

## **Estudo da aplicação de ligas com memória de forma como atuadores em um robô cobra**

### **Study of the application of shape memory alloys as actuators in a snake robot**

DOI:10.34117/bjdv8n5-068

Recebimento dos originais: 21/03/2022

Aceitação para publicação: 29/04/2022

#### **Luciana Primo Lodetti**

Bacharel em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Federal de Rondonópolis

Endereço: Avenida dos Estudantes, 5055, Cidade Universitária, Rondonópolis-MT

CEP: 78736-900

E-mail: luciana\_lodetti@hotmail.com

#### **Edson Godoy**

Mestre em Engenharia Agrícola

Instituição: Universidade Federal de Rondonópolis

Endereço: Avenida dos Estudantes, 5055, Cidade Universitária, Rondonópolis-MT

CEP: 78736-900

E-mail: godoy.edson@ufr.edu.br

#### **Vanessa Motta Chad**

Doutora em Engenharia de Materiais

Instituição: Universidade Federal de Rondonópolis

Avenida dos Estudantes, 5055, Cidade Universitária, Rondonópolis-MT

CEP: 78736-900

E-mail: vanessa.chad@ufr.edu.br

#### **Marcia Moreira Medeiros**

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais

Instituição: Universidade Federal de Rondonópolis

Endereço: Avenida dos Estudantes, 5055, Cidade Universitária, Rondonópolis-MT

CEP: 78736-900

E-mail: marcia.medeiros@ufr.edu.br

### **RESUMO**

As ligas com memória de forma apresentam a capacidade de agir como atuadores e, assim, substituir servomecanismos em um robô cobra, promovendo aumento do desempenho, redução de peso e geometria do robô. Em virtude disso, foram estudadas as ligas comercialmente disponíveis, seus diferentes formatos e como os robôs são capazes de se locomover. Ademais, fabricantes foram consultados para avaliar a diferença no uso de fios, fitas e molas e qual o material a ser adquirido para a liga. Com base nas propriedades mecânicas e elétricas que cada formato possui e na versatilidade do material, escolheu-se utilizar molas compostas de NiTi. Em seguida, por meio de ensaios mecânicos, foi avaliado o comportamento da liga quando aplicada uma corrente elétrica - meio de acionamento da mudança de forma. Com os testes realizados, pode-se concluir

que as correntes baixas tornaram o acionamento mais lento e apresentaram um comportamento inesperado.

**Palavras-chave:** materiais inteligentes, nitinol, servomecanismos.

## ABSTRACT

Shape memory alloys have the ability to act as actuators and thus replace servomechanisms in a snake robot, promoting increased performance and reduced weight and geometry of the robot. As a result, commercially available alloys, their different formats and how the robots are able to move were studied. In addition, manufacturers were consulted to assess the difference in the use of wires, ribbons and springs and which material to purchase for the alloy. Based on the mechanical and electrical properties that each format has and the versatility of the material, we chose to use NiTi composite springs. Then, by means of mechanical tests, the behavior of the alloy was evaluated when an electric current was applied - a means of activating the change of shape. With the tests carried out, it can be concluded that the low currents made the activation slower and presented an unexpected behavior

**Keywords:** smart materials, nitinol, servomechanisms.

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação de ligas com memória de forma como atuador é capaz de substituir servomecanismos tradicionais em robôs, o que acarreta na redução do peso e das dimensões do equipamento, além de aumentar o desempenho. Com o avanço de tecnologias e materiais inteligentes, torna-se possível que um mecanismo replique o comportamento de diferentes espécies animais.

Inspirado em uma água-viva, o protótipo denominado *JellyRobcib* é formado por cinco molas com memória de forma, as quais exercem a função de atuadores realizando os deslocamentos vertical e lateral. O modelo apresenta 22 cm, sendo constituído de Ecoflex®, uma base de silicone altamente flexível. Na região central, fundida ao corpo, há apenas uma mola. Ao seu redor, são dispostas outras quatro, separadas entre si por um ângulo de 90°. Um controlador *Fuzzy* é capaz de determinar o grau e o tempo de contração do material, o que gera aumentos de movimentos, aceleração e picos de velocidades, podendo atingir até 2,5 cm/s (ULLOA; TERRILE; BARRIENTOS, 2020).

A construção de um robô cobra é mais acessível, diversificada e envolve uma série de anéis interligados para compor o corpo. A locomoção ocorre por servomecanismos mecânicos, os quais determinam o grau de liberdade do movimento de acordo com a arquitetura das juntas (PETTERSEN, 2017; WRIGHT, 2012). Com a criação de um robô cobra é possível acessar locais de difíceis acessos, reconhecer terrenos acidentados,

inspecionar tubulações, coletar amostras em rios e solos e analisar dutos de petróleo e gás (BENITES, 2019).

O atuador é o elemento final de uma linha de controle e responde a um comando recebido, sendo classificado conforme a energia de saída, o princípio de funcionamento e o tipo de movimento. Seu funcionamento implica na conversão de energia em movimento e/ou força, necessitando de um sinal de controle e uma fonte de energia (MECÂNICA INDUSTRIAL, [2020]). O servomecanismo compõe a classe de atuadores eletromecânicos, sendo capaz de executar movimentos independentes e com grande precisão (CRAVO, [2021]).

Memória de forma é a habilidade que alguns materiais têm de recuperar a forma original quando aplicado um estímulo específico, como o calor ou tensão, após sofrer uma deformação plástica. Esse efeito é caracterizado por uma transformação de fase martensítica, que é uma transformação de fase de sólido para sólido onde o parâmetro de rede ou a estrutura molecular muda abruptamente em uma determinada temperatura. As ligas com memória de forma (LMF) são ligas metálicas que sofrem essa transformação martensítica devido à aplicação de cargas termomecânicas e são capazes de memorizar e recuperar sua forma original, após serem deformadas, através do aquecimento acima de sua temperatura de transformação martensítica (PATOOR, 2006; HUANG, 1998).

A liga com memória de forma se altera facilmente quando está na martensita e permite o deslocamento do cristal sem que haja deformação permanente. Ao aquecer a liga acima de sua temperatura de transição, os cristais mudam para a fase austenítica e retornam à forma original com grande energia. Quando é resfriada abaixo de sua temperatura de transição, os cristais migram para a estrutura martensítica e a liga pode ser deformada novamente, sem a perda de propriedades (ROCHA, 2013). No entanto, vale ressaltar que nem todas as transformações de fase martensítica são reversíveis. As chamadas transformações não-termoelásticas, que geralmente ocorrem em ligas de ferro, estão associadas a uma interface da fase martensítica não-móvel, sujeita a defeitos permanentes e sucessiva nucleação da austenita durante a transformação da martensita para a austenita. Essas transformações são cristalograficamente não-reversíveis, ou seja, a martensita não pode voltar à sua orientação original. As transformações de fase martensíticas onde se observa o efeito de memória de forma (EMF) são chamadas de transformações termoelásticas, sendo basicamente transformações cristalograficamente reversíveis (PATOOR, 2006; HUANG, 1998; BHATTACHARYA, 2003; VAN HUMBEECK.; CHANDRASEKARAN; DELAEY, 1991).

Unidos à memória de forma, os robôs cobras apresentam uma alta relação resistência x peso e uma construção mais acessível quando comparada à utilização de outros atuadores. É um sistema silencioso, com baixa tensão de condução, compacto e tem controle de posição e força. A essência do funcionamento é a percepção de como a liga se comporta, e não de um modelo matemático, facilitando a programação dos movimentos e a portabilidade do sistema (KHEIRIKHAH; RABIEE; EDALAT, 2010).

## 2 METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica e consulta a fabricantes de LMF com o intuito de elencar as propriedades mecânicas e elétricas de diferentes formatos (fios, fitas e molas).

Unindo as informações levantadas e a viabilidade econômica, optou-se por molas Flexinol®, uma liga composta de NiTi e fabricada pela empresa Dynalloy®. As molas apresentam fio de 0,381 mm de diâmetro, diâmetro externo de 2,54 mm e temperatura de acionamento do efeito de memória de forma em 90 °C. Cada mola possui 40 espiras e ganchos.

### 2.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Eletrônica e Automação, pertencente ao Instituto de Ciência Agrárias e Tecnológicas (ICAT) da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR). Obteve-se a variação do comprimento da mola quando acionada, informação importante para sua função como atuador, e foram estabelecidos alguns dos limites de operação da liga.

No software Inventor®, da Autodesk®, fez-se o desenho da bancada de teste, e posteriormente as partes foram produzidas em uma impressora 3D Makerbot® modelo Replicator (2) utilizando filamento de ácido polilático (PLA).

Foram impressos dez discos de carga com massa de aproximada de 14g cada, sendo a carga máxima recomendada pelo fabricante de 140g. Como a massa pode variar na impressão, os discos foram pesados individualmente e adicionados em dupla no suporte. Para cada carga testada, três medidas foram realizadas.

As dimensões da bancada foram baseadas no quanto a liga pode se deformar, conforme as informações do fabricante. Na Figura 1 é apresentada a bancada de teste impressa, o posicionamento da mola, os discos de carga e os cabos condutores de eletricidade: o cabo vermelho (tensão positiva) em contato diretamente com um “clips”,

o qual sustentava o material com memória de forma, e o cabo preto (tensão negativa) conectado entre a união da mola com o suporte de carga. Além disso, há uma escala graduada de 61 cm anexada à estrutura.

Figura 1 - Bancada de teste.



Fonte: (Elaborada pela autora).

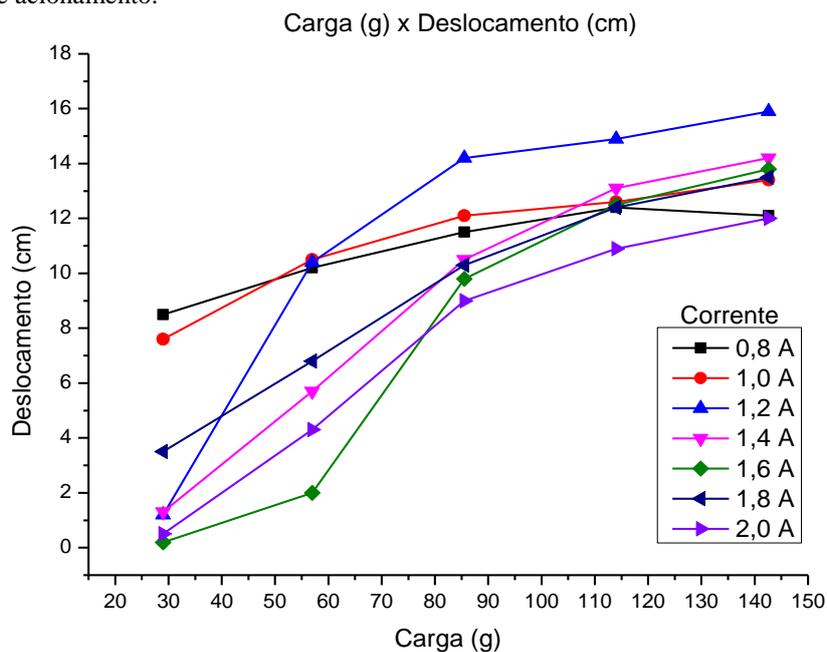
Uma fonte de alimentação Instrutemp ITFA 5000 foi responsável por fornecer as correntes de acionamento: 0,8 A, 1,0 A, 1,2 A, 1,4 A, 1,6 A, 1,8 A e 2,0 A. O primeiro teste de cada corrente foi chamado de “calibração”, sendo desconsiderado no cálculo da média, a qual totalizou 16 experimentos. Para cada corrente, utilizou-se uma mola nova.

Com o auxílio da escala, a posição inicial (em repouso) e a posição final (acionada) foram identificadas e o deslocamento foi calculado através da subtração dessas medidas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2, tem-se o comportamento da liga com memória de forma nas diferentes correntes de ativação.

Figura 2 - Gráfico comportamental do deslocamento médio da mola com variação de carga adicionada para as correntes de acionamento.



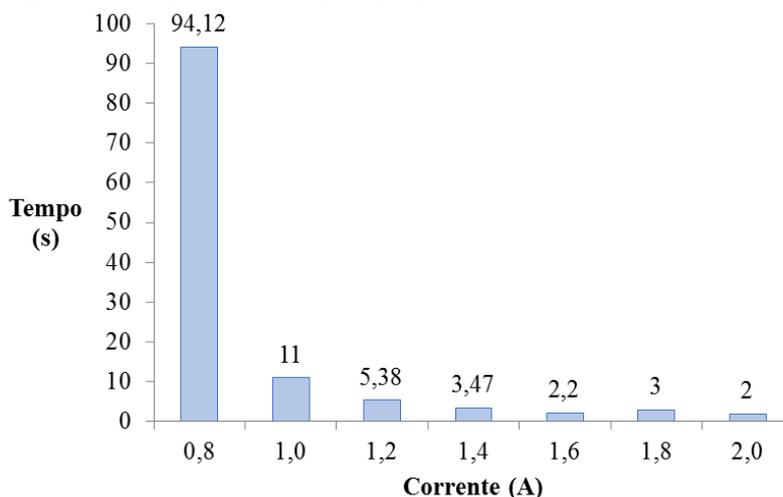
É possível observar nas curvas obtidas da Figura 2, que a liga com memória de forma (formato de mola) ensaiada nas correntes de 1,2 A, 1,4 A, 1,6 A e 2 A, quase não apresentou alongamento na carga de 30g. Com o acréscimo de carga, verificou-se que em até 85,5g ocasionou uma extensa variação na média do deslocamento, o qual, posteriormente, manteve-se sem muitas alterações. Em contrapartida, as correntes mais baixas (0,8 e 1,0 A) apresentaram longa distensão inicial e menor variação no comprimento. É importante mencionar que, em correntes baixas, as molas apresentaram um comportamento inesperado: ao acionar a carga no primeiro teste, a mola se distendeu, contraiu e, depois, distendeu novamente.

De forma geral, observa-se que, para cada incremento de carga, tem-se um pequeno esticamento da mola. Quando a corrente é aplicada, a mola tende a contrair até seu tamanho inicial, no entanto, com acréscimo de massa, sempre há uma pequena variação. Essa diferença pode ser observada em torno de 1 cm na corrente de 0,8 A e 2,5 cm na corrente de 2 A.

Os pulsos de correntes mais elevadas provocaram maior alteração no deslocamento da liga e menor tempo médio para acionamento da memória de forma. Na Figura 3, observa-se que a corrente de 0,8 A apresentou um valor muito discrepante, o que pode ter ocorrido em virtude do lento aquecimento da liga até atingir a temperatura de acionamento da memória de forma (90°C). Supõe-se que o aquecimento abaixo da

temperatura de ativação, com a presença de uma carga, fez com que a mola distendesse inicialmente. Após alcançar 90°C, a memória de forma foi acionada e ocasionou a contração do material.

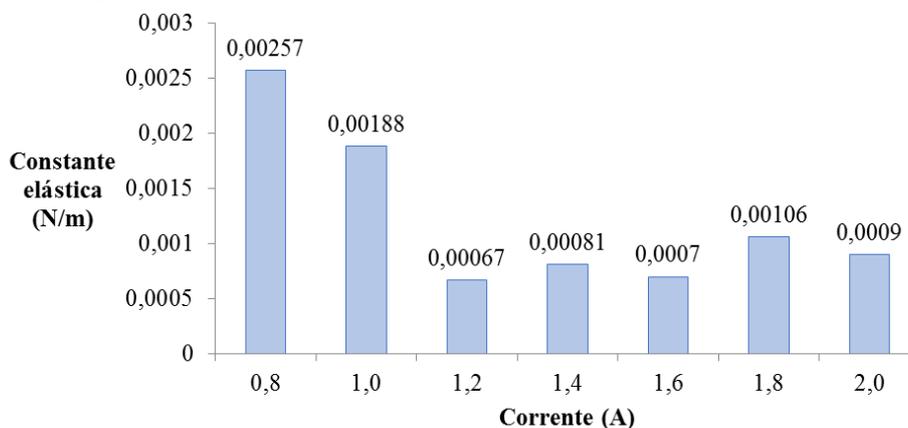
Figura 3 – Tempo médio de aplicação para cada corrente de acionamento.



Fonte: (Elaborada pelos autores).

Ao transformar as curvas da Figura 2 em uma equação linear, calculou-se, por meio de uma função no Microsoft Excel®, a inclinação da reta para cada acionamento, sendo posteriormente admitida como a constante elástica. Ao observar a Figura 4, infere-se que as correntes de 0,8 A e 1,0 A apresentaram as maiores constantes elásticas. Portanto, é necessária uma carga maior para que o comprimento varie durante esses valores de ativação, os quais podem ter afetado a constante em razão da mola ter demonstrado uma distensão acentuada antes de contrair.

Figura 4 - Valor da constante elástica para cada corrente de acionamento.



Fonte: (Elaborada pelos autores).

As molas ensaiadas nas correntes de 1,2 e 1,6 A exibiram menores valores de constante elástica (N/m), ou seja, menores valores de rigidez. Nestas correntes, houve um comportamento não esperado, pois de acordo com a literatura, tem-se um aumento da rigidez à medida que a corrente se amplia (OLIVEIRA, 2007). Em 2,0 A, como estava próximo de se atingir o limite máximo do fabricante, justifica-se a queda da constante.

Para efeito comparativo, analisou-se um experimento em uma mola de NiTi, com 0,508 mm de diâmetro do fio e 6 mm diâmetro externo realizado por Fernandes (2014). Por meio de um equipamento de compressão, as constantes elásticas foram mensuradas para a temperatura ambiente (25°C) e de término da transformação austenítica (50°C), sendo, respectivamente, 0,000395 e 0,000611 N/m.

A constante elástica é afetada por um fator geométrico, preestabelecido pela estrutura cristalina, o qual gera modificações na tensão de cisalhamento e na deformação. A austenita é menos flexível, conseqüentemente, oferece maior resistência à deformidade e estabelece valores mais elevados. Conforme mencionado anteriormente, à medida que há um acréscimo de carga, as molas tendem a apresentar maior rigidez (OLIVEIRA, 2007).

#### 4 CONCLUSÃO

A liga ensaiada com memória de forma nas diferentes correntes de ativação não apresentou alongamento na carga de 30g nas correntes 1,2 A, 1,4 A, 1,6 A e 2 A. Em contrapartida, nas correntes mais baixas (0,8 e 1,0 A), a liga apresentou longa distensão inicial e menor variação no comprimento.

A aplicação de correntes mais elevadas provocou maior alteração no deslocamento da liga e menor tempo médio para acionamento da memória de forma.

As molas ensaiadas nas correntes de 1,2 e 1,6 A exibiram menores valores de constante elástica (N/m), ou seja, menores valores de rigidez. Nestas correntes, houve um comportamento não esperado, pois de acordo com a literatura, tem-se um aumento da rigidez à medida que a corrente se amplia (OLIVEIRA, 2007). Em 2,0 A, como estava próximo de se atingir o limite máximo do fabricante, justifica-se a queda da constante.

## REFERÊNCIAS

BENITES, M. A. C. **Estudo da utilização de ligas com efeito memória de forma em atuadores de veículos aéreos não tripulados**. 52 f. (Monografia) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, 2019.

BHATTACHARYA, K. Microstructure of martensite : why it forms and how it gives rise to the shape-memory effect. In: **Oxford series on materials modelling**. New York: Oxford University Press, 2003. cap. Capítulo 1, 288 p

CRAVO, E. O que é um servo motor, como funciona e quais as vantagens? **Kalatec Automação**, [2021]. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/o-que-e-servo-motor/>>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

FERNANDES, G. F. **Construção e caracterização de mola helicoidal com memória de forma aplicada em um atuador linear termoativado**. 2014. 45 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

HUANG, W. **Shape memory alloys and their application to actuators for deployable structures**. 175 f. (Tese de doutorado) – Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, 1998.

KHEIRIKHAH, M. M.; RABIEE, S.; EDALAT, M. E. **A review of shape memory alloy actuators in robotics**. RoboCup International Symposium, p. 207-217, 2010.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Para que servem os atuadores?**, [2020]. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/374-para-que-servem-os-atuadores/>>. Acesso em: 24 de set. de 2020.

OLIVEIRA, C. A. do N. **Caracterização termoelástica de atuadores helicoidais da liga Cu-Zn-Al com memória de forma**. 2007. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PATOOR, E. et al. Shape memory alloys, part I: general properties and modeling of single crystals. **Mechanics of Materials**, v. 38, n. 5-6, p. 391-429, 2006.

PETTERSEN, K.Y. **Snake robots**. Annual Reviews in Control. v. 44, p. 19-44, 2017.

ROCHA, D. A. M. M. G. et al. **Ligas com memória de forma. Como se educa uma liga com memória de forma?** Portugal, 2013. p. 17.

ULLOA, C. C.; TERRILE, S.; BARRIENTOS, A. **Soft underwater robot actuated by shape-memory alloys “JellyRobcib” for path tracking through fuzzy visual control**. Applied Sciences. p. 22, 2020

VAN HUMBEECK, J.; CHANDRASEKARAN, M.; DELAEY, L. Shape memory alloys - materials in action. **Endeavour**, v. 15, n. 4, p. 148-154, 1991.

YAMADA, H.; TAKAOKA, S.; HIROSE, S. **A snake-like robot for real-world inspection applications (the design and control of a practical active cord mechanism)**. Advanced Robotics. v. 27, n. 1, p. 47-60, 2013.