

## PROJETO DE GARRA DE MANIPULADOR ROBÓTICO ACIONADA POR LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA (SMA)

Lincon Cardoso Gabriel, lincon\_cardoso@hotmail.com<sup>1</sup>

Marco Túlio Santana Alves, marco.alves@ufba.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Prof. Aristides Novis, 2, Federação CEP. 40.210-630, Salvador-BA-Brazil

**Resumo.** Com o objetivo de verificar e aplicar conceitos relacionados às Ligas de Memória de Forma (SMA) este trabalho apresenta um modelo proposto de Garra Robótica acionada por uma mola Nitinol. Para a realização de trabalho mecânico, esse modelo utiliza como princípios o Efeito Memória de Forma e o Efeito Joule, além relações básicas de mecanismos.

A metodologia composta por modelagens, simulações computacionais e ensaios de caracterização do material possibilitou a obtenção de parâmetros físicos referentes ao funcionamento do do modelo proposto.

Por se tratar de um trabalho preliminar, os resultados parciais obtidos indicam que as características das SMA alinham-se à aplicação proposta. Nota-se a necessidade e a possibilidade de desenvolver novos métodos e ensaios para o aperfeiçoamento do modelo, ao ponto de que possa ser utilizado em situações que requerem pequenas dimensões e baixo peso.

**Palavras chave:** Liga de Memória de Forma. Efeito Memória de Forma. Garra robótica. Atuador robótico. Simulação Computacional.

**Abstract.** In order to verify and apply concepts about Shape Memory Alloys (SMA) this work presents a proposed model of Robotic Claw powered by a Nitinol spring. To perform mechanical work, this model uses the Shape Memory Effect and Joule heating as principles, in addition to basic mechanical mechanisms.

The methodology consists of 3D modeling, computer simulations and material characterization. Thus, it is possible to obtain physical parameters about the operation of the proposed model.

As it is a preliminary work, the partial results obtained indicate that the characteristics of SMA are in agreement to the proposed application. There is a need to develop new methods and tests to improve the model, aiming at use in situations that require small dimensions and low weight.

**Keywords:** Shape Memory Alloys, SMA, Robotic Claw, Robotic Manipulator, Computer Simulation

### 1. INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (Shape Memory Alloys) fazem parte de um grupo chamado materiais inteligentes. A principal característica dos materiais pertencentes a esse grupo é associar diferentes domínios físicos (Leo, 2007). No caso das SMA (da sigla em inglês), os domínios associados são o térmico e mecânico, ou seja, através da variação de temperatura altera-se também a estrutura do material gerando tensões e deformação.

O Efeito de Memória de Forma é a propriedade que fornece à liga a capacidade se recuperar de deformações residuais através do aquecimento acima de uma temperatura crítica. Outra importante característica da SMA é o Efeito Pseudoelástico, pelo qual o material pode sofrer grandes deformações durante o carregamento mecânico e se recuperar totalmente após sua retirada (Leo, 2007).

Atualmente, as ligas SMA são utilizados em diversas áreas, como as indústrias automobilística e aeroespacial, sistemas robóticos e dispositivos médicos, a exemplo dos stents cardíacos (Chopra and Sirohi, 2013). Algumas das vantagens das SMAs nessas aplicações em comparação a atuadores convencionais são suas dimensões reduzidas, versatilidade de design e boa relação da força de atuação versus peso (Chopra and Sirohi, 2013).

Alguns exemplos das ligas com memória de forma mais conhecidas, e exploradas comercialmente, são as ligas de Níquel-Titânio(Nitinol) e as baseadas no cobre, como a CuAl e CuZn. Essas ligas podem ser encontradas em forma de fios, tubos e placas, o que torna amplo o campo de possíveis aplicações. A demanda por esses materiais tem crescido nas últimas décadas, especialmente a liga Nitinol, impulsionada pela utilização no setor biomédico (Ozbulut *et al.*, 2011).

Analisando o desenvolvimento dos setores biomédico e robótica, vemos o aumento no uso de robôs na realização de

cirurgias, o que possibilita operações menos invasivas, seguras e de grande precisão. Braços e pinças robóticas permitem um maior controle de movimentos e destreza em relação a cirurgias minimamente invasivas tradicionais (laporoscópica) (Domene, 2014).

Apesar das vantagens em relação à cirurgia tradicional, as plataformas atuais ainda são protótipos e não atingem um estado ótimo. Sendo assim, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para solucionar limitações existentes, a exemplo dos altos custos, restrição de dimensões e necessidade de transmissão efetiva de forças aos instrumentos (Díaz *et al.*, 2015). Nesse contexto, as Ligas de Memória de Forma, mostram-se uma alternativa promissora em aplicações que requerem baixo peso, pequenas dimensões e alta precisão.

Visando a ampliação da utilização dessas ligas como atuadores, este trabalho dedica-se a estudar as questões teóricas e práticas relacionadas às SMA. O objetivo deste estudo é correlacionar essas propriedades com a realização de trabalho mecânico através da utilização de molas de SMA no acionamento de garras robóticas. Para isso, propõe-se aplicar e validar conceitos através de simulações numéricas, ensaios e protótipos.

A seguir, serão apresentados na Fundamentação Teórica os principais conceitos relacionados à liga SMA que foram foram estudados, em especial, o Efeito Memória de Forma. Também estão estruturados nas seções seguintes, a metodologia utilizada e os resultados parciais obtidos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conforme apresentado anteriormente, as duas principais características que tornam as ligas SMA especiais são os Efeitos Pseudoelástico e Efeito Memória de forma. Sendo assim, faz-se necessário entender como e por que esses fenômenos ocorrem.

As SMAs podem se encontrar em três fases, a Austenita, Martensita Maclada e Martensita Demaclada. Essas fases se alternam a depender da temperatura e tensões aplicadas. Em um estado livre de tensões e altas temperaturas, o material se encontra na sua fase austenítica, que ao ser resfriada se converte em Martensita Maclada (Twinned), uma estrutura multivariante. Em casos em que o resfriamento ocorre sob tensão, a fase obtida é a Martensita Demaclada (Detwinned), de estrutura alinhada numa direção predominante com uma única variante (Alves, 2015). As suas estruturas são representadas na Fig. 1 a seguir.

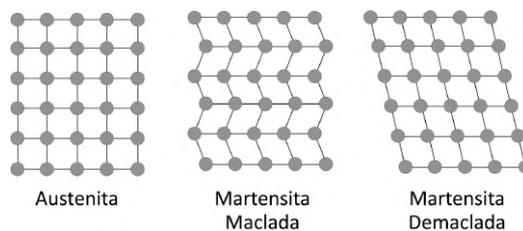


Figura 1. Estruturas cristalinas de ligas SMA

Essas fases podem coexistir, são estáveis em temperaturas específicas e, na maioria dos materiais, obedecem a ordem  $M_f < M_s < A_s < A_f$ . Onde  $M_s$  e  $M_f$  indicam, respectivamente, a temperatura inicial e a temperatura final de transformação de martensita, enquanto  $A_s$  e  $A_f$  indicam a temperatura inicial e a temperatura final de transformação de austenita (Chopra and Sirohi, 2013). Além da variação de temperatura, carregamentos também podem induzir a transformação entre as fases dessas ligas. Sendo assim, o fenômeno da Transformação de Fase é o responsável pelos efeitos que as SMA apresentam (Leo, 2007).

### 2.1 Efeito Pseudoelástico

A pseudoelasticidade é caracterizada pela alta capacidade que as ligas possuem em se recuperar de deformações (de até 8%) e retornarem ao estado original após a retirada o carregamento que a causou. Contudo, esse efeito está restrito a altas temperaturas ( $T > A_f$ ), condição na qual martensita não é mais estável.

A explicação para esse fenômeno é dada pela transformação induzida pelas tensões. Ao aplicar um carregamento, ocorre a deformação elástica da austenita e, em seguida, a austenita é convertida em martensita demaclada. Por fim, ao retirar o carregamento, a fase martensítica (instável) retorna ao estado de austenita e fecha o ciclo retomando o estado inicial. (Alves, 2015)

### 2.2 Efeito Memória de Forma

O Efeito Memória de Forma, caracteriza-se pela capacidade da liga em deformar-se em baixas temperaturas ( $T < M_f$ ), exibindo deformação residual, e recuperar a sua forma original ao ser aquecida. Esse é o principal efeito sobre o qual este trabalho se desenvolve.

Como, nesse caso, a solicitação mecânica ocorre em um estado onde a martensita é a fase estável, ao ser tensionada a martensita inicialmente maclada (livre de tensões) se deforma elasticamente e, posteriormente, se transforma em martensita demaçada. Ao ser removido o carregamento, a liga recupera a deformação elástica e passa a exibir uma deformação residual resultante da transformação que ocorreu. Ao aquecer a liga acima de  $A_f$ , a martensita torna-se novamente instável e recupera sua forma original ao ser resfriada abaixo da  $M_f$  (Lagoudas, 2008).

No gráfico da Fig. 2, podemos observar que após a deformação isotérmica, o material passa a apresentar deformação residual e estrutura demaçada. Ao aquecer a liga, as deformações se reduzem gradativamente dado o início da formação de austenita e reorganização da estrutura. Resfriando a liga, obtém-se novamente a martensita maclada e o ciclo se fecha.

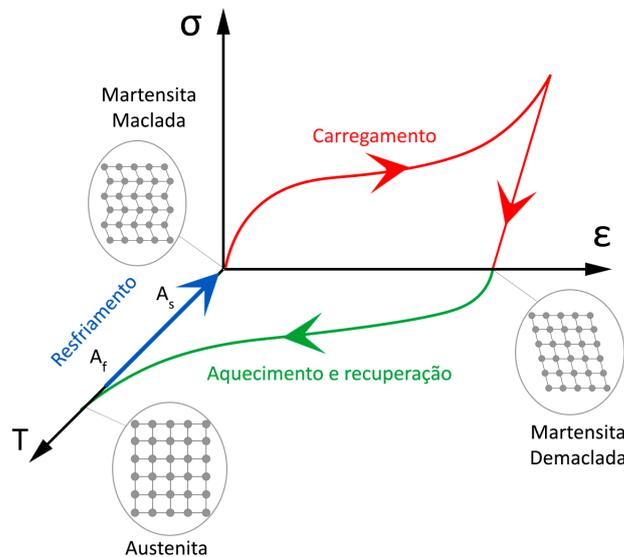


Figura 2. Gráfico que ilustra o Efeito de Memória de Forma

### 2.3 Efeito Joule

Sabe-se que, pelo chamado Aquecimento ou Efeito Joule, um condutor pelo qual circula corrente elétrica está sujeito à dissipação de energia térmica, gerada pela interação entre os elétrons livres e íons da rede do material (Tipler and Mosca, 2009). A potência dissipada por essa interação aquece o condutor e pode ser representada pela Eq. 1.

$$P = I^2 R \quad (1)$$

Onde  $P$  é a potência dissipada (Watt),  $I$  é a corrente que circula pelo condutor (Ampère) e  $R$  é a resistência elétrica do condutor (Ohm).

Tendo em vista que a variação de temperatura está relacionada a efeitos nas SMAs, pode-se concluir que as tensões e deformações dessas ligas podem ser controladas através da indução de corrente elétrica (Leo, 2007).

### 2.4 Cinemática e Geometria do Mecanismo

Para viabilizar a análise da cinemática do mecanismo proposto, foram adotadas equações simples e comumente utilizadas na Geometria Analítica e na Estática. Aplicou-se, por exemplo, relações entre ângulos, decomposição e soma vetores, equilíbrio de forças e de momentos.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Definição de Modelo e Geometrias

Após o embasamento necessário acerca dos fenômenos inerentes às SMAs, o passo seguinte em direção ao projeto da Garra Robótica foi construir um modelo conceitual que possibilitasse obter relações geométricas, utilizadas como norteadoras para o dimensionamento do projeto.

Para isso, foi definida a utilização de uma mola de Nitinol como atuador, um mecanismo de barras paralelas como braços acionadores e garras genéricas que podem ser modificadas ou acopladas a outros dispositivos. A partir do esquema proposto, foram realizadas modelagens no software SolidWorks, o que fornece visão 3D e noções de proporcionalidade entre as peças. A modelagem 3D também partiu do pressuposto de facilitar a fabricação de um protótipo, por isso utilizou-se medidas e componentes padronizados, além de priorizar a utilização de peças removíveis e de fácil adaptação.

Após ajustes dimensionais e de materiais, chegou-se ao protótipo virtual exibido na Fig. 3. Esse modelo, a princípio, busca verificar a aplicação dos conceitos e analisar o funcionamento do mecanismo, possuindo portanto maiores dimensões para que se adapte ao material disponível para ensaios.

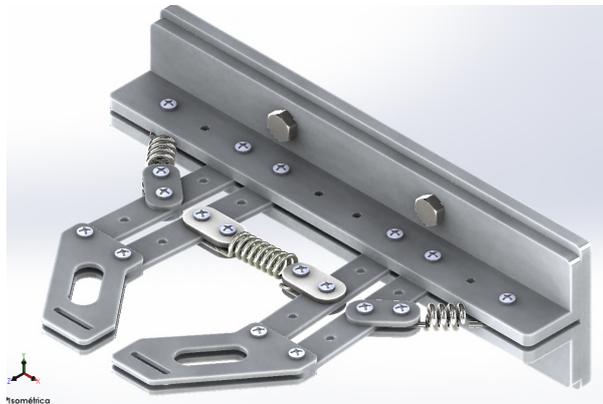


Figura 3. Protótipo virtual modelado no software SolidWorks

### 3.2 Simulação Computacional

A partir do modelo proposto e aplicação de geometria analítica, obteve-se equações que representam o comportamento físico do mecanismo. Posteriormente, plotou-se a Garra Robótica no software Scilab, gerando gráficos e esboços que possibilitam analisar o seu comportamento em diferentes cenários. Uma vez realizada a parametrização e inserção das equações no software, as medidas podem ser alteradas para simular o comportamento da Garra que seja mais adequado às necessidades de deslocamento ou força de atuação, por exemplo. Na Fig. 4 pode-se observar o modelo plotado no Scilab.

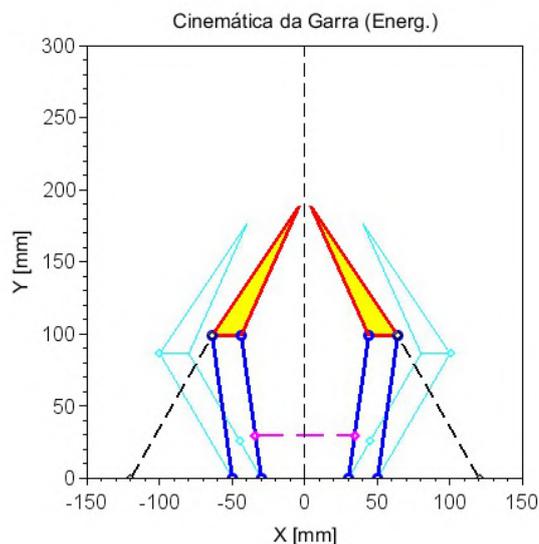


Figura 4. Modelo plotado com dimensões vinculadas no Scilab (em ciano a garra aberta)

### 3.3 Ensaios de Caracterização

O primeiro ensaio realizado teve como objetivo verificar a capacidade de atuação e o tempo de recuperação da mola de Nitinol. Ela foi distendida, fixada ao lado de um escalímetro e conectada a uma fonte de corrente contínua de 1A. Foi observado e registrado em vídeo o comportamento da mola em três situações: sem carga, elevando uma carga de 70g e elevando 140g. Os valores das massas foram aproximados utilizando-se como massa-padrão moedas de R\$1. Os deslocamentos e tempos de atuação foram destacados nos vídeos para posterior análise.

Em (Chopra and Sirohi, 2013), é apresentada uma montagem experimental, conforme a Fig. 5. O ensaio realizado utilizou montagem similar a essa, alterando-se materiais mas mantendo o conceito, como demonstrado na Fig. 6. Na ausência de termostato para avaliar a variação de temperatura, o estudo se deu em função do tempo.

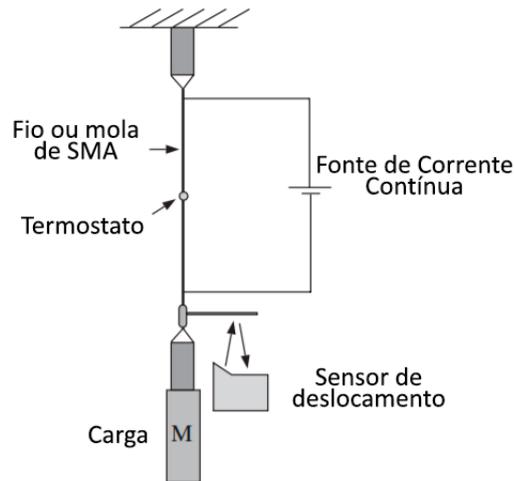


Figura 5. Montagem Experimental para mensurar tensões em função da temperatura (ou tempo) e carregamento constante - Adaptado de (Chopra and Sirohi, 2013)



Figura 6. Ensaio 1 -Capacidade de atuação e recuperação da Mola de Nitinol ao ser energizada - Frames retirados dos vídeos do Ensaio

As molas de tração helicoidais têm como função projetada realizar a reabertura das garras, gerando resistência à contração da mola de SMA. Diante de dificuldades em adquirir a mola adequada, optou-se por um material alternativo, o Elástico de Látex, comumente usados para organizar dinheiro. Para caracterizar o material, foram utilizadas três massas distintas e duas configurações do elástico (na sua condição normal e dobrado), de acordo com a Fig. 7. As massas foram medidas previamente em balança de cozinha e as respectivas deformações foram registradas para posterior cálculo de rigidez.



Figura 7. Ensaio 2 - Elástico de látex em duas configurações, utilizado em substituição à mola de tração helicoidal

Já o terceiro ensaio buscou identificar valores aproximados para a rigidez da Mola de Nitinol. Foi realizado um ensaio de modo a medir estaticamente a deformação da mola em seu estado aquecido (energizado). Para tal, utilizou-se duas massas (240g e 320g) e fonte de corrente contínua de 1A. Ao atingir o equilíbrio estático, a montagem foi fotografada para análise posterior. Os registros se encontram na Fig. 8.

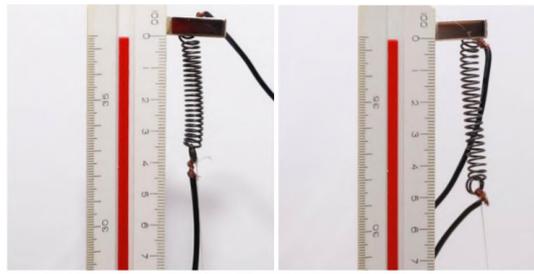


Figura 8. Ensaio 3 - Mola de Nitinol energizada em equilíbrio estático com carregamentos de 240g e 320g

#### 4. RESULTADOS

A partir dos registros em vídeo realizados no Ensaio 1 (Capacidade de atuação e tempo de recuperação), foram analisadas e plotadas as posições da Mola de Nitinol a cada 1 segundo, resultando no gráfico apresentado na Fig. 9.

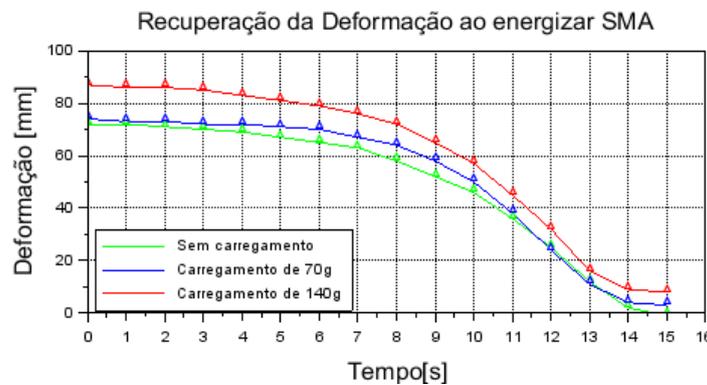


Figura 9. Resultado do Ensaio 1 - Recuperação da deformação em função do tempo

Analisando esse gráfico (Fig. 9), pode-se comprovar o comportamento não-linear da mola de SMA ao ser aquecida. Pode-se observar também que logo após a mola de Nitinol ser energizada, a recuperação mantém-se lenta por alguns segundos. Esse comportamento justifica-se pela inércia térmica da mola e pelo fato de a transformação microscópica acontecer gradualmente, em temperaturas específicas.

Já no Ensaio 2, os pontos registrados possibilitaram estimar a rigidez do Elástico de Látex nas duas situações em que foi experimentado. Os resultados estão demonstrados na Fig. 10.

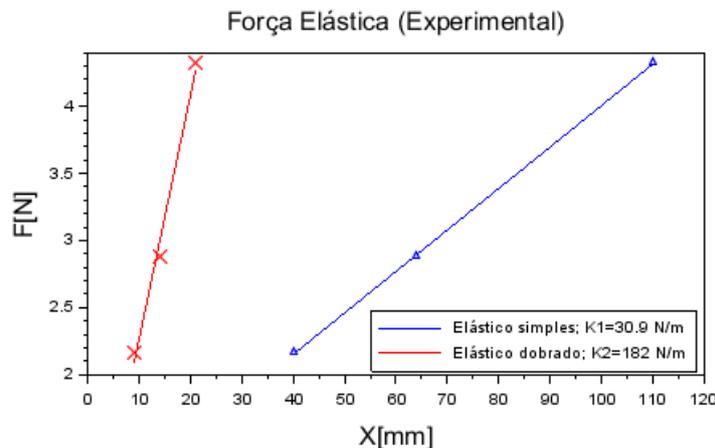


Figura 10. Resultado do Ensaio 2 - Rigidezes do elástico de látex

Com base nas deformações e utilizando o software Scilab, foi plotado o gráfico Força x Deformação. Através de Regressão Linear, obteve-se valores aproximados para a rigidez de cada mola equivalente ao elástico em ambas as situações. No primeiro caso (elástico simples), a constante elástica foi calculada em aproximadamente 30,9N/m. Já com o elástico dobrado, o valor da constante elástica foi de aproximadamente 182N/m. A razão entre os dois valores é de 5,89. Esses dados foram implementados posteriormente no programa para simulação de forças e ângulos.

Como principais informações, pode-se citar as relações entre ângulos, ângulos máximos e mínimos de atuação (pontos de equilíbrio), correlação entre as forças exercidas pela Mola de SMA e pela Mola Comum (elástico de látex). Na Fig. 11 os gráficos que representam esses resultados.

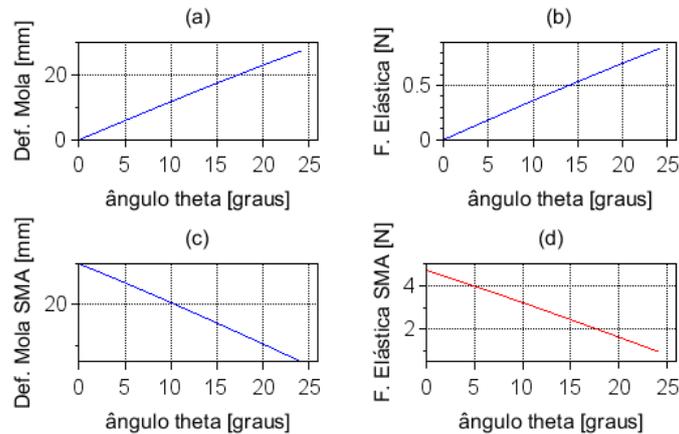


Figura 11. Resultado do Ensaio 3 - Relação entre Forças e ângulos de atuação da Mola comum (a,b) e Mola de SMA (c,d)

Com base nos dados, foi possível a determinação do ângulo Theta onde ocorre o contato entre as extremidades da garra.  $X_g$  é a distância entre as duas extremidades. A abertura máxima projetada da garra ocorre em  $\Theta=0$  e o ponto de contato (fechamento total) ocorre quando Theta atinge aproximadamente  $24,2^\circ$ , conforme apresentado na Fig. 12. Novamente, destaca-se que os valores são os limites geométricos da garra, independente das molas utilizadas para seu acionamento.

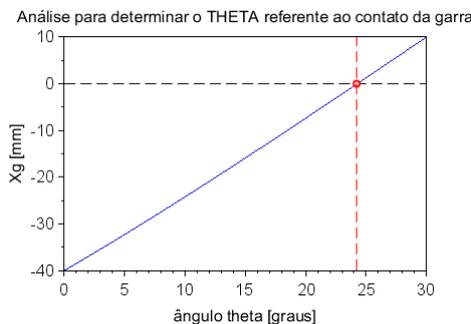


Figura 12. Determinação do ângulo onde ocorre o contato das extremidades

Implementando os valores experimentais obtidos nos Ensaio 2 e 3, foram plotados dois gráficos da Fig. 13, que indicam os pontos de equilíbrios da garra em seu estado aberto (Temp Amb.) e em seu estado acionado (Energ.). A posição de equilíbrio denotada por "Theta" é determinada através da minimização da função objetivo, que nada mais é que a soma da energia potencial elástica total do sistema. Nesse caso, foi simulada a utilização do Elástico de Látex simples. A partir dessas informações, conclui-se que a garra atua com amplitude satisfatória (aproximadamente  $15,6^\circ$  cada braço) e há margem para ajustes de geometria mantendo os parâmetros das molas, caso necessário.

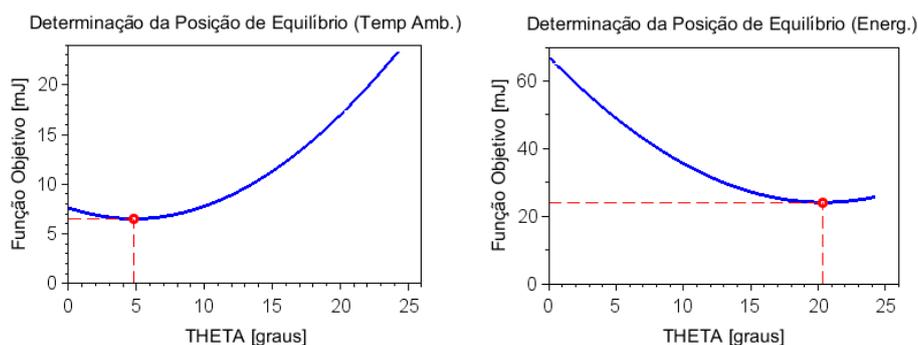


Figura 13. Determinação dos ângulos de equilíbrio com a mola SMA à temperatura ambiente(esquerda) e com a mola aquecida(direita)

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados parciais apresentados indicam que as Ligas SMA têm potencial de aplicação muito promissor como atuadores. No caso estudado, através de experimentação e simulação numérica, obteve-se um embasamento e noções práticas de como a liga Nitinol pode ser utilizada e quais resultados são esperados de uma Garra Robótica nos moldes projetados. Através do estudo realizado, foi projetada a base para a construção e experimentação de um modelo prático.

Todas informações, cálculos e códigos produzidos são norteadores de futuros desdobramentos do projeto e possibilitam simular o comportamento da Garra Robótica em diferentes cenários apenas alterando os valores de interesse, como as constantes elásticas. Para maior controle de forças e ângulos de atuação, por exemplo, deve-se investir esforços na realização de novos ensaios e simulações cada vez mais precisas.

Como próximos passos, destaca-se a necessidade de estudar das forças realizadas pela Mola de Nitinol em diferentes faixas de temperaturas e, principalmente, correlacionar valores de corrente elétrica, temperatura, força atuação e tempo de ativação. A partir desses dados, a utilização da Mola de SMA será analisada mais profundamente para determinação de viabilidade da sua aplicação em diferentes situações práticas.

## 6. REFERÊNCIAS

- Alves, M.T.S., 2015. *Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas Usando Ligas com Memória de Forma*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Chopra, I. and Sirohi, J., 2013. *Smart structures theory*. Cambridge University Press, New York, 1st edition.
- Díaz, C.E., Fernández, R., Amanda, M. and Gutiérrez, F.J.G., 2015. “State of the art in robots used in minimally invasive surgeries. natural orifice transluminal surgery (notes) as a particular case”. *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 46, No. 6, pp. 508–532.
- Domene, C.E., 2014. “Cirurgia robótica - um passo em direção ao futuro”. *ABCD Arq Bras Cir Dig*, Vol. 27, No. 4, pp. 233–233.
- Lagoudas, D.C., 2008. *Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications*. Springer, New York, 1st edition.
- Leo, D.J., 2007. *Engineering Analysis of Smart Material System*. John Willey & Sons, New Jersey, 1st edition.
- Ozbulut, O.E., Hurlebaus, S. and Desroches, R., 2011. “Seismic response control using shape memory alloys: A review”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, pp. 1531–1549.
- Tipler, P.A. and Mosca, G., 2009. *Física para cientistas e engenheiros Vol.2*. LTC, Rio de Janeiro, 6th edition.