



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica - UAEE

Metodologia para a Obtenção das Características da Resistência Elétrica de Atuadores de Ligas com Memória de Forma

Tony Carlos Moura Cavalcanti

Trabalho de Conclusão de Curso

Campina Grande
30 de março de 2011

Tony Carlos Moura Cavalcanti

Metodologia para a Obtenção das Características da Resistência Elétrica de Atuadores de Ligas com Memória de Forma

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Instrumentação Eletrônica

Prof. D.Sc. José Sérgio da Rocha Neto
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
©Tony Carlos Moura Cavalcanti, 30 de março de 2011

Sumário

1	Introdução	4
1.1	Ligas com Memória de Forma	4
1.2	Efeitos da memória de forma e da superelasticidade	5
2	Plataforma de Testes	10
3	Sensores e Atuadores	13
3.1	Célula de Carga	13
3.2	Potenciômetro Multivoltas	16
3.3	Motor de Passo	18
4	Interface	21
4.1	LabView	21
4.1.1	VISA	22
4.1.2	Interface Gráfica	25
4.2	ADuC	27
4.2.1	Visão Geral sobre Microcontroladores	27
4.2.2	Microconversores ADuC da Analog Devices	28
5	Testes Realizados	31
6	Conclusões	41
7	Propostas para Trabalhos Futuros	42

Lista de Figuras

1	Transformação de fase induzida por temperatura entre austenita e martensita maclada, sem carga aplicada.	6
2	Comportamento quase plástico e deformação residual - $T < M_f$	7
3	Fase de transformação induzida por tensão mecânica e comportamento de superelasticidade - $T > A_f$	8
4	Diagrama representativo do efeito de memória de forma na LMF.	9
5	Fotografia do motor de passo.	11
6	Vista gráfica da plataforma de testes.	12
7	Fio de seção circular.	14
8	Ponte de Wheatstone.	15
9	Diagrama elétrico para o uso da célula de carga.	16
10	Conexão entre as roldanas.	17
11	Diagrama elétrico para o uso do potenciômetro multivoltas.	18
12	Pulsos de controle do <i>driver</i>	19
13	Diagrama elétrico para o uso do motor de passo.	20
14	Interface utilizada mostrando o fluxo de dados.	21
15	VISA Serial.	23
16	VISA Write.	23
17	VISA Read.	24
18	VISA Close Serial Port.	24
19	Interface gráfica - LabVIEW.	26
20	Fotografia da plataforma de testes.	32
21	Teste de tração para a amostra 1.	34
22	Teste de tração para a amostra 2.	35
23	Variação da resistência elétrica - amostra 1.	38
24	Variação da resistência elétrica - amostra 2.	39
25	Comportamento da deformação.	40

Lista de Tabelas

1	Propriedades técnicas e dados de projeto do flexinol	31
2	Valores obtidos no teste de medição de resistência - amostra 1.	37
3	Valores obtidos no teste de medição de resistência - amostra 2.	37

1 Introdução

Neste trabalho de conclusão de curso (TCC) aborda-se a liga de memória de forma (LMF) e seu uso como atuador, e nesta seção será feita uma apresentação deste material, apresentando gráficos do seu comportamento de memória de forma como também de superelasticidade. 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.

1.1 Ligas com Memória de Forma

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. O aquecimento pode ser provocado por: efeito Joule; convecção natural ou forçada; radiação solar. 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 devido, 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, no 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 qualquer impedimento ao movimento de contração durante a sua fase de transformação, ela será capaz de gerar forças de grande intensidade, e isto faz com que seu uso como atuador seja evidenciado. Assim, se torna necessário conhecer bem suas características físicas. Para a fabricação das LMF se usam metais como: alumínio, cobre, níquel, titânio, entre outros. Sendo os mais usados o níquel e o titânio, esta liga de níquel e titânio é chamada de Nitinol. Esta liga possui boas propriedades elétricas e mecânicas e possui boa resistência a corrosão e ainda possui uma vida útil bem longa. O Nitinol pode ser usado como atuador elétrico, pois ao aplicarmos corrente elétrica na liga, a mesma recupera a sua forma. Sendo assim, como dito anteriormente, utilizaríamos o efeito Joule para a sua atuação.

O efeito Joule se dá pela passagem de corrente elétrica por um material condutor de eletricidade, assim, quando a corrente elétrica passa pela LMF, que também é um condutor, gera calor e dependendo da temperatura de transformação pode ocasionar a transformação de fase. A fabricação do Nitinol se dá em forma de fios, barras, hastes e fitas, e assim são elementos de pequeno tamanho e proporcionam melhor relação de força por unidade de volume. Sendo assim, a sua escolha deve ser feita levando em conta as condições necessárias de projeto, como força, deformação e temperatura.

1.2 Efeitos 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 colocado a LMF pode surgir transformações de fase. Segundo [Valenzuela,2007], 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 temperaturas em que as transformações martensita e austenita iniciam são respectivamente M_s e A_s e as temperaturas em que as transformações estão completas são M_f e A_f , respectivamente. Na Figura 1 ilustram-se essas transformações e ao observá-las pode-se ter uma ideia clara das temperaturas críticas de transformação.

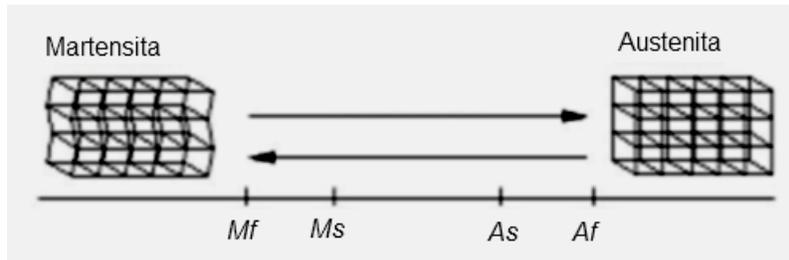


Figura 1: Transformação de fase induzida por temperatura entre austenita e martensita maclada, sem carga aplicada.

As transformações podem ocorrer também por tensionamento da LMF, ou seja, por meio de uma carga aplicada em sua extremidade. Assim, podemos avaliar o tipo de efeito de memória de forma que a LMF apresenta, sendo estes efeitos 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. O comportamento de efeito de memória de forma reversível ocorre em condições em que a temperatura está abaixo de M_f , assim a LMF conserva uma deformação residual (ϵ_r). Quando a amostra da LMF for aquecida acima da temperatura de transformação (A_f) ocorrerá a recuperação da forma, retornando assim para a sua forma inicial. Este comportamento que a Liga com Memória de Forma possui é denominado de quase plástico e a recuperação da deformação mecânica é chamado de efeito de memória de forma. O que se pode comprovar por meio da Figura 2.

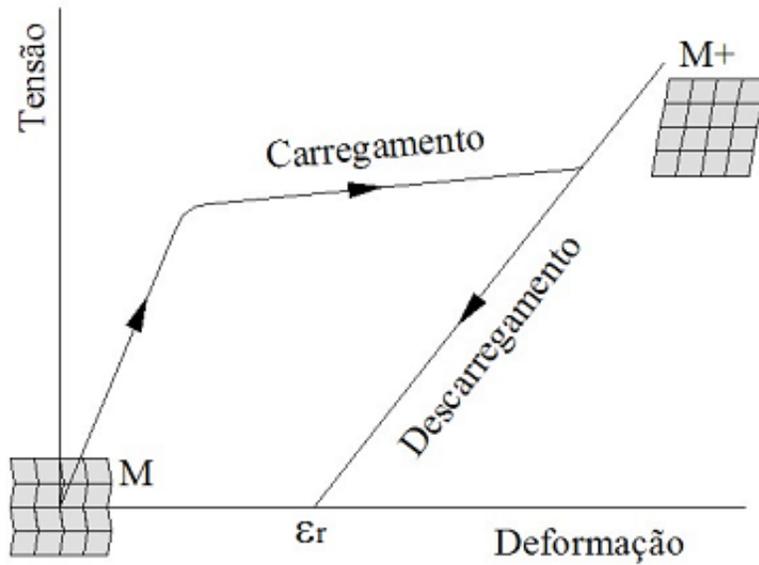


Figura 2: Comportamento quase plástico e deformação residual - $T < M_f$.

Quando a temperatura do material está acima de A_f , o material exibe uma aproximação linear da relação deformação-tensão mecânica à medida que a tensão mecânica é elevada até σM_s , quando começa a transição da fase austenita para a fase martensita demaada $M+$. Com a redução da tensão mecânica, o material novamente exibe comportamento quase linear na fase martensita até a tensão mecânica alcançar σA_s , quando começa o processo reverso. No regime de temperatura alta é observada a completa recuperação da forma sob descarregamento, esse fenômeno é chamado de superelasticidade [Valenzuela,2007]. O efeito de superelasticidade pode ser observado por meio das curvas de comportamento na Figura 3.

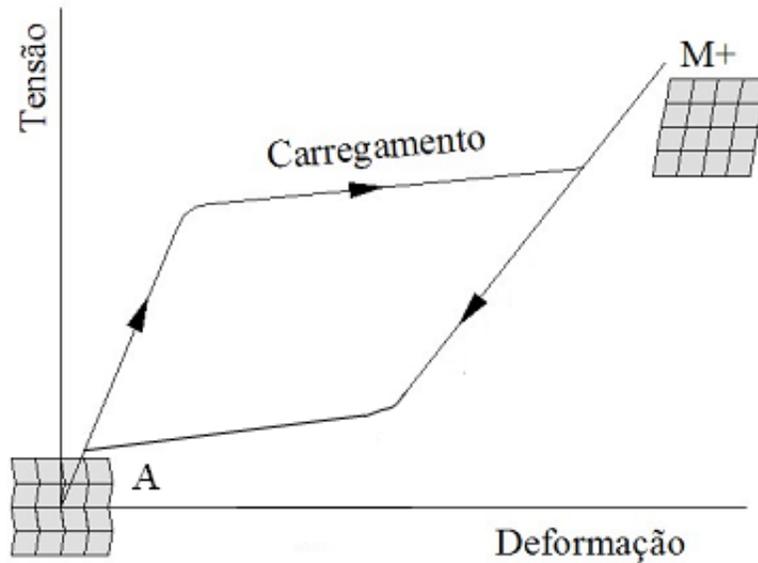


Figura 3: Fase de transformação induzida por tensão mecânica e comportamento de superelasticidade - $T > A_f$.

Os compostos de liga com memória de forma 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. Assim, surgiu a condição de se utilizar a LMF em mecanismos de atuação, principalmente aqueles que necessitem de atuação linear. Porém, as ligas possuem alguns inconvenientes e estes inconvenientes estão relacionados com a não-linearidade. A LMF apresenta um comportamento histerético, ou seja, apresenta histerese em seu ciclo, esta histerese se apresenta pelo fato das mudanças de transições de fase. Na Figura 4 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.

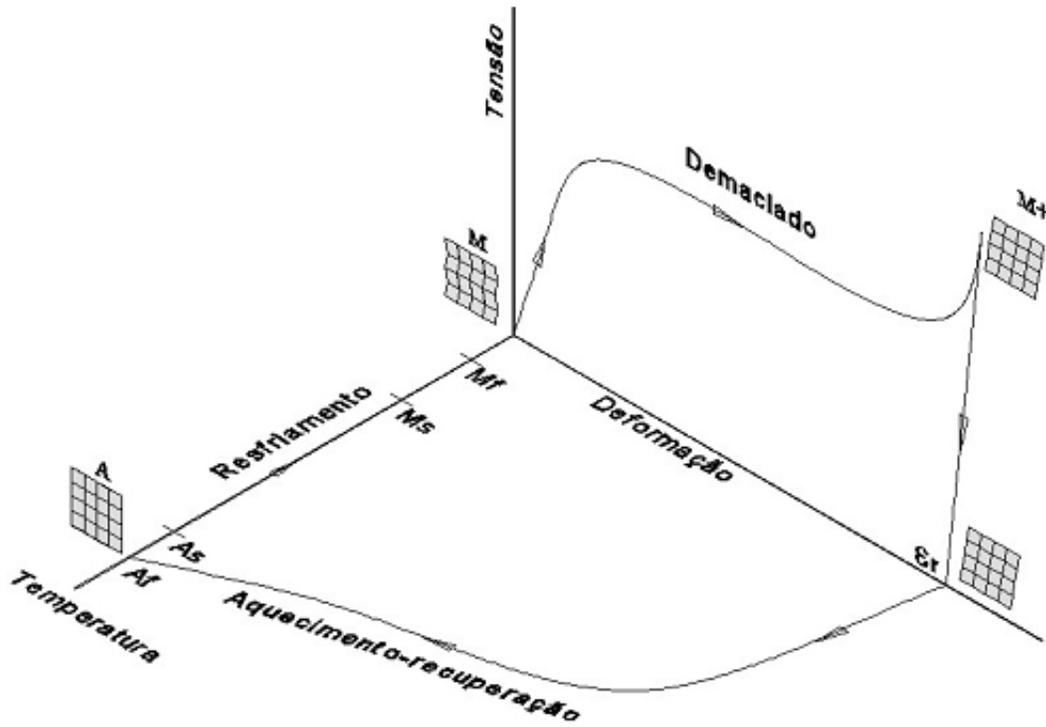


Figura 4: Diagrama representativo do efeito de memória de forma na LMF.

Dentre a família dos atuadores com memória de forma, o nitinol é a LMF mais utilizada, pois esta liga propicia melhor estabilidade térmica, maiores níveis de deformação e ótima resistência à corrosão.

2 Plataforma de Testes

A plataforma de testes possui sensores e atuadores, sendo possível efetuarmos medições em materiais na forma de fio ou fita, apresentando a robustez necessária para o acompanhamento dos testes. Esta plataforma foi elaborada no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC), laboratório que faz parte da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica. 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 inseridos, 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.

O sistema de tração, responsável pela deformação do material, é composto de um motor de passo que pode ser visualizado na Figura 5 e utiliza um *driver* de controle. O *driver* Geckodrive G212 proporciona o acionamento para o motor de passo, responsável pela implementação de um circuito de oscilação que comanda o movimento do motor. Ele possibilita o controle do movimento através de dois sinais binários, sendo um destes o sinal de controle de direção do movimento e o outro controlando o número de passos que o motor deve deslocar. O outro sistema de atuação é a resistência elétrica, que por meio do termopar é possível controlar a temperatura do líquido que estiver colocado dentro do tanque. E assim, fazer uso da temperatura para controlar as fases de transformação da LMF, por exemplo. O efeito que ocorre para que a temperatura possa elevar-se é o efeito *Joule*, efeito que proporciona aquecimento ao material que é percorrido por corrente elétrica. A resistência é aquecida através de um controle de PWM (*Pulse Wide Modulation*), onde através da largura do pulso pode-se aumentar a tensão elétrica aplicada sobre a resistência elétrica.



Figura 5: Fotografia do motor de passo.

Esta plataforma realiza os testes nas LMF que estiverem na forma de fio ou fita. A plataforma está sensoriada de forma a acompanhar o treinamento da LMF e através da conexão com o PC podemos tanto interferir como monitorar as fases de transformação da LMF. Isto pode ser feito por meio de uma interface construída em um programa de instrumentação virtual. Uma visão gráfica da plataforma pode ser observada na Figura 6.

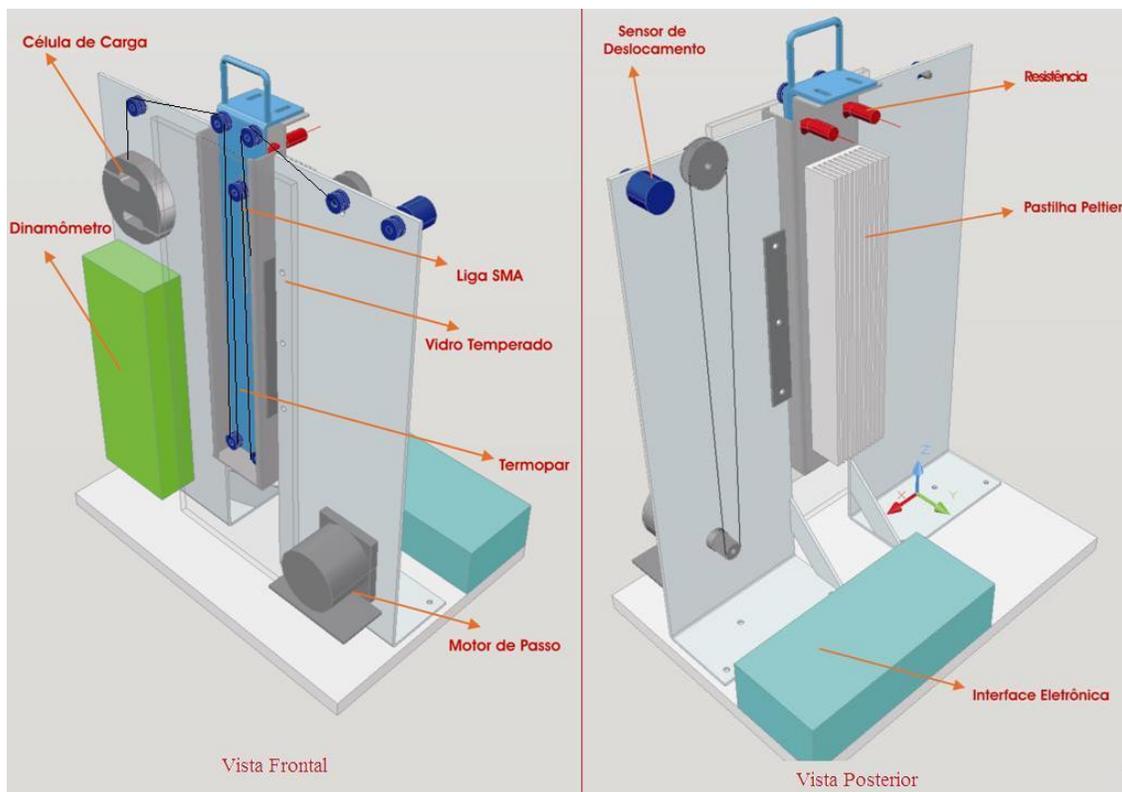


Figura 6: Vista gráfica da plataforma de testes.

No entanto, para os testes que este trabalho se propõe não é necessário o uso de todos os sensores e atuadores que a plataforma de testes possui. Na seção seguinte é feita uma explanação dos sensores e atuadores que são utilizados de fato, mostrando como estes sensores e atuadores funcionam e que tipo de interface é necessária para o seu uso. Na Figura 6, pode-se observar que a plataforma conta com vários tipos de sensores e de atuadores, porém os sensores utilizados foram: o potenciômetro multivoltas e a célula de carga, e o atuador utilizado foi o motor de passo.

3 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.

Como mencionado anteriormente, os sensores utilizados para este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foram: célula de carga; potenciômetro multivoltas. E o atuador usado foi o motor de passo. 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.

3.1 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.”

$$Tensão\ Mecânica = \frac{Tração}{Área} \quad (1)$$

Utilizando a equação acima citada podemos avaliar LMF, para caso em que a área seccional for circular ou retangular. Como neste trabalho os testes foram feitos em LMF que possuem seção reta circular, como apresentado na Figura 7, iremos nos deter apenas

a estes tipos de cálculos. Tratando-se da LMF de seção circular podemos determinar a sua área de sua seção transversal apenas conhecendo o seu diâmetro e por conseguinte o seu raio ' r '. Como apresentado na Equação 2.

$$\text{Área} = \pi * r^2 \quad (2)$$

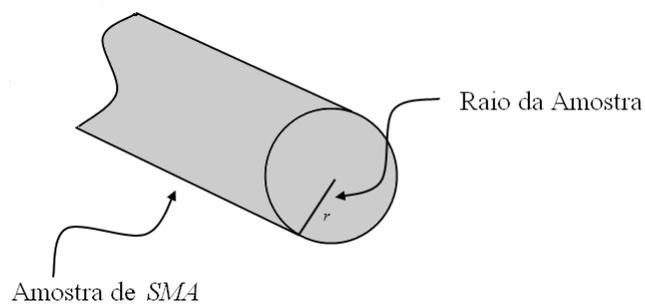


Figura 7: Fio de seção circular.

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 valores típicos do material, como: resistividade, comprimento e a área. Assim a resistência elétrica do extensômetro pode ser calculada como apresentado na Equação 3.

$$R = \rho * \frac{\text{Comprimento}}{\text{Área}} \quad (3)$$

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 8.

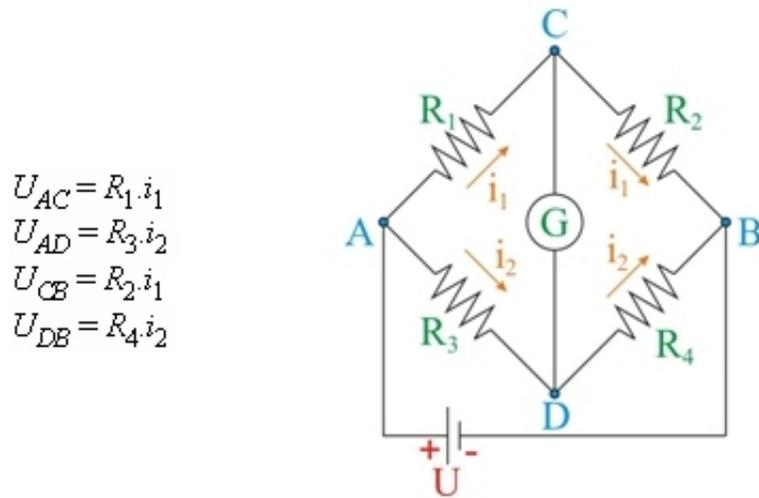


Figura 8: Ponte de Wheatstone.

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 20mV, 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 20mV se torna de 0 a 5V, assim os níveis se tornam mais adequados para o uso. A etapa de amplificação é conseguida com a utilização de um amplificador de instrumentação. Este amplificador é o CI INA101[INA 101,1998]. Na Figura 9 é apresentada a montagem do circuito de amplificação para a célula de carga por meio do CI INA101.

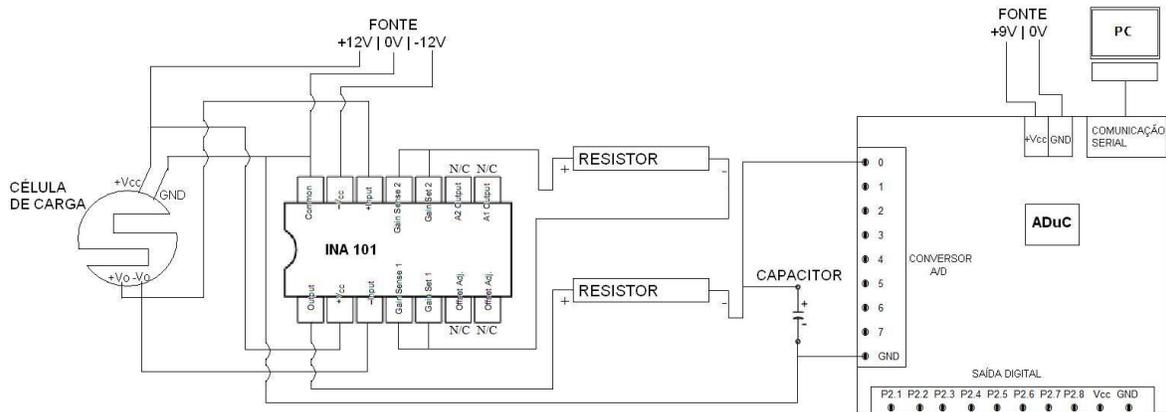


Figura 9: Diagrama elétrico para o uso da célula de carga.

3.2 Potênciometro Multivoltas

O potênciometro, 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 potênciometro multivoltas foi conectado na roldana por uma correia que sofre a atuação do motor de passo. Assim, o deslocamento que esta roldana sofrerá será transferida para o eixo do potênciometro, fazendo o mesmo variar a resistência, e assim sermos capazes de verificar a que nível se encontra a deformação na LMF. Na Figura 10 temos um esquema de como estão conectados o potênciometro e a roldana.

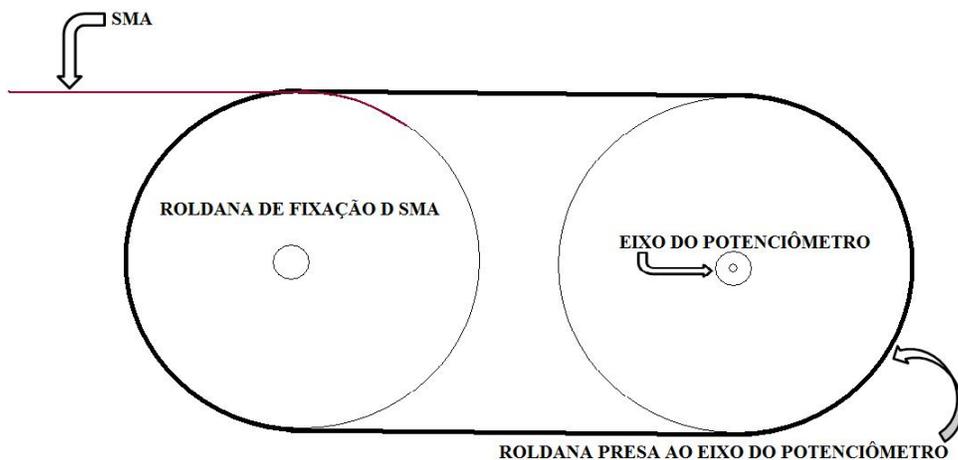


Figura 10: Conexão entre as roldanas.

O potenciômetro utilizado possui o intervalo de resistência compreendido entre 0 e $100\text{k}\Omega$, o mesmo possui um limite de dez voltas, ou seja, cada volta possui uma variação de $10\text{k}\Omega$. Para utilizarmos o potenciômetro foi necessário termos um circuito divisor de tensão, onde temos uma tensão contínua de 12V alimentando um terminal do potenciômetro e o seu terminal central é conectado em uma resistência de $10\text{k}\Omega$. Este divisor de tensão proporciona que a medida de deformação da LMF seja determinada apenas pela análise matemática, pois cada volta da roldana proporciona um deslocamento na LMF e também proporciona uma redução na tensão aplicada no potenciômetro, sendo esta relação linear. O outro terminal do potenciômetro foi conectado ao terra. Na Figura 11 é apresentado o diagrama de ligação do potenciômetro.

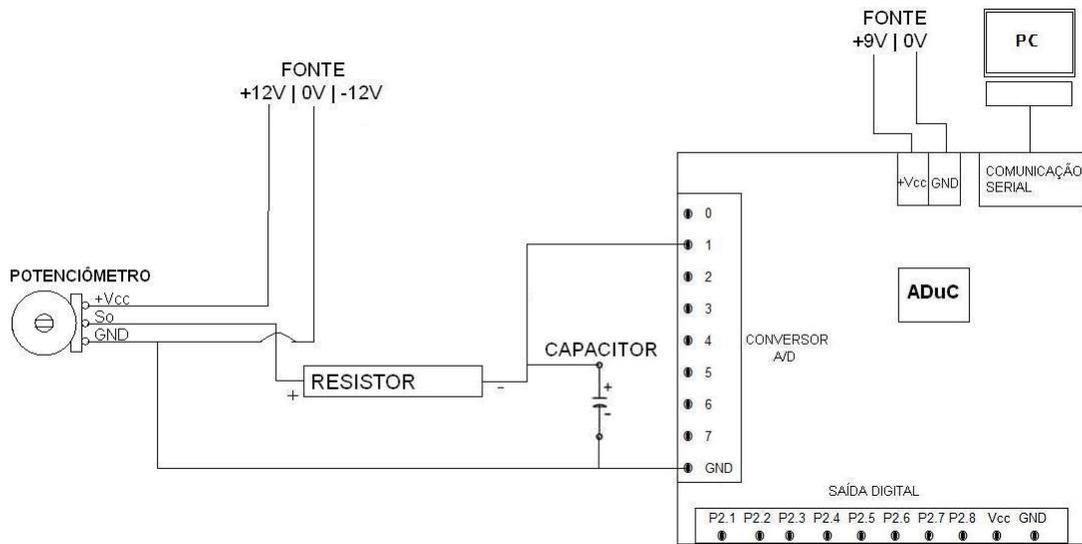


Figura 11: Diagrama elétrico para o uso do potenciômetro multivoltas.

3.3 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 consruído com ímãs permanentes confeccionados de acordo com o número de passos.” O motor é acionado cada vez que um par de estatores são percorridos por um corrente elétrica, ocorrendo um passo no eixo do motor.

O acionamento do motor de passo foi feito com um *driver* comercial que implementa o sinal de controle para que assim possamos comandar o motor de passo e proporcionar o deslocamento. O *driver* utilizado é o Geckodrive G212, o qual proporciona o controle através de dois sinais, um controla o movimento e o outro controla a direção segundo [Geckodrive,2005]. Na sua entrada é inserido dois sinais de controle. Um dos sinais irá comandar o sentido de rotação do motor, de modo que se este estiver em nível lógico

baixo o motor gira no sentido horário, caso contrário, nível lógico alto, o motor gira no sentido anti-horário. O outro sinal comanda o movimento, possibilitando deslocar a quantidade de passos que se queira. O sinal de controle deve estar em nível lógico alto e a cada transição negativa o motor percorrerá um passo de acordo com o sentido previamente estabelecido pelo primeiro sinal (sinal de controle de direção). Este sinal é representado na Figura 12.

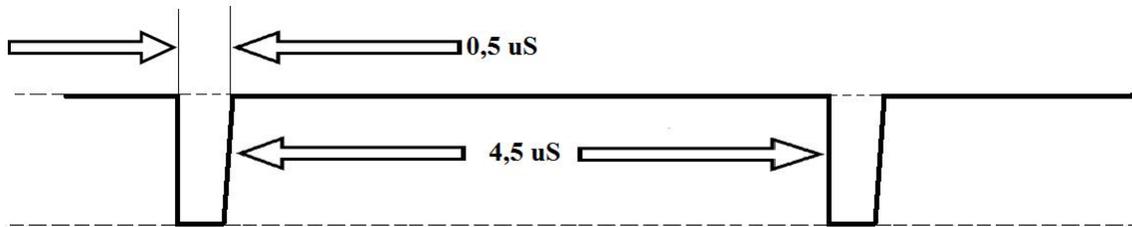


Figura 12: Pulsos de controle do *driver*.

O sinal observado nos mostra o intervalo de tempo mínimo para que o pulso possa ser interpretado pelo *driver*. Este sinal deve permanecer, no mínimo, $0,5\mu\text{s}$ em nível baixo para que seja caracterizado como um pulso e pelo menos $4,5\mu\text{s}$ em nível alto para que outro pulso seja efetuado. Sendo assim, é necessário $4,5\mu\text{s}$ para que o pulso seguinte seja utilizado pelo *driver*. Este *driver* deve ser conectado as bobinas do motor de passo e assim podemos controlar os passos no motor, pois a partir do momento que as bobinas do motor forem energizadas, este estará sendo controlado pelo *driver* e também por intermédio dos pulsos, mais precisamente pelo segundo pulso de controle.

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. Na Figura 13 está mostrado as conexões elétricas entre o microcontrolador (ADuC) [ADuC,2011], o *driver* e o motor de passo.

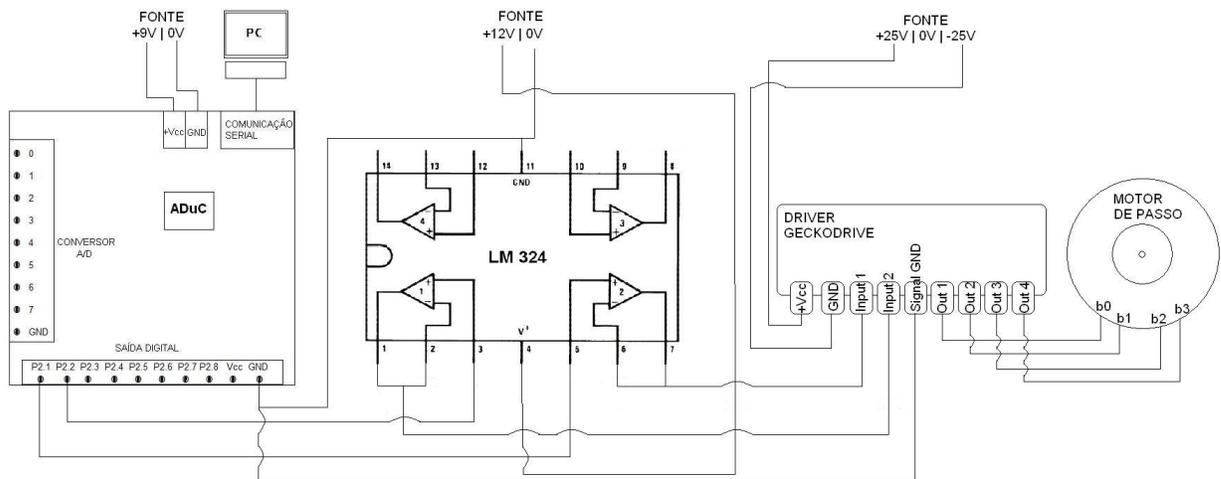


Figura 13: Diagrama elétrico para o uso do motor de passo.

O motor de passo, agora com a ligação do *driver* de controle, é capaz de proporcionar o movimento necessário para deformar a LMF, estando esse solidário a uma roldana que por sua vez está fixada a LMF através de uma correia inextensível. A roldana também está conectada no potenciômetro multivoltas. Assim, o motor proporcionará um movimento constante sobre a amostra da liga, que a deixará submetida a uma certa tração, a qual é verificada pela célula de carga. Esta amostra também sofrerá uma deformação que poderá ser verificada pelo potenciômetro multivoltas.

4 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. Na Figura 14 podemos observar como esta interface está disposta entre os componentes principais do sistema, o microcontrolador, o *software* de instrumentação virtual e a plataforma de testes, além do fluxo de dados que o sistema desenvolve.

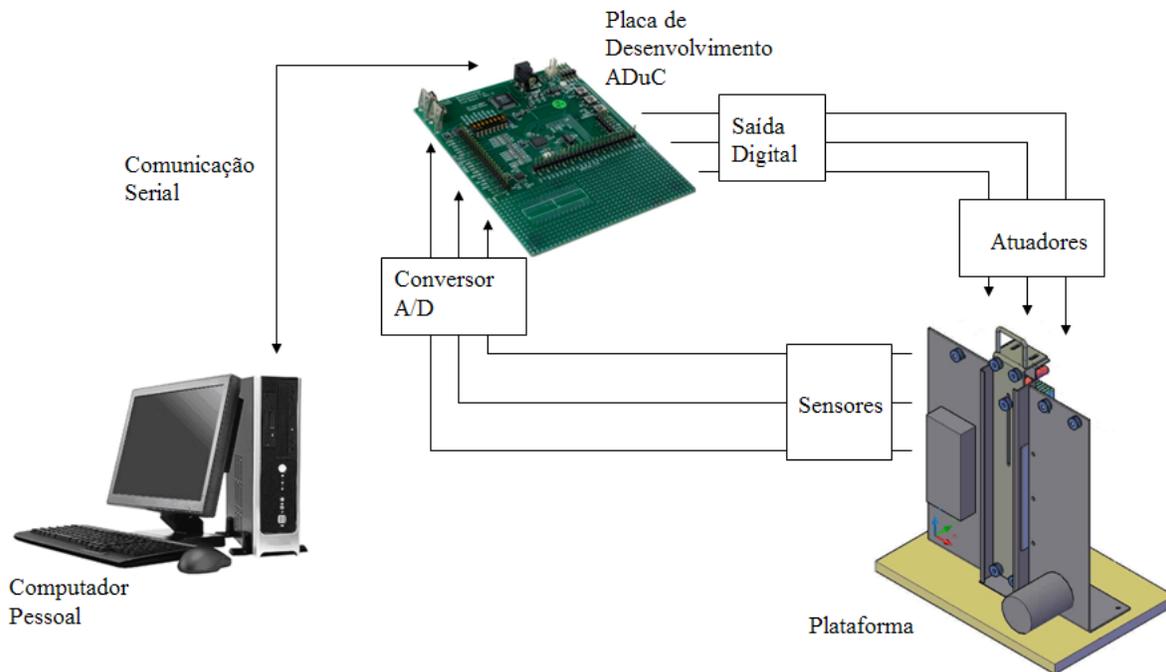


Figura 14: Interface utilizada mostrando o fluxo de dados.

4.1 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. Nessa janela de programação será feito todo o tratamento dos dados entre as entradas e as saídas do VI. As estruturas utilizadas para esta programação são do tipo: condicional, *if*, de repetição, *while*, dentre outras. A janela de programação gráfica é a interface direta com o usuário, é nela que o usuário aborda critérios de teste. Neste trabalho os critérios de teste são a deformação da amostra e a tensão mecânica máxima suportável para os testes da LMF. Esta janela é denominada de G User Interface - GUI, onde o usuário indicará as configurações de testes, a condição de comunicação e por fim recolherá valores de interesse como gráficos, ou até mesmo valores escalares. A comunicação entre o microcontrolador e a interface criada no LabView acontece por intermédio da porta serial do PC. Este processo se utiliza de um recurso da programação que é o VISA Serial, ele proporciona a leitura e a escrita através da porta serial. Assim, podemos obter leituras dos sensores presentes na plataforma de testes e também enviar informações para a atuação necessária. Na subseção seguinte faremos um detalhamento de como funciona este tipo de recurso, o VISA.

4.1.1 VISA

As funções VISA possibilitam a comunicação entre o programa LabView com outros equipamentos, que podem se utilizar de vários tipos de protocolo de comunicação. A comunicação no nosso caso se utilizou do protocolo RS-232 através da porta serial do PC. As funções VISA utilizadas foram quatro no total, sendo elas: VISA *Serial*, VISA *Write*, VISA *Read*, VISA *Close*.

VISA *Serial*

Esta função VISA é utilizada para abrir a comunicação serial, colocada no início

do programa. Porém, apenas o bloco *VISA Serial* não é capaz de realizar a função de comunicação da forma proposta, logo foi usado mais blocos que podem auxiliar na configuração da comunicação. Na Figura 15 observamos estes blocos conectados ao *VISA Serial*.

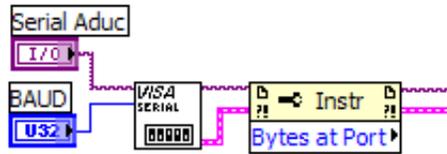


Figura 15: VISA Serial.

Estes blocos conjugados ao *VISA Serial* promovem com maior detalhamento a comunicação serial, pois assim podemos determinar a taxa de comunicação, a porta do PC utilizada para comunicação, a quantidade de *bits*, o controle do fluxo de comunicação, dentre outras funcionalidades. Assim, observamos que existem dois sinais de saída, um denominado *Error Out* e o outro é denominado *VISA Resource Name*. O *Error Out* indica se ocorreu erro durante a comunicação serial e o *VISA Resource Name* apresenta informações sobre qual porta está configurada para efetuar a comunicação serial.

VISA Write

A função *VISA Write* é utilizada para escrever qualquer dado no microcontrolador. A sua função, segundo o manual do LabView, é escrever o dado de entrada (*Write Buffer*) no dispositivo especificado pela entrada *VISA Resource Name* [Labview,2004]. A sua configuração pode ser vista na Figura 16.

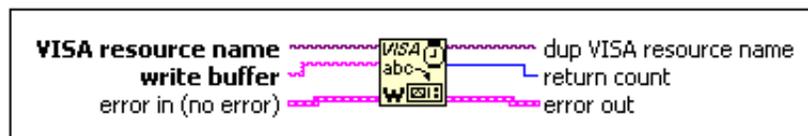


Figura 16: VISA Write.

VISA *Read*

A função VISA *Read* é utilizada para efetuar as leituras de todos os dados que são oriundos dos sensores utilizados na plataforma de testes. A sua configuração pode ser vista na Figura 17.



Figura 17: VISA Read.

O bloco VISA *Read* lê um número específico de *bytes* do dispositivo (*VISA Resource Name*) e retorna os dados para o terminal de saída (*Read Buffer*) [Labview,2004].

VISA *Close Serial Port*

A função VISA *Close Serial Port* é utilizada para terminar qualquer comunicação com a porta serial do PC e assim liberá-la. Como foi aberta uma comunicação serial na interface criada se torna necessário encerrá-la. Na Figura 18 é visto o bloco desta função VISA.

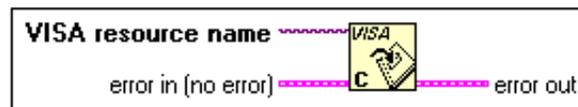


Figura 18: VISA Close Serial Port.

4.1.2 Interface Gráfica

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 programação em LabView acontece em duas janelas, uma destinada a conexões de blocos e a outra a interface gráfica com o usuário. Esta 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). Estes VI são responsáveis pela realização das funções de programação, logo ela pode conter diversas funções que possam resolver o problema proposto.

A janela GUI é utilizada como acompanhamento dos testes efetuados, onde podemos, durante os testes, mudarmos algumas condições de teste. Na janela de diagrama de blocos isso não é possível.

Na Figura 19 é possível observar a GUI construída para fazer os experimentos de tração na LMF.

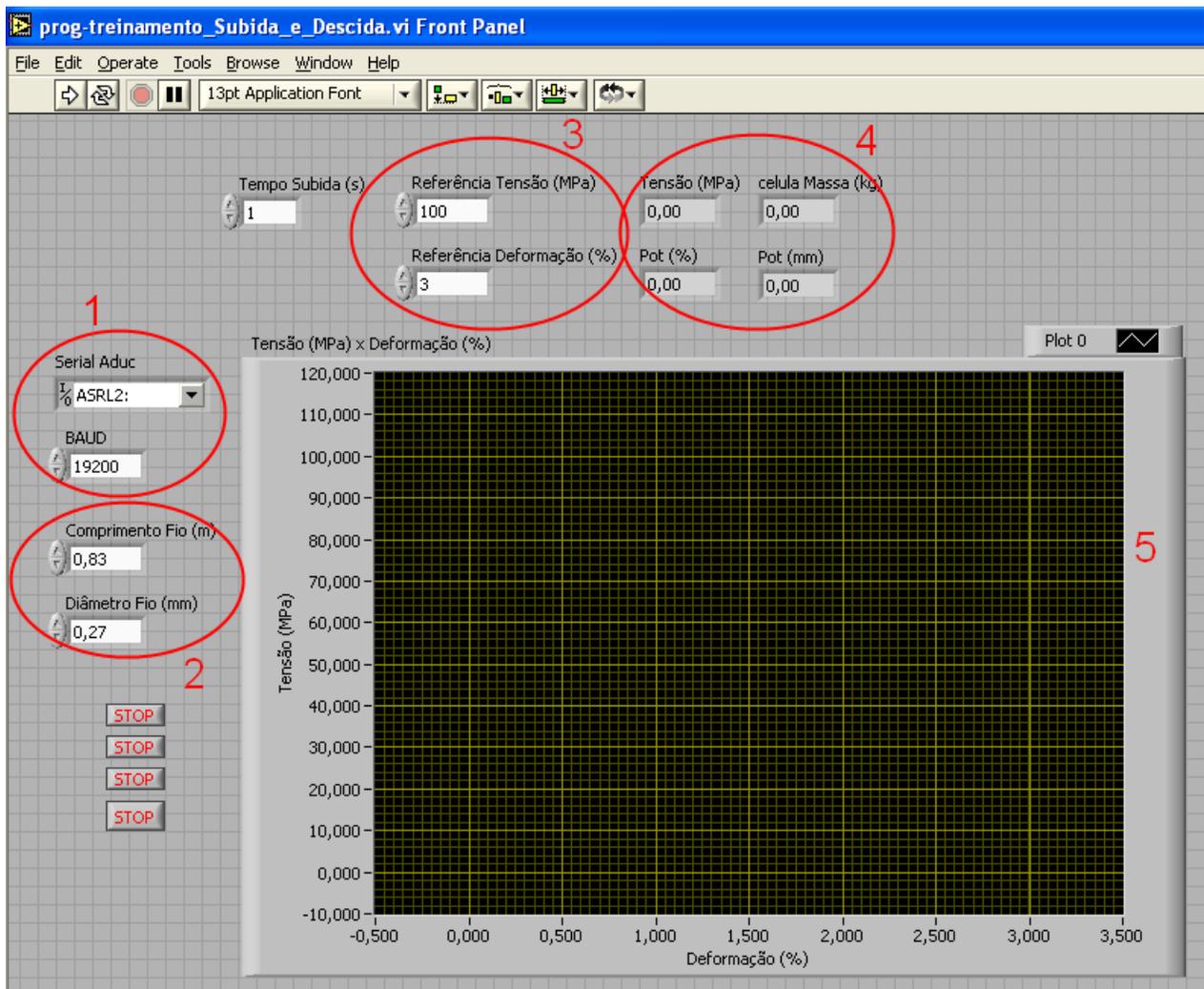


Figura 19: Interface gráfica - LabVIEW.

Na demarcação 1 é apresentada a interface de comunicação, descrevendo como deve ser a comunicação serial. Esta interface corresponde ao Bloco VISA *Serial*. Neste momento podemos determinar a porta que será utilizada para a comunicação serial e a velocidade dessa comunicação serial. A velocidade da comunicação serial é configurada também no microcontrolador.

Na demarcação 2 são apresentadas as condições do material utilizado, que são o comprimento e o diâmetro da amostra de LMF utilizada. Há de se atentar para o preenchimento desses campos, pois os mesmos são de essencial importância para as principais grandezas em análise. A deformação que surge na amostra, como também a tensão mecânica nos testes, são diretamente influenciados por estas grandezas.

Na demarcação 3 são apresentadas os critérios de parada. Quando o teste se inicia, o motor de passo faz a tensão mecânica na amostra de LMF aumentar, e aumentando a tensão mecânica aumenta-se a deformação sofrida pela amostra. Este aumento ocorre até que as duas condições sejam “quebradas”. Ocorrendo esta situação o motor de passo começa a reduzir a tensão mecânica na LMF girando em sentido contrário. Quando a tensão mecânica chegar ao nível zero, ou seja, não há nenhuma tensão mecânica aplicada sobre a amostra de LMF, o teste de tração estará concluído.

Na demarcação 4 é feita a leitura dos valores de interesse, os quais são apresentados tanto na forma direta como na forma percentual. Portanto, o valor de tensão mecânica lido em MPa é convertido para quilogramas e o valor de deformação é apresentado de forma direta em milímetro como na forma de deformação percentual.

Na demarcação 5 é apresentada a tela que ao longo do teste exibirá o gráfico de tensão mecânica (MPa) versus deformação percentual (%).

4.2 ADuC

A outra interface utilizada diz respeito ao microcontrolador, sendo utilizado o microcontrolador ADuC 842[ADuC,2011]. Este dispositivo é fabricado pela Analog Devices e propicia aos testes toda a confiança, pois se trata de um microcontrolador utilizado em muitas aplicações.

4.2.1 Visão Geral sobre Microcontroladores

Diferentes dos processadores normalmente utilizados em computadores pessoais, os microcontroladores são componentes que têm uma aplicação específica, onde o usuário está concentrado em um nível mais alto de interação do produto.

Um microcontrolador pode ser específico, para cada produto, em um sistema Embarcado de controle, caracterizando-se apenas pelo programa interno gravado em sua memória (*firmware*). Incorpora internamente vários periféricos como: memória de programa e de dados, timers, watch dog timers, comunicação serial, conversores Analó-

gico/Digital, tornando a aplicação final compacta.

Os microcontroladores são utilizados em várias aplicações, tais como: Acessórios de Informática, Produtos de Consumo, Utensílios Domésticos e Acessórios Automotivos. Por se tratar de Sistema Embutido, os microcontroladores são dedicados para o controle de determinado sistema, como os utilizados em Fornos de Microondas e Vídeos Cassetes, por exemplo, que são específicos para cada marca, modelo e série.

Para a realização de projetos em geral, são empregados microcontroladores com memória programável (Flash, EEPROM), que podem ser aplicados em atividades das mais diversas. Têm-se uma grande variedade de microcontroladores que são selecionados por famílias, onde nelas estão divididas a categoria e o tipo de aplicação.

Os microconversores da família ADuC8xx possuem o núcleo da arquitetura interna dos microcontroladores da família 8052 da Intel. O núcleo do microcontrolador 8052 é o mesmo do 8051, porém com uma memória de dados expandida para 256 Bytes e um timer de 16 bits a mais (timer 2).

4.2.2 Microconversores ADuC da Analog Devices

Baseado na arquitetura do 80C52, a Analog Devices desenvolveu uma série de microcontroladores destinados a sistemas de instrumentação. Por se tratar de microcontroladores com aplicações destinadas em sistemas analógicos, estes dispositivos foram batizados de microconversores.

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 [ADuC,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 (<http://www.keil.com>) já é compatível e dispõe de recursos para a família ADuC. O acesso a recursos adicionais de *hardware* como Conversores A/D, Conversores D/A e unidade SPI (Serial Peripheral

Interface) é feito através dos registradores de função especial (SFR – Special Function Registers).

A família ADuC possui dispositivos com vários itens de *hardware* on-chip, especialmente projetados para sistemas de controle e processamento de informações analógicas, são eles:

- Conversores A/D de 12, 16 e 24 bits, com 4, 6, 8 ou 10 canais;
- Conversores D/A de 12 bits;
- Geradores de PWM (Pulse Width Modulation);
- Comunicação serial SPI;
- Sensor de Temperatura interno;
- Condicionamento de sinal analógico, através de PGA (Progammable Gain Amplifiers);
- Leitura de sinais analógicos diferenciais;
- Monitor de Tensão de Alimentação;
- Temporizador Watchdog;
- Velocidade de aquisição de 0,105 a 400 KSPS (Samples Per Second);
- Arquitetura de alta velocidade atingindo até 20 MIPS (Mega Instruction Per Second), onde o núcleo do 8052 foi modificado para trabalhar com um ciclo de clock apenas para uma instrução;
- Clock Programável com PLL (Phase Locked Loop);
- Memória RAM de até 2304 Bytes;
- Memória de Programa de até 62K Bytes;
- Memória de dados EEPROM de até 4K Bytes.

Estas características podem ser encontradas nos diversos dispositivos ADuC, que pode ser escolhido de acordo com as necessidades do projeto em questão. Devido a necessidade de um alto nível de processamento nos sistemas embarcados atuais, a Analog Devices criou novos membros da família ADuC, que utiliza um núcleo ARM7 com arquitetura RISC, onde é possível atingir taxas de até 45MIPS.

5 Testes Realizados

Os experimentos realizados para a medição de resitência elétrica foram feitos utilizando duas amostras de Liga com Memória de Forma, as quais são do mesmo tipo. Trata-se do Nitinol, conhecido comercialmente como flexinol. Este material é constituído de níquel e titânio, cuja composição é de: 55 à 56% de níquel e 44 à 45% de titânio. O flexinol é a marca registrada de atuadores de Liga com Memória de Forma da Dynalloy Inc. Na Tabela 1 temos os dados técnicos referentes a quanta corrente e força podem ser aplicados em uma LMF de acordo com o seu diâmetro. Esta tabela informa algumas das LMF comercialmente disponíveis por Dynalloy Inc.

Diâmetro (mm)	Carga Máxima (g)	Corrente Aproximada (mA)
0,0508	35	50
0,0762	80	100
0,1016	150	180
0,1270	230	250
0,1524	330	400
0,2032	590	610
0,2450	930	1000
0,3048	1250	1750
0,3810	2000	2750
0,5080	3562	4000

Tabela 1: Propriedades técnicas e dados de projeto do flexinol

Os testes foram desenvolvidos na plataforma de testes que pode ser observada na Figura 20. 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 nas duas amostras 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 para uma LMF de 0,20 mm. Logo foi utilizado o valor de corrente

elétrica informado pelo fabricante para a atuação da LMF.

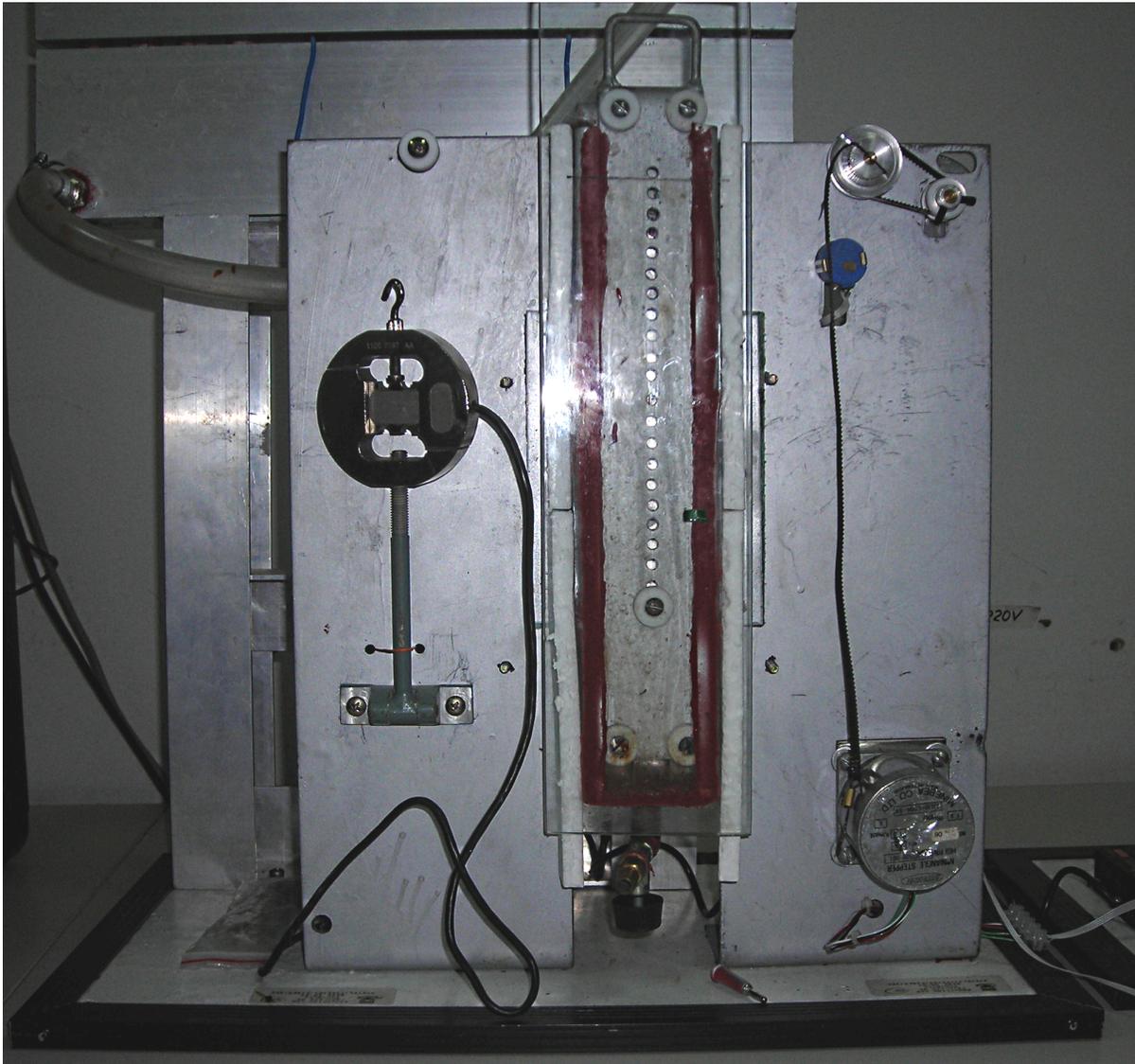


Figura 20: Fotografia da plataforma de testes.

Os testes iniciais foram efetuados e as LMF recuperaram sua forma, tornando-se prontas para a continuidade dos testes. Dessa forma, foi verificado o comprimento das LMF. Abaixo temos as informações a respeito das condições de testes.

- Amostra 1:

- Diâmetro: 0,20 mm;

- Comprimento: 0,80 m.

- Amostra 2:
 - Diâmetro: 0,20 mm;
 - Comprimento: 0,57 m.

A temperatura durante os testes era de 22°C, e foi mantida assim durante todo o experimento. De modo que a temperatura ambiente pouco afeta a deformação sofrida pela as amostras de LMF. O ensaio foi iniciado com a ligação da LMF à plataforma de testes. Como mencionado anteriormente, esta liga não está presa diretamente aos sensores (célula de carga e potenciômetro multivoltas), mas sim a correias inextensíveis que proporcionam deformação apenas para a LMF. 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. Os ensaios nos permitem fazer com que a LMF, após o término do teste, apresente uma deformação residual (ϵ_r). Nas Figuras 21 e Figura 22 são apresentados os gráficos obtidos com o teste de tração.

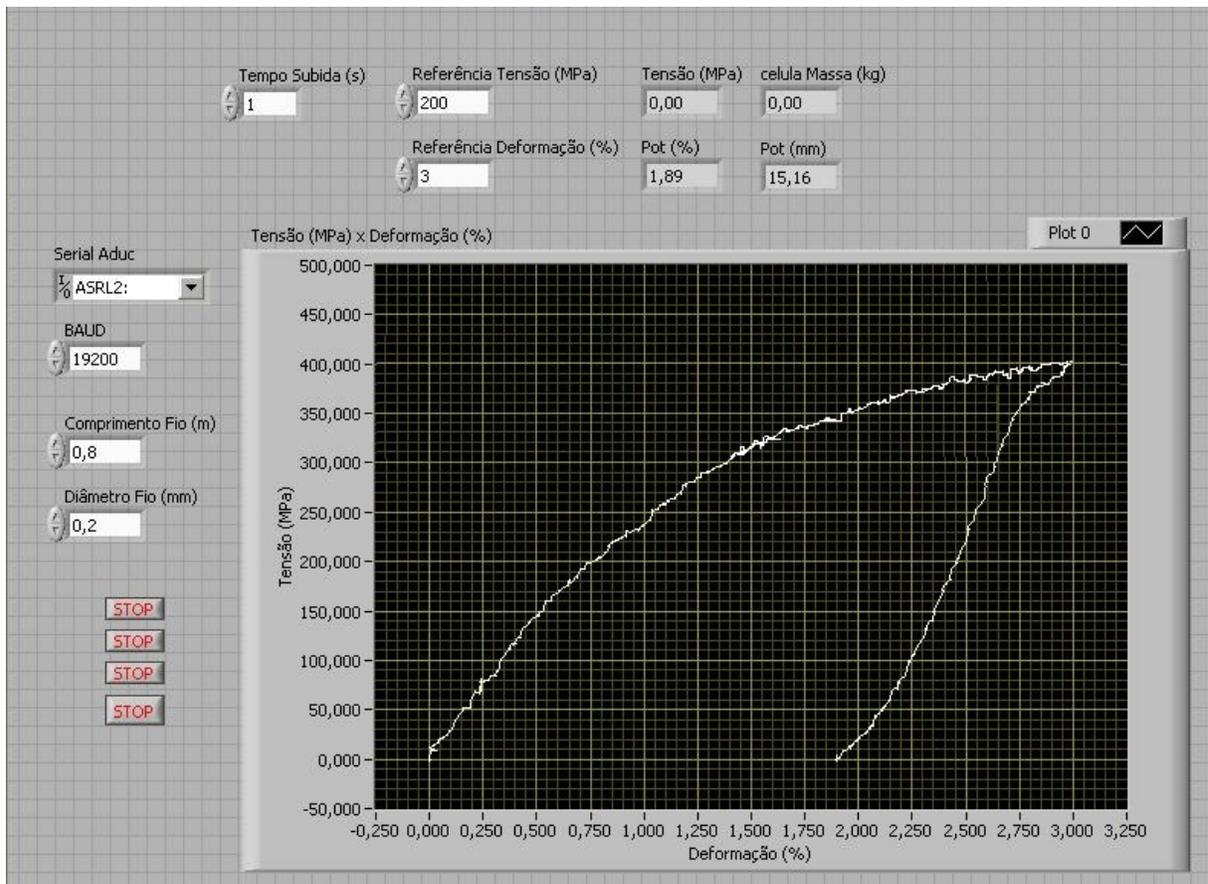


Figura 21: Teste de tração para a amostra 1.

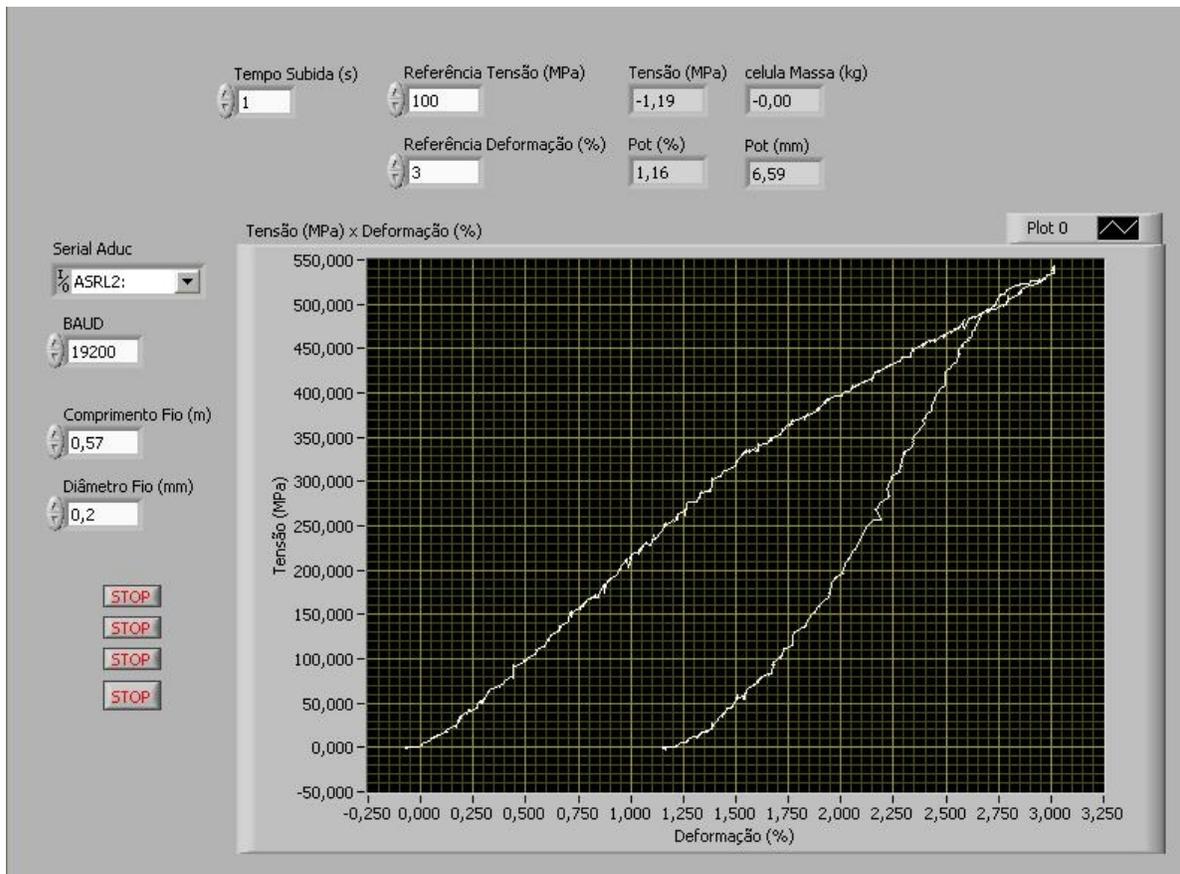


Figura 22: Teste de tração para a amostra 2.

Os parâmetros seguidos em teste foram:

- Amostra 1:
 - Tensão Mecânica: 200 MPa;
 - Deformação Máxima: 3% da amostra.
- Amostra 2:
 - Tensão Mecânica: 100 MPa;

- Deformação Máxima: 3% da amostra.

Observando a Figura 21 e a Figura 22, pode-se observar 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”. Os valores obtidos para a deformação residual são apresentados a seguir:

- Amostra 1:

- Deformação Residual: 1,89% do comprimento, que equivale à 15,16 cm.

- Amostra 2:

- Deformação Residual: 1,16% do comprimento, que equivale à 6,59 cm.

Após obtermos estas deformações em cada amostra de LMF, foi feito o teste de medição da resistência elétrica das amostras. Este teste se faz importante, pois quando se utiliza a LMF como atuador, e este utiliza corrente elétrica para conseguir o efeito de memória de forma, torna-se necessário avaliar o comportamento da resistência elétrica. Avalia-se a forma como esta resistência varia com a corrente elétrica e como a resistência varia com a deformação.

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. A variação de corrente elétrica foi feita em níveis de 50 mA em 50 mA e foi aumentada até obtermos a corrente elétrica permitida para a LMF em teste. Este valor de corrente elétrica é de 610mA, mas foi utilizado como valor máximo o valor de 600mA. Dessa forma, temos como objetivo averiguar o comportamento da LMF em relação à passagem de corrente elétrica, ou seja, em relação ao efeito *Joule*. Os testes foram realizados com a LMF sem sofrer qualquer tensionamento. 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 2 e na Tabela 3 temos os dados referentes aos testes para a verificação da resistência nos dois testes efetuados, na LMF com o comprimento de 0,80m e na LMF com o comprimento de 0,57m.

Corrente Elétrica (mA)	Tensão (V)	Deformação (mm)	Resistência (Ohm)
50	0,556	0	11,12
100	1,137	0	11,37
150	1,721	0	11,47
200	2,304	0	11,52
250	2,898	0	11,59
300	3,502	0	11,67
350	4,100	0	11,71
400	4,704	0	11,76
450	4,875	20	10,83
500	5,150	32	10,30
550	5,655	38	10,28
600	6,077	40	10,13

Tabela 2: Valores obtidos no teste de medição de resistência - amostra 1.

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	1,952	0	7,81
300	2,364	0	7,88
350	2,777	0	7,93
400	3,189	0	7,97
450	3,322	12	7,38
500	3,540	16	7,08
550	3,877	20	7,05
600	4,218	21	7,03

Tabela 3: Valores obtidos no teste de medição de resistência - amostra 2.

A partir das Tabelas 2 e 3, foi construído os gráficos de corrente elétrica em função da resistência. . Estes gráficos apresentam a curva da corrente versus a resistência, na qual podemos observar o aumento da resistência à medida que a corrente aumenta, até atingir 400mA. Porém, para valores abaixo de 400mA, o valor da resistência da LMF não sofre muita variação, conseguindo o seu valor máximo por volta de $11,76\Omega$. E a partir deste valor de corrente elétrica (400mA) observa-se que a resistência começa a diminuir, e quando a corrente máxima do teste é atingida temos que a resistência por volta de $10,13\Omega$. Logo, a resistência sofreu uma variação de $1,63\Omega$. Na Figura 23 temos o gráfico correspondente da variação resistiva para a LMF-1 (comprimento - 0,80m).

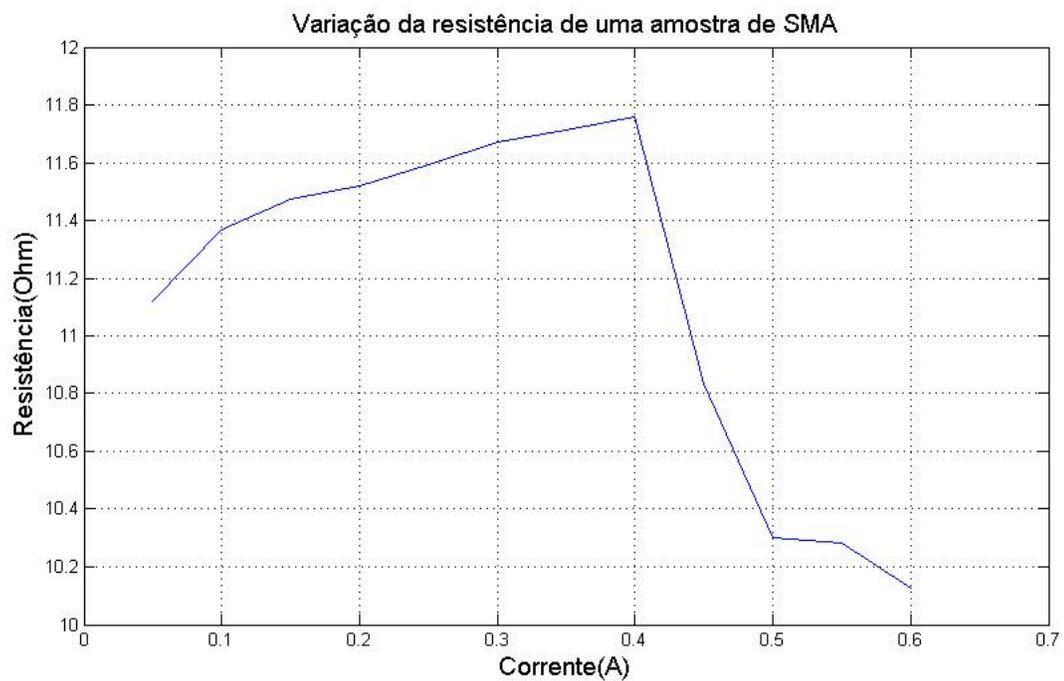


Figura 23: Variação da resistência elétrica - amostra 1.

Os mesmos testes foram efetuados na LMF-2 (comprimento - 0,57m). Ao analisarmos a Figura 24, observamos o comportamento resistivo da LMF e verificamos que a resistência máxima é $7,97\Omega$. Este valor é observado na região em que a LMF não está sujeita a recuperação de forma. Após o aumento da corrente elétrica, a LMF entra na região de transformação de fase e o valor da resistência é $7,03\Omega$. Sendo assim, a LMF sofreu uma variação de $0,94\Omega$.

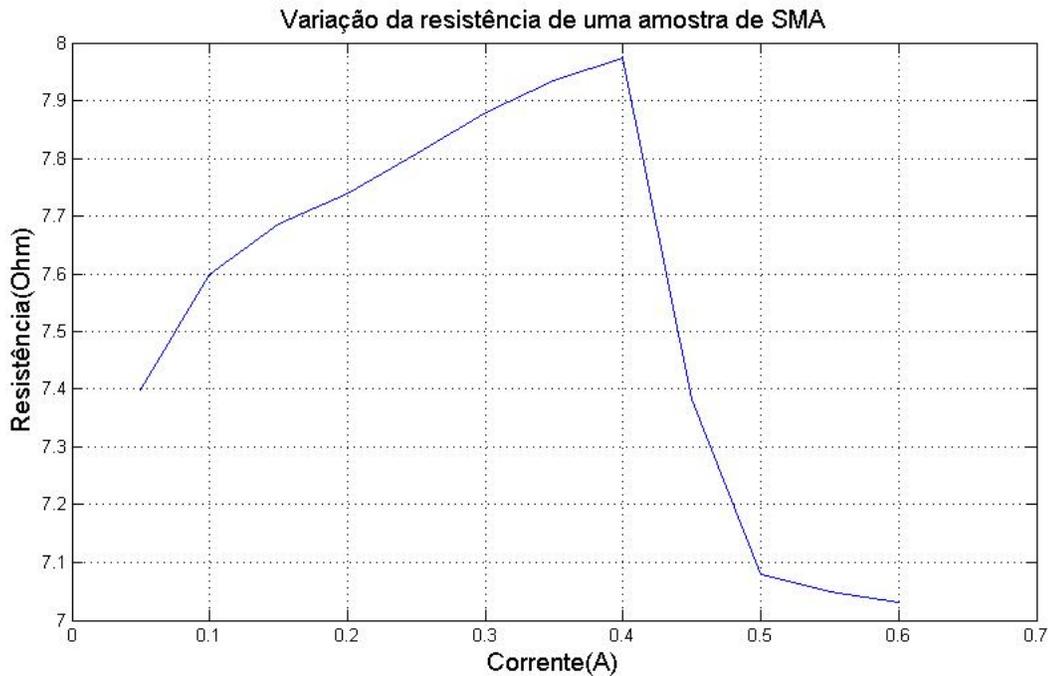


Figura 24: Variação da resistência elétrica - amostra 2.

Na Figura 25 é observado o comportamento da variação da resistência quando a LMF está recuperando a sua forma. Analisando 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 400mA. Esta transformação de fase diz respeito à recuperação por aquecimento. 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 25, 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. Neste caminho (caminho de aquecimento-recuperação) a LMF passa por alguns pontos de interesse [Novak,2008], que são as temperaturas de transformação de fase:

- A_s - Temperatura de início da transformação austenítica;
- A_f - Temperatura de fim da transformação austenítica;

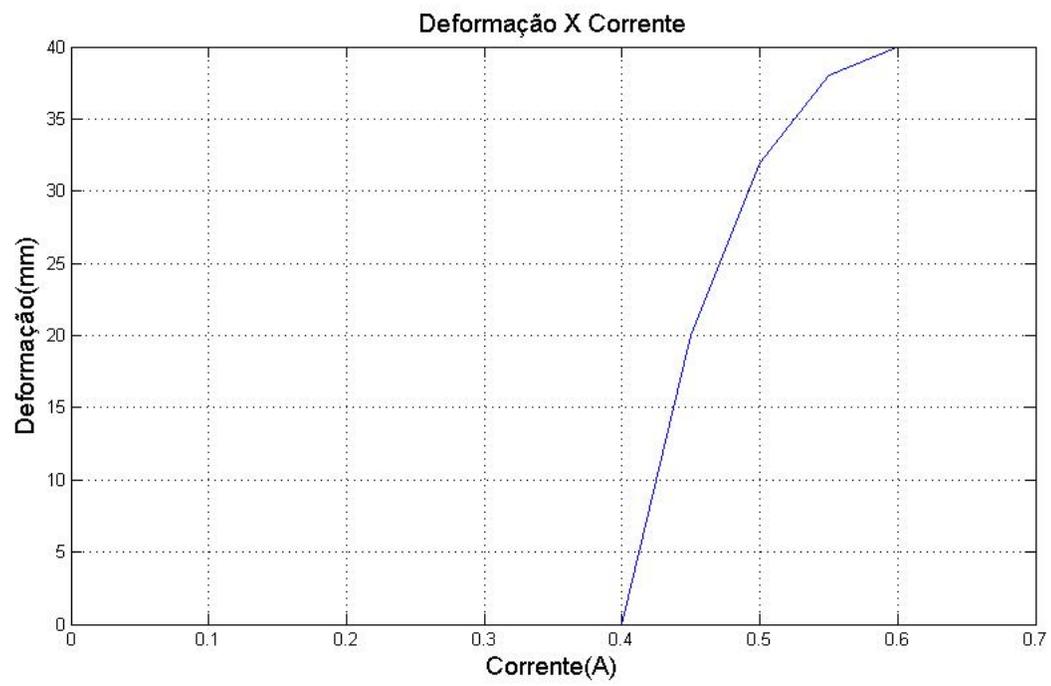


Figura 25: Comportamento da deformação.

6 Conclusões

Os testes de avaliação da resistência elétrica das LMF se tornam importantes quando elas são utilizadas como atuadores, pois dessa forma podem-se utilizar os dados obtidos como critérios de atuação, ou até mesmo fazer um estudo técnico anterior a implementação das estruturas. Isto permite decidir qual o tipo de LMF a 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 sabe-se 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 de uma estrutura que se utilize de LMF como atuadores.

7 Propostas para Trabalhos Futuros

Este trabalho proporciona uma área de atuação bem ampla devido ao crescente uso de materiais com memória de forma. Sendo assim, podemos ainda realizar outros estudos acerca do comportamento resistivo da LMF. Os estudos poderiam tratar sobre as medições de resistência enquanto a LMF sofre a deformação, ou até mesmo avaliar mais tipos de LMF constituídas de outros materiais, como a de Cu- Al-Ni, entre outras. Pode-se ainda determinar qual a corrente de início de atuação da liga, o que permite o dimensionamento elétrico. É importante também realizar estudos sobre o comportamento de saturação das LMF, o que proporciona a determinação do limite de atuação da liga.

Referências

- [Novak,2008] V. Novak, P. Sittner, G.N. Dayananda, F.M. Braz-Fernandes, K.K. Mahesh, 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, ISSN 0921-5093, DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.162. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TXD-4NXRMJS-F/2/05f571136844d6550eef840d5da55c20>) Keywords: NiTi; Wires; Electric resistance; Thermomechanical tests
- [Valenzuela,2005] VALENZUELA, W. A. Sistema de articulação atuado por meio de liga com memória de forma. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.
- [Valenzuela,2007] VALENZUELA, W. A. Modelagem e Simulação de um Atuador de Liga Metálica com Memória de Forma. Tese (Projeto de Pesquisa) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Maio 2007.
- [ADuC,2011] <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADUC841_842_843.pdf> Acessado em: 02/02/2011.
- [Neto,2008] NETO, J. F. C.; ARAÚJO, C. J. de. Estudo experimental do comportamento eletro-termomecânico de atuadores lineares de niti com memória de forma. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, Agosto 2008.
- [Luecke,2005] LUECKE, J. Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications. 1^o. ed. [S.l.]: Elsevier, 2005. ISBN 0-7506-7810-0.
- [Norton,2004] NORTON, R. Projeto de Máquinas. 2^o. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. ISBN 85-363-0273-9.
- [Patsko,2006] PATSKO, L. F. Controle de Motor de Passo. [S.l.], Dezembro 2006.

[Geckodrive,2005] GECKODRIVE. Manual G212. [S.l.], Junho 2005.

[Labview,2004] LABVIEW, N. I. Ajuda do Software LabVIEW. 2004.

[INA 101,1998] TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet CI INA 101. Julho 1998.