

# METODOLOGIA PARA A OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE ATUADORES DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

CAVALCANTI, T. C. M. – [tony.cavalcanti@ee.ufcg.edu.br](mailto:tony.cavalcanti@ee.ufcg.edu.br)

VALENZUELA, Walter Andrés Vermehren – [wvalenzuela7@gmail.com](mailto:wvalenzuela7@gmail.com)

ROCHA NETO, J. S. – [zesergio@dee.ufcg.edu.br](mailto:zesergio@dee.ufcg.edu.br)

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (UFCG-CEEI-DEE-LIEC).

Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó.  
58429-900 – Campina Grande – Paraíba.

**Resumo:** *A proposta neste trabalho é abordar a liga com memória de forma (LMF) e seu uso como atuador, sendo feito uma apresentação deste material. Estes compostos são ativados por calor, e assim são capazes de desenvolverem grande “deformação”. No entanto, a resistência elétrica da LMF não sofre grande variação, mas mesmo assim se torna necessário o seu estudo, pois compreendendo a forma como a resistência elétrica varia podemos planejar uma melhor estratégia de controle, este valor de resistência elétrica está relacionado diretamente com a corrente elétrica que se deve aplicar na LMF para a mesma propiciar variação na sua forma, e assim ser usada como atuador linear. O experimento foi desenvolvido com o uso de um programa de instrumentação virtual, LabVIEW.*

**Palavras-chave:** *Instrumentação virtual, LabVIEW, Liga com memória de forma, Resistência elétrica.*

## 1 INTRODUÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) ou do inglês *Shape Memory Alloy* (SMA) possuem a característica de retornarem a sua forma, que antes tenha se determinado, após sofrerem aquecimento. As LMF constituem uma classe de compostos metálicos que possuem a capacidade de desenvolver e recuperar deformações relativamente grandes podendo alcançar em torno de 8% sem apresentar deformações plásticas. Esta característica é devida, em grande parte, à capacidade que estes materiais possuem de desenvolver transformações de fase na presença de tensão mecânica aplicada e/ou variações de temperatura. Estas transformações são da fase austenítica, o estado livre de tensões e altas temperaturas, para diversas variantes da fase martensítica a temperaturas mais baixas que a da fase austenítica. Embora estes materiais possam ser considerados como uma tecnologia emergente, vários deles já são comercialmente disponíveis na forma de fios, tubos, chapas e barras e têm sido usados em aplicações diversas na engenharia e biomédica (Valenzuela, 2005).

As Ligas com Memória de Forma produzidas na forma de fios e fitas delgadas são consideradas atuadores lineares por natureza e apresentam grande possibilidade de aplicação na robótica, na odontologia, na produção de atuadores miniaturizados, de sensores, antenas para celulares e de músculos artificiais, devido a sua grande capacidade de carga quando confrontados com as suas dimensões (Neto, 2008).

Se a LMF encontrar impedimento ao movimento de contração durante a sua fase de transformação, ela é capaz de gerar forças de grande intensidade, e isto faz com que seu uso como atuador seja evidenciado. A LMF mais usada é o Nitinol (níquel e o titânio). Esta liga possui boas propriedades elétricas e mecânicas, boa resistência à corrosão e uma vida útil bem longa. Este tipo de liga pode ser atuada com base no efeito Joule.

O efeito Joule se dá pela passagem de corrente elétrica por um material condutor de eletricidade, assim, quando a corrente elétrica passa pela LMF (condutor), gera calor e dependendo da temperatura de transformação pode ocasionar a transformação de fase.

## 2 EFEITO DA MEMÓRIA DE FORMA E DA SUPERELASTICIDADE

Para os efeitos de memória de forma um fator de grande importância é a temperatura, pois dependendo da temperatura em que se esteja colocada a LMF podem surgir transformações de fase. Na ausência de uma tensão mecânica aplicada, o material transforma-se de austenita à martensita maclada, quando resfriado, e ao ser reaquecido retorna para a fase austenita.

As transformações podem ocorrer também por tensionamento da LMF, ou seja, por meio de uma carga aplicada em sua extremidade. As LMF apresentam alguns efeitos que são classificados em: efeito memória de forma simples, efeito memória de forma reversível, superelasticidade e comportamento tipo borracha. Dentre estes efeitos, temos como mais importantes o efeito de memória de forma reversível e o efeito de superelasticidade.

Os compostos de LMF fazem parte da inovação tecnológica, tais compostos oferecem muitas vantagens como mecanismo de atuação, baixo peso, baixo volume, é capaz de desenvolver grande força visto o seu volume. Podendo assim ser utilizado como atuador. Porém, as ligas possuem alguns inconvenientes relacionados com a não linearidade. A LMF apresenta um comportamento de histerese em seu ciclo devido às mudanças de transições de fase. Na Figura 1 pode-se observar o comportamento de histerese da LMF, por meio de um ciclo completo. O ciclo de histerese alcança as temperaturas de transições de fase, martensítica e austenítica.

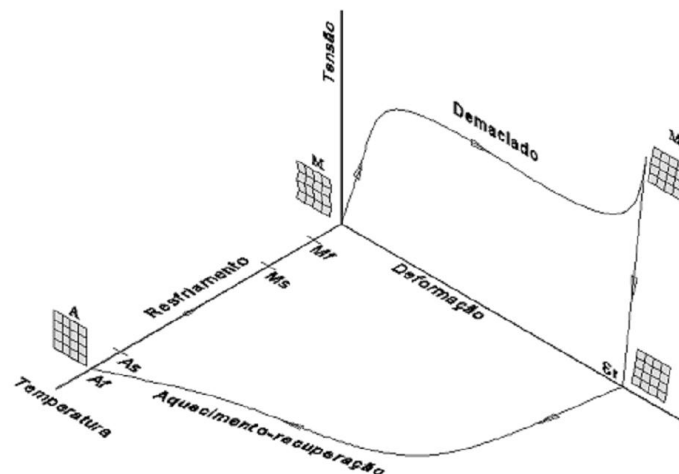


Figura 1 – Diagrama representativo do efeito de memória de forma na LMF.

## 3 PLATAFORMA DE TESTES

Para se caracterizar uma amostra de LMF, construiu-se a plataforma de testes apresentada na Figura 2, que possui sensores e atuadores, sendo possível efetuarmos medições em materiais na forma de fio ou fita. A plataforma apresenta assim a robustez necessária para o

acompanhamento dos testes. Esta plataforma foi elaborada no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC), do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE). Possui sensores de temperatura (termopar), carga mecânica (célula de carga), deformação (potenciômetro multivoltas) e como atuadores temos um motor de passo que utiliza um driver de controle, uma resistência elétrica, e pastilhas de efeito Peltier. A plataforma ainda conta com um tanque de testes onde as amostras dos materiais são inseridas, este tanque tem como propósito fazer com que o teste se desenvolva na presença de um líquido de silicone, que promove uma melhor condução térmica. O tanque proporciona um espaço em que o acompanhamento dos testes pode ser visualizado e como característica principal servir de reservatório para os testes que por ventura ocorram na presença de líquidos. Geralmente os líquidos utilizados são à base de silicone para promover isolamento elétrico.

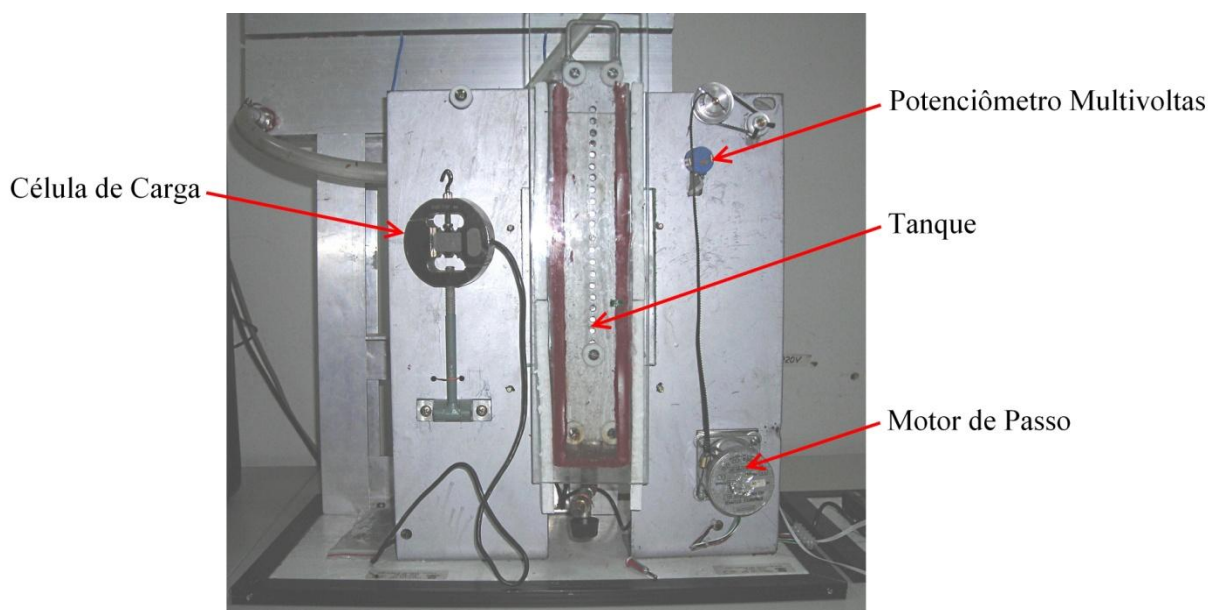


Figura 2 – Plataforma de testes.

### 3.1 Sensores e Atuadores

A seguinte definição de sensor é dada por LUECKE: “Um sensor é um dispositivo que detecta uma quantidade física natural e converte em saídas que os humanos podem interpretar.” (Luecke, 2005). Atuadores são dispositivos que transformam um tipo de energia em outra forma de energia, como por exemplo, o motor elétrico que converte energia elétrica em movimento.

Podem ser do tipo elétrico, pneumático ou hidráulico. Hoje também existem os atuadores térmicos, que são utilizados como bombas de calor. Os sensores e atuadores estão conectados a interface construída, ou seja, o microcontrolador, os circuitos condicionadores de sinal e o PC, que através da interface criada em *LabVIEW* pode interagir com os testes, podendo alterar quando necessário os seus valores de deformação e de tensão mecânica máxima.

#### *Célula de Carga*

A célula de carga é o sensor de tensão mecânica, com o seu uso foi possível aferir a força aplicada sobre a amostra da liga. A tensão mecânica é definida segundo (Norton, 2004), “Tensão é definida como força por unidade de área e para um corpo de prova sob tração é calculada pela Equação 1.”

$$\sigma = \frac{T}{A} \quad (1)$$

onde:  $\sigma$  – Tensão mecânica;  $T$  – Tração;  $A$  – Área da secção transversal.

A célula de carga é utilizada para mensurar forças mecânicas pelo fato da mesma possuir um extensômetro, que é um elemento capaz de reagir a tensões mecânicas, seja ela positiva (tração) ou negativa (compressão). O seu funcionamento é baseado em uma ponte resistiva, logo ocorre uma variação da resistência elétrica de acordo com a deformação sofrida pelo elemento resistivo. Esta variação de resistência pode ser encontrada conhecendo-se os valores típicos do material, como: resistividade, comprimento e a área. Assim a resistência elétrica do extensômetro pode ser calculada como apresentada na Equação 2.

$$R = \rho * \frac{l}{A} \quad (2)$$

onde:  $R$  – Resistência elétrica;  $\rho$  – Resistividade do material;  $l$  – Comprimento da amostra de material;  $A$  – Área da secção transversal.

Essa resistência faz parte, como já foi mencionado anteriormente, de uma ponte resistiva. Esta ponte é denominada de Ponte de Wheatstone e pode ser observada na Figura 3.

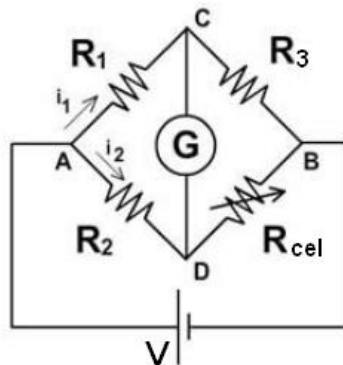


Figura 3 – Ponte de Wheatstone.

Quando a ponte estiver desequilibrada a tensão elétrica medida entre os pontos ‘C’ e ‘D’ será diferente de zero. E se a tensão for nula indica que a ponte está equilibrada. A célula de carga utilizada tem uma resposta sensorial de 0 a 20 mV, estes valores são muito baixos para efetuarmos qualquer análise ou mesmo que possa ser utilizado para um critério de parada. Então, torna-se necessário um circuito de condicionamento de sinal para que estes valores, que são baixos para a análise, possam ser convertidos em valores mais apropriados. Para isso, usa-se uma etapa de amplificação do sinal da célula de carga e o intervalo que antes era de 0 a 20 mV se torna de 0 a 5 V, assim os níveis se tornam mais adequados para o uso.

### **Potenciômetro Multivoltas**

O potenciômetro, resistor que altera o seu valor de resistência de acordo com a posição onde se encontra o seu eixo central, é utilizado para a medição de deformação sofrida pela amostra de LMF. O potenciômetro multivoltas foi conectado na roldana por uma correia que sofre a atuação do motor de passo. Assim, o deslocamento que esta roldana sofrerá será

transferido para o eixo do potenciômetro, fazendo o mesmo variar a resistência, e assim sermos capazes de verificar a que nível se encontra a deformação na LMF. Na Figura 4 temos um esquema de como estão conectados o potenciômetro e a roldana.

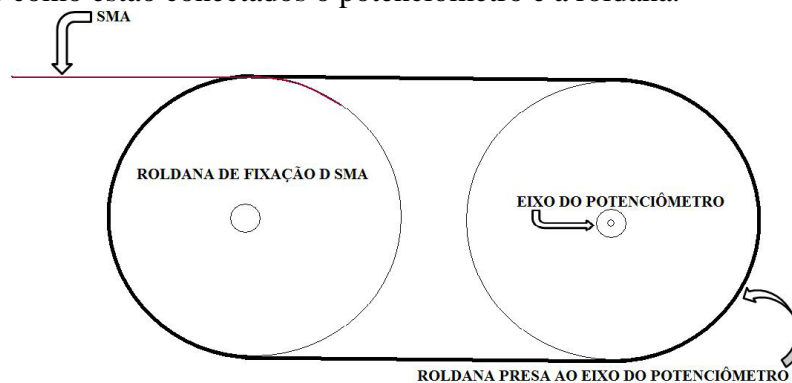


Figura 4 – Conexão entre as roldanas.

### ***Motor de Passo***

O atuador utilizado nos ensaios da LMF foi o motor de passo, o qual tem como característica o movimento por pulsos, promovendo um deslocamento angular por vez. Segundo (Patsko, 2006), “Um motor de passo é um transdutor que transforma energia elétrica em energia rotativa, com uma precisão muito grande em seu movimento. No seu interior há estatores formados por bobinas que geram, quando percorridos por uma corrente elétrica, o campo magnético necessário para o movimento do rotor, que é construído com ímãs permanentes confeccionados de acordo com o número de passos”.

O controle dos movimentos do motor de passo foi feito através de uma saída digital do ADuC (microcontrolador), mas esta saída do microcontrolador é insuficiente para suportar o driver de controle do motor de passo. Assim, é necessário termos uma etapa de amplificação e para isto foi usado um CI LM324, CI que apresenta quatro amplificadores operacionais, sendo necessário apenas o uso de dois e na configuração de seguidor de tensão.

### **3.2 Interface**

A interface é composta pelo microcontrolador e a programação virtual promovida pelo *LabVIEW*, e nada mais é que uma forma de interligação de sistemas distintos e que de certa forma proporciona uma comodidade no seu tratamento dos dados.

### ***ADuC***

A interface que diz respeito ao microcontrolador, é feita utilizando o microcontrolador ADuC 842. Com microcontroladores da família ADuC, é possível implementar sistemas embarcados com alto grau de confiabilidade. Por se tratar de um microcontrolador projetado para sistemas de instrumentação e aquisição de dados, ou seja, para trabalhos com o processamento de informações analógicas, a Analog Devices denomina os componentes da família ADuC de Microconversores ou Microcontroladores analógicos (Analog Devices, 2011).

Os Microcontroladores ADuC possuem uma série de recursos que possibilita sua aplicação em várias modalidades de instrumentação, podendo desta forma, ser utilizado para desenvolver desde sistemas de controle integrados a sensores inteligentes (*Intelligent sensors*). Por possuir um núcleo com a arquitetura do 8052 a programação fica mais acessível,



pois compiladores em linguagem C como o KEIL já é compatível e dispõe de recursos para a família ADuC.

## LabVIEW

O *LabVIEW* é um *software* de instrumentação virtual, desenvolvido pela *National Instruments*. Este *software* proporciona um ambiente de programação gráfica, e é implementado através de VI's ou *Virtual Instruments*, que pode realizar diversas funções ou instruções. Este tipo de programação gráfica é elaborada em um tipo específico de linguagem conhecida como linguagem G, que proporciona dois tipos de janelas de visualização: uma em blocos e a outra gráfica. A parte em diagrama de blocos é onde a programação é realmente feita, em que se realiza a conexão das estruturas, as decisões de programação, e os cálculos de variáveis de interesse. A comunicação entre o microcontrolador e a interface criada no *LabVIEW* acontece por intermédio da porta serial do PC. Assim, podemos obter leituras dos sensores presentes na plataforma de testes e também enviar informações para a atuação necessária (Ramos, 2007).

A interface gráfica criada no *LabVIEW* visa atender as expectativas de teste durante a tração da LMF. O programa deve manter comunicação com o microcontrolador durante a realização dos testes. Esta comunicação ocorre utilizando o protocolo de comunicação serial RS-232. A interface com o usuário é chamada de GUI (*G User Interface*), é nesta janela que o usuário interage com o programa criado no *LabVIEW*. O diagrama de blocos é onde a programação é realmente construída. A linguagem de programação utilizada no *LabVIEW* é a linguagem G, onde todas as aplicações se utilizam de VI (*Virtual Instruments*). Na Figura 5 é possível observar a GUI construída para fazer os experimentos de tração na LMF.

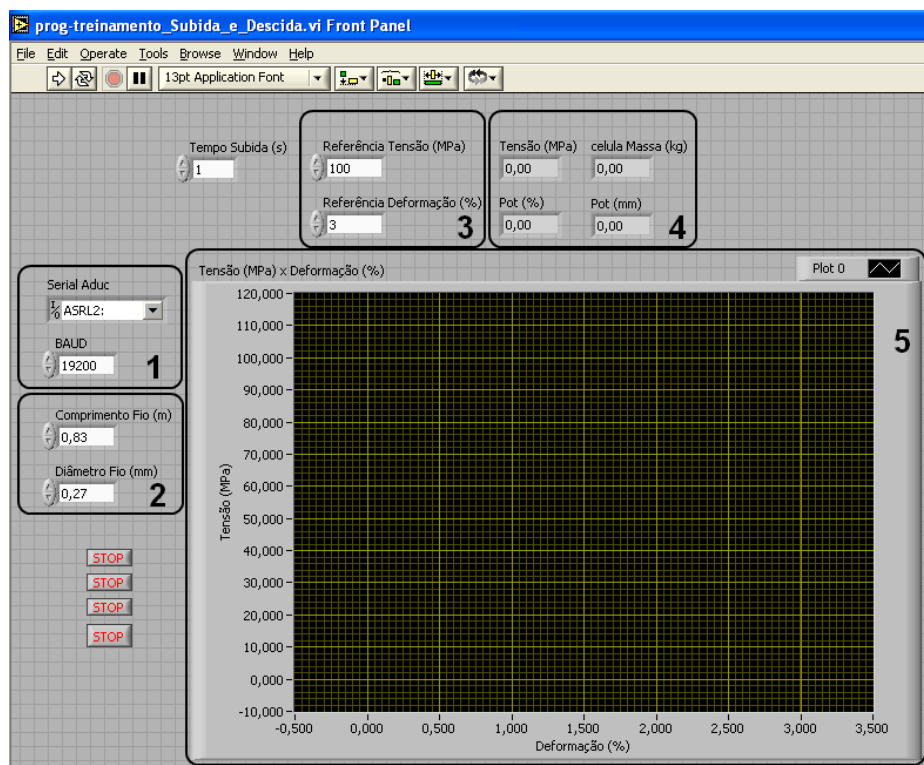


Figura 5 – Interface gráfica - *LabVIEW*.

Na demarcação 1 é apresentada a interface de comunicação, descrevendo como deve ser a comunicação serial. Na demarcação 2 são apresentadas as condições do material utilizado,

que são o comprimento e o diâmetro da amostra de LMF utilizada. Na demarcação 3 são apresentados os critérios de parada. Na demarcação 4 é feita a leitura dos valores de interesse, os quais são apresentados tanto na forma direta como na forma percentual. Na demarcação 5 é apresentada a tela que ao longo do teste exibirá o gráfico de tensão mecânica (MPa) versus deformação percentual (%).

## 4 TESTES REALIZADOS

Os experimentos realizados para a medição de resistência elétrica foram feitos utilizando uma amostra de LMF. Trata-se do Nitinol, conhecido comercialmente como flexinol. Este material é constituído de níquel e titânio, cuja composição é de: 55 a 56% de níquel e 44 a 45% de titânio.

Os testes foram desenvolvidos na plataforma de testes mencionada anteriormente. É importante destacar que antes da amostra de LMF ser inserida na plataforma, foi feita a verificação da mesma. Esta verificação se torna necessária pelo fato da LMF possuir uma deformação residual, de modo que é necessário extinguir esta deformação através de aquecimento. Para isso foi feito que uma corrente de 610 mA passasse na amostra a fim de eliminar qualquer deformação que por ventura ainda pudesse existir. Este teste inicial faz com que a LMF recupere a sua forma original e é efetuado por efeito Joule, através da passagem da corrente elétrica. A corrente elétrica utilizada é típica para uma LMF com 0,20 mm de diâmetro.

A temperatura durante os testes foi mantida constante durante todo o experimento em 22°C. O ensaio foi iniciado com a ligação da LMF à plataforma de testes. Após a amarração da LMF e tendo o cuidado para que a LMF tenha possibilidade de caminho livre, os testes de tração são iniciados. Estes testes possibilitam, através da plataforma de testes, executar a deformação assistida da LMF, indicando valores críticos de deformação máxima e tensão mecânica máxima a serem atingidas. Estes testes são acompanhados através da interface criada no programa de instrumentação virtual, *LabVIEW*. Na Figura 6 é apresentado o gráfico obtido com o teste de tração. A amostra de LMF utilizada possui 20 mm de diâmetro e 0,80 m de comprimento.

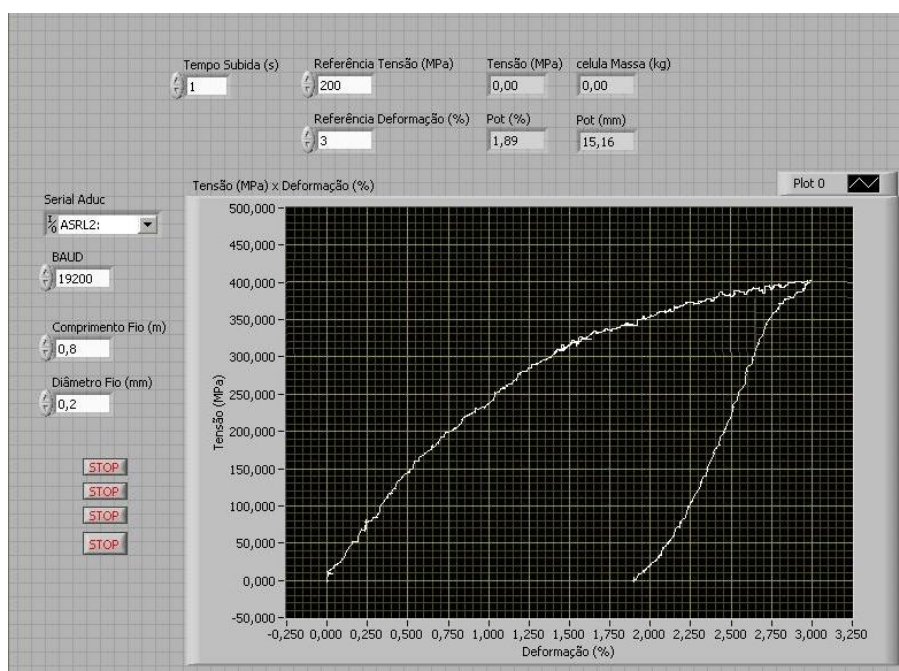


Figura 6 – Curva do comportamento da LMF sobre o teste de tração.

Analisando-se a Figura 6, observa-se que este ensaio fez com que a LMF sofresse uma deformação residual, que garante o efeito de memória de forma da liga, pois quando a mesma sofre um aquecimento, recuperará a forma “memorizada”. A deformação residual foi de 1,89% do comprimento, que equivale a 15,16 mm. Em seguida foi feito o teste de medição da resistência elétrica das amostras. Os testes se deram com a LMF já deformada, assim, foi feito o teste de passagem de corrente elétrica e verificou-se a tensão elétrica. Foi fixada uma das extremidades da LMF e fez-se percorrer corrente elétrica na mesma, sem a necessidade de resfriamento, esperando-se apenas o ponto de equilíbrio, no qual a LMF não sofria mais nenhuma contração do seu tamanho. Na Tabela 1 temos os dados referentes aos testes para a verificação da resistência na LMF com o comprimento de 0,80m.

Tabela 1 – Valores obtidos no teste de medição de resistência.

Corrente Elétrica (mA)	Tensão (V)	Deformação (mm)	Resistência (Ohm)
50	0,370	0	7,40
100	0,760	0	7,60
150	1,153	0	7,69
200	1,548	0	7,74
250	1,942	0	7,81
300	2,364	0	7,88
350	2,777	0	7,93
400	3,189	0	7,97
450	3,322	20	7,38
500	3,540	32	7,08
550	3,877	38	7,05
600	4,218	40	7,03

Com os dados obtidos na Tabela 1, foi construído o gráfico de corrente elétrica em função da resistência. Este gráfico apresenta a curva da corrente versus a resistência, na qual podemos observar o aumento da resistência à medida que a corrente aumenta, até atingir 400 mA e atingindo a resistência de 7,97  $\Omega$ . E a partir deste valor de corrente elétrica (400 mA) observa-se que a resistência começa a diminuir, e quando a corrente máxima do teste é atingida temos a resistência por volta de 7,03  $\Omega$ . Logo, a resistência sofreu uma variação de 0,94  $\Omega$ . Na Figura 7 temos o gráfico correspondente da variação resistiva para a LMF (comprimento - 0,80 m).

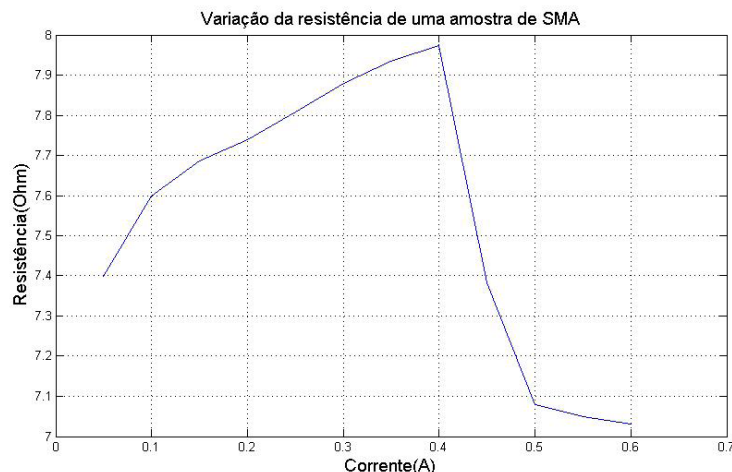


Figura 7 – Variação da resistência elétrica da LMF.



Pela Figura 8 observa-se o comportamento da variação da resistência quando a LMF está recuperando a sua forma. Analisando-se o gráfico obtido, vemos que o comportamento é adequado, pois a transformação de fase começa a ocorrer quando a corrente elétrica começa a ultrapassar a corrente de 400 mA. Quando a LMF está submetida a uma deformação residual, a mesma recupera a sua forma por indução térmica e é justamente este caminho percorrido nesta transformação que está em análise na Figura 8, pois a partir da LMF com deformação residual na sua fase martensita ela possui uma determinada orientação, assim é denominada de martensita induzida por tensão mecânica. Utilizando a corrente elétrica proporciona-se o aquecimento necessário para a transformação de fase e assim a amostra de LMF se encontra na fase austenita, e tem a sua forma recuperada (Novak, 2008).

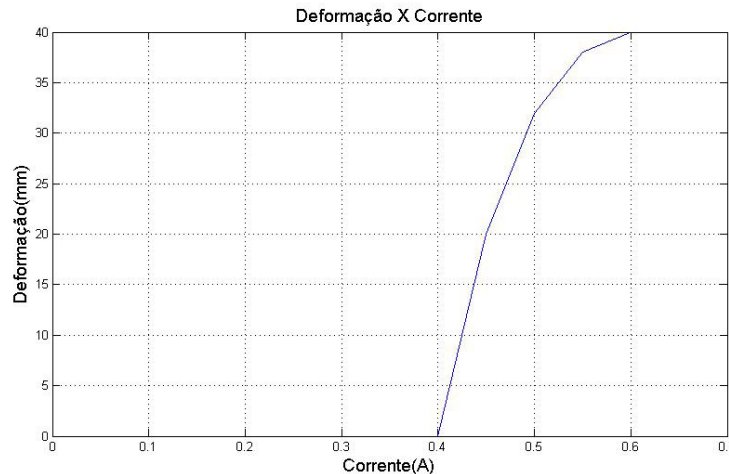


Figura 8 – Comportamento da deformação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes de avaliação da resistência elétrica das LMF se tornam importantes quando elas são utilizadas como atuadores permitindo decidir qual o tipo de LMF deve ser utilizada em uma determinada aplicação, fazendo para isso um devido dimensionamento elétrico da liga e tratando o problema como um levantamento da potência máxima consumida durante o processo de atuação. Pode-se ainda determinar a melhor região de atuação da LMF, pois se sabe assim, se a corrente está elevada ou mesmo se a corrente não proporciona a transformação de fase.

Ao final, concluímos que a variação da resistência elétrica da LMF não sofre grande variação, porém o seu estudo é de grande importância. O estudo adequado de como a resistência da LMF se comporta nos proporciona uma melhor estratégia de controle e também possibilita o estudo do nível de potência elétrica requerida por um sistema que se utilize de LMF como meio atuador. Este estudo ainda permite identificar qual o valor de corrente elétrica necessário para efetuarmos um deslocamento linear.

### *Agradecimentos*

Ao CNPq pelo financiamento do mestrado e a todos os colegas do Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC) pelo apoio no desenvolvimento deste artigo.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Analog Devices. **MicroConverter 12-Bit ADCs and DACs with Embedded High Speed 62-kB Flash MCU ADuC841, ADuC842, ADuC843**. Disponível em: <[http://www.analog.com/static/importedfiles/data\\_sheets/ADUC841\\_842\\_843.pdf](http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/ADUC841_842_843.pdf)> Acessado em: 02 fev. 2011.

LUECKE, J. **Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications**. 1º. ed. Elsevier, 2005. ISBN 0-7506-7810-0.

NETO, J. F. C.; ARAÚJO, C. J. de. **Estudo experimental do comportamento eletrotermomecânico de atuadores lineares de niti com memória de forma**. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM. Salvador, 2008.

NORTON, R. **Projeto de Máquinas**. 2º. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. ISBN 85-363-0273-9.

NOVAK, V.; SITNER, P.; DAYANANDA, G.N.; BRAZ-FERNANDES, F.M.; MAHESH, K.K. **Electric resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests: Experiments and simulation**, Materials Science and Engineering: A, Volumes 481-482, Proceedings of the 7th European Symposium on Martensitic Transformations, ESOMAT 2006, 25 May 2008, Pages 127-133.

PATSKO, L. F. **Controle de Motor de Passo**. Dezembro 2006.

RAMOS, Bruno. **Manual do Iniciante – LabVIEW 8**. Engenharia Eletrônica – ITA, 2007.

VALENZUELA, W. A. UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. **Sistema de articulação atuado por meio de liga com memória de forma**, 2005. Dissertação (Mestrado).

**METHOD FOR OBTAINING THE CHARACTERISTICS OF THE ELECTRICAL RESISTANCE ALLOY ACTUATORS WITH SHAPE MEMORY**

**Abstract:** *The proposal in this paper is to address the shape memory alloy (SMA) and its use as actuator being made a presentation of this material. These compounds are activated by heat, and so are able to develop large "deformation". However, the electrical resistance of the SMA does not undergo major changes, but still it is necessary to their study, since understanding how the electrical resistance varies we can plan a better control strategy because the value of electrical resistance is directly related the electric current that must be applied in the SMA to provide the same variation in shape. And thus be used as a linear actuator. The experiment was conducted using a program of virtual instrumentation, LabVIEW.*

**Key-words:** *Virtual Instrumentation, LabVIEW, Shape memory alloy, Electrical resistance.*