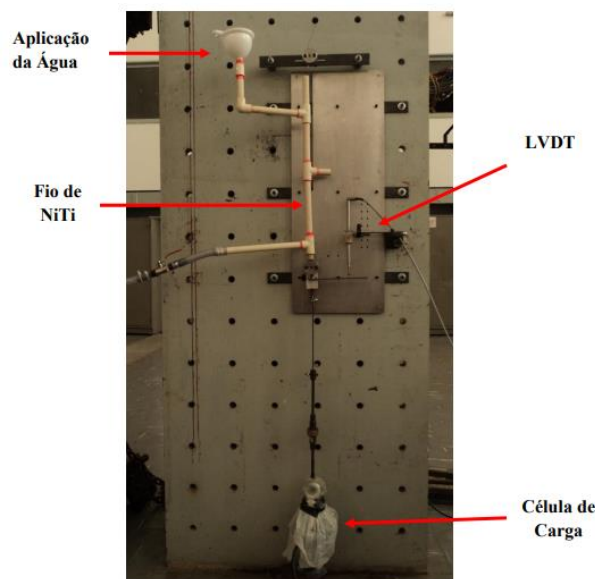


Figura 1: Banco de Prova Linear

A montagem do atuador torcional é mostrada na Figura 2. O atuador é conformado por um compartimento fechado nas laterais que permite a aplicação de temperatura mediante água. A função do cilindro interno é o posicionamento dos fios de NiTi. E por último, na parte externa do atuador, temos o medidos de ângulo de torção, como mostrado na figura 3.

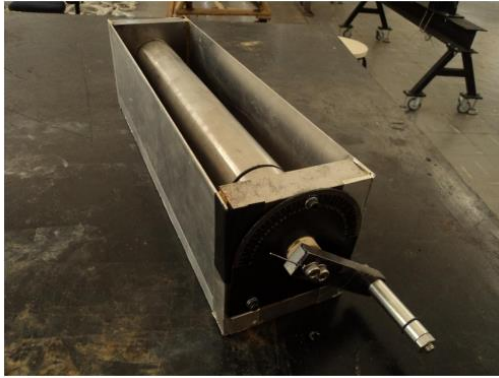


Figura 2: Atuador Torcional

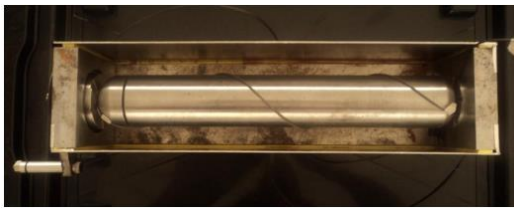


Figura 3: Fio de NiTi posicionado no Atuador Torcional.

Inicialmente realizaram-se experimentos nos fios de NiTi para avaliar a livre recuperação de forma, utilizando a Banco de Prova Linear. Com o intuito de medir a força que o fio exerce quando recupera sua forma, o mesmo foi deformado plasticamente aplicando uma carga suficiente e depois descarregado. Em seguida, a temperatura é aumentada acima da A_f e, mantendo o fio fixado no banco de prova linear (inibindo a deformação), é medida a força exercida pelo fio.

Ao realizar este ensaio no banco de prova linear para o fio de 1 mm foi obtida a curva mostrada na Figura 4.a. Observa-se que a força gerada pela recuperação da forma é de 280 N. No caso do fio de 2 mm, a Figura 5.b mostra que a força gerada pela recuperação da forma é de 1100 N, aproximadamente quatro vezes maior que a força do fio de 1 mm. Esse resultado é coerente devido a que a área da seção transversal do fio de 2 mm é quatro vezes maior do que a de 1 mm.

Em termos de tensão, como previsto, na figura 5 podemos ver que ambos os fios apresentam o mesmo valor de 350 MPa, sendo essa a tensão originada pela tendência de recuperação total até o comprimento inicial do material.

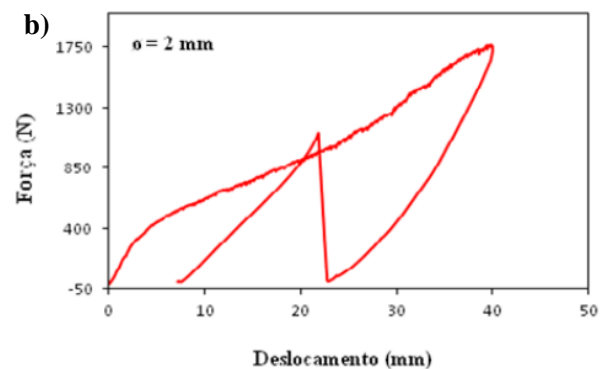
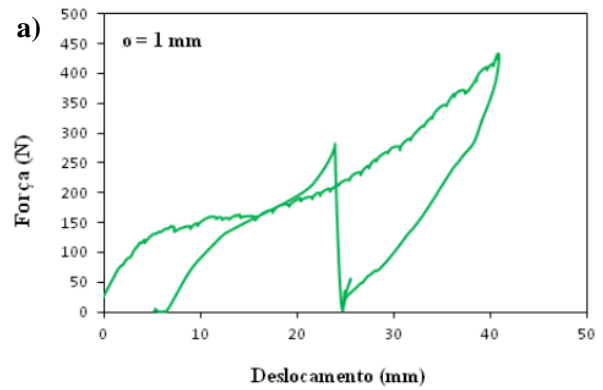


Figura 4: Curva de Força vs. Deslocamento gerada na recuperação da forma pelo fio de a) 1 mm, e b) 2 mm.

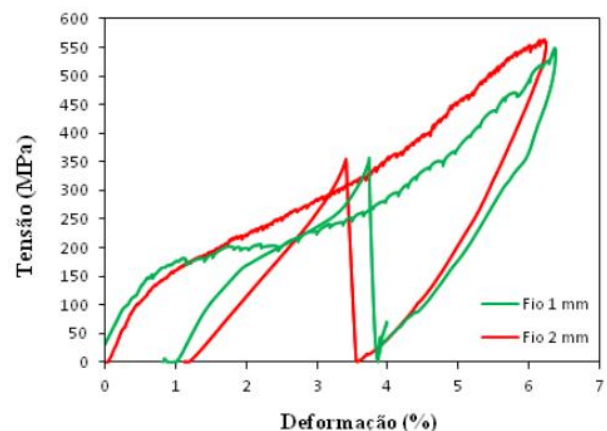


Figura 5: Curva de Tensão vs. Deformação dos fios de 1 e 2 mm, na recuperação da forma.

Para os ensaios no atuador torcional os fios foram separadamente deformados 6% do comprimento inicial (528 mm) no banco de prova linear.

A seguir, foram montados separadamente cada fio no atuador torcional para executar as medições do deslocamento angular. Foram realizados dois ensaios para cada fio (1 mm e 2 mm), aplicando calor suficiente para atingir uma temperatura acima da mudança de fase (88°C).

No primeiro ensaio do fio de 1 mm inicialmente o atuador torcional estava num ângulo de 60° (Fig. 6.a) e após a aplicação da temperatura de transformação no atuador esse ângulo foi alterado para 42° (Fig. 6.b), consequentemente o deslocamento angular do atuador foi de 18° . O segundo teste no fio de 1 mm teve resultados similares, o ângulo inicial foi de 30° (Fig. 6.c) e após a aplicação de temperatura o ângulo foi de 12° (Fig. 6.d), obtendo no final um deslocamento angular de 18° .

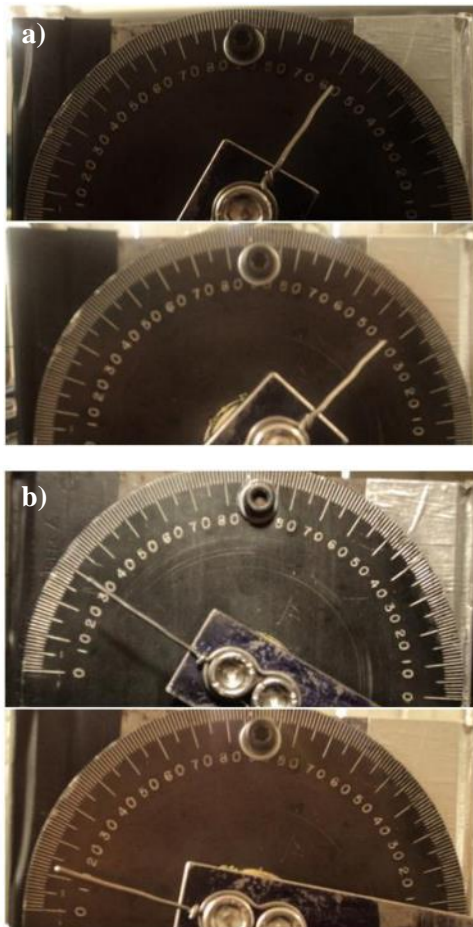


Figura 6: Resultado de Deslocamento Angular no Atuador Torcional em fio de 1 mm.

Nos ensaios do fio de 2 mm houve uma diferença entre os dois resultados: no primeiro teste o deslocamento angular foi de 19° (Figura 7.a e 7.b), enquanto no segundo ensaio o deslocamento angular foi 16° (Figura 7.c e 7.d). Essa diferença é atribuída ao fato de que a posição do fio no atuador não é exatamente igual em ambos os casos (os ângulos de enrolamento não são iguais).

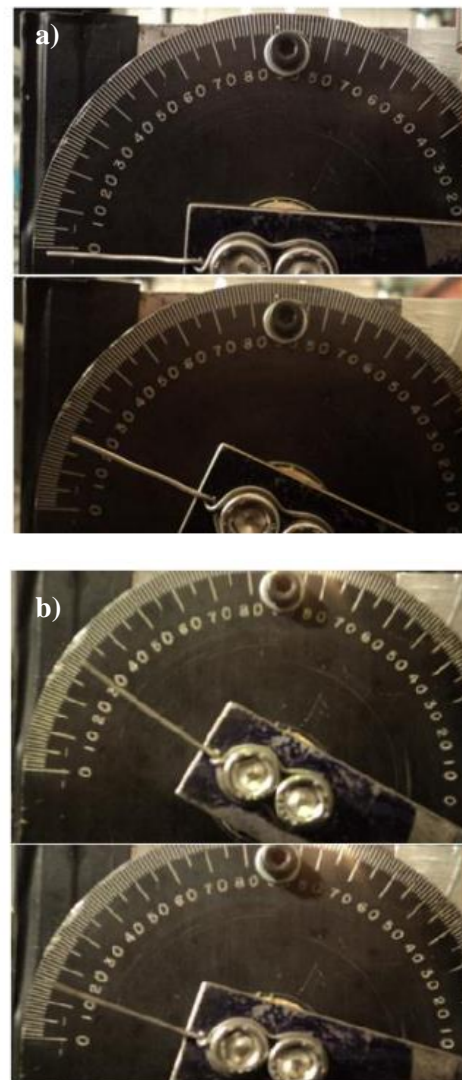


Figura 7: Resultado de Deslocamento Angular no Atuador Torcional em fio de 2 mm.

De forma geral o deslocamento angular de todos os ensaios nos fios de 1 mm e 2 mm foram semelhantes, isto ocorre porque os fios apresentaram a mesma deformação total de 6% no banco de prova linear e os comprimentos dos fios no atuador são iguais (528 mm).

Os fios analisados são de diferentes diâmetros e, consequentemente, proporcionam diferentes forças. Entretanto, o deslocamento angular é cerca de 18° em todos os casos, isto pelo fato dos fios serem do mesmo material e terem sido deformados 6% a partir do seu comprimento inicial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS:

O deslocamento angular experimental do atuador torcional foi de 18° para ambos os fios de 1 mm e 2 mm, com uma

pequena discrepância em um dos ensaios. Esta diferença pode ser explicada pela dificuldade de posicionar o fio de forma exatamente igual em cada um dos testes.

Embora as forças de recuperação sejam diferentes para os fios de 1 mm e 2 mm, as tensões resultantes são similares devido a que esse parâmetro depende também da área transversal. Conseqüentemente, o diâmetro do fio interfere diretamente na força que este proporciona e por essa razão é necessário um fio com diâmetro maior para obter uma força maior. Entretanto, o diâmetro do fio não pode ser muito elevado porque haveria dificuldade de enrolamento no cilindro do atuador.

Existe também uma influência direta entre a deformação aplicada no fio antes da recuperação com o deslocamento angular do atuador. Quanto maior for a deformação prévia, maior será a deflexão, e levando em consideração que as ligas NiTi podem ser deformadas até 9% para ter uma recuperação completa.

Observa-se também que o tempo de resposta na recuperação de forma do fio depende diretamente no fornecimento do calor. Com o banco de prova linear é possível a deformação dos fios e a análise dos dados de recuperação de forma, comprovando assim os dados fornecidos pela literatura¹¹.

Em resumo, comprova-se que o desempenho do atuador torcional proporciona dados de deslocamento angular bastante interessantes para aplicações práticas, ampliando o leque de utilização da recuperação de forma do fio de NiTi.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. **LAGOUDAS, D. C.** Shape memory alloys modeling and engineering applications. New York, NY: Springer, 2008.
2. **OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M.** Shape memory materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
3. **EPPS, Jeanette J.; CHOPRA, Inderjit.** In-flight tracking of helicopter rotor blades using shape memory alloy actuators. *Smart Materials and Structures*, v. 10, p. 104-111, 2001.
4. **LUI, Y.; GALVIN, S. P.** Criteria for pseudoelasticity in near-equiatomic NiTi shape memory alloys. *Acta Materialia*, v. 45, n. 11, p. 4431-4339, 1997.
5. **MELTON, K. R.** General applications of shape memory alloys and smart materials. In: OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. (Eds.). *Shape memory materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. Ch. 10, p. 220–239.
6. **HARTL, Darren; LAGOUDAS, Dimitris C.** Aerospace applications of shape memory alloys. College Station, Texas: Aerospace Engineering Department, Texas A&M University
7. **PAIK, Jamie K.; HAWKES, Elliot; WOOD, Robert J.** A novel low-profile shape memory alloy torcional actuator. Cambridge: School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, 2010.
8. **SOFLA, A.; ELZEY, D.; WADLEY, H.** An antagonistic flexural unit cell for design of shape morphing structures. In: ASME AEROSPACE DIVISION: ADAPTIVE MATERIAL AND SYSTEMS, AEROSPACE MATERIALS AND STRUCTURES CONFERENCE, 2004, Anaheim. Proceedings...New York: ASME, 2004.
9. **ELZY D.; SOFLA A.; WADLEY H.** A bio-inspired, high authority actuator for shape morphing structures. PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING: SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 2003, San Diego. Proceedings... Bellingham, WA: SPIE, 2003. v. 5053, p. 92-100.
10. **GEORGES, T.; BRAILOVSKI, V.; MORELLON, E.; COUTU, D.; TERRIAULT, P.** Design of shape memory alloy actuators for morphing laminar wing with flexible extrados. *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the

ASME, v. 131, n. 9, p. 0910061- 0910069, Sep., 2009

11. **ANTUNES, A. S.** Caracterização do efeito de memória de forma, em fio e tiras, obtidos a partir de liga NiTi, de 150 mm de diâmetro, elaborada em forno de fusão por feixe de elétrons. 2010. Tese (Mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.