

5 Sistema Experimental

5.1 Detalhes do material

O polímero utilizado foi a fita acrílica dupla face VHB4905, produzida pela 3M. A composição química não é informada pelo fabricante, e o material está disponível no mercado dos EUA sob encomenda na forma de um rolo com 0,5mm de espessura, e largura e comprimento especificáveis. Todos os testes foram realizados no Laboratório de Robótica da PUC-Rio a uma temperatura aproximada de 23°C. Dois materiais foram utilizados para suportar e manter o polímero com a pré-deformação desejada antes dos testes. Para uma moldura circular foi utilizado Nylon 6, que é um plástico da família poliamida (PA 6), com 7mm de espessura. Este nylon é o mais comum no mercado e foi fornecido pela empresa Day Brasil S/A. Para os outros testes, foram utilizadas 4 placas de fenolite de 170mm de comprimento, 37mm de largura e 4,5mm de espessura. Em ambos os casos o polímero era esticado em um equipamento desenvolvido no laboratório com perfis de alumínio e preso entre um par dessas molduras (ou placas).

5.2 Descrição dos experimentos

Suportes usados em bancadas ópticas, que oferecem ajustes de distâncias com incrementos de décimos de milímetros tanto em altura (suporte-elevador) quanto em comprimento (suporte-separador) e uma base com diversas posições para a fixação desses componentes, foram utilizados para fixar o atuador estudado, vide Figura 28.

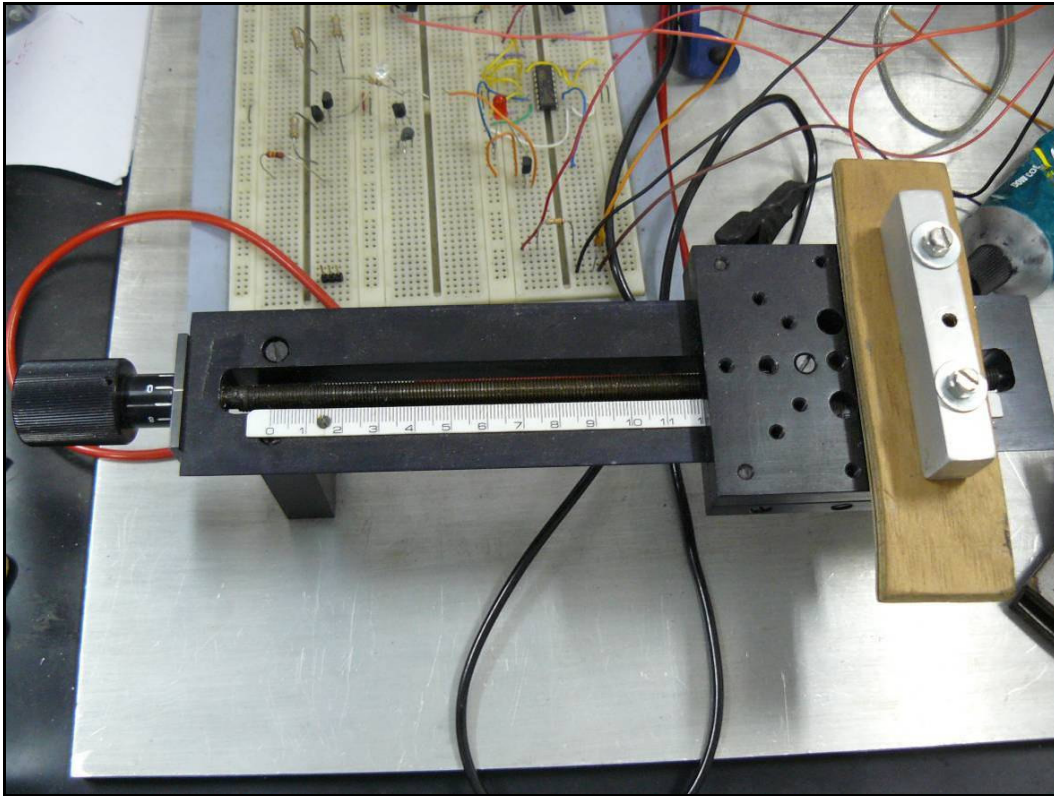


Figura 28: Suporte separador onde são presos os atuadores.

Com estes equipamentos, montou-se uma bancada de testes (ver Figuras 30 e 31) onde se fixou um sensor de força LCEB-5 da Omega Engineering Inc. no suporte-elevador (vide Figura 29) e uma conexão para pinos no suporte-separador. O conector de pino foi desenvolvido para prender diferentes atuadores poliméricos. Em cima do restante da base colocaram-se os outros equipamentos de leitura de sinais e atuação do músculo. Estes últimos consistem do circuito de atuação desenvolvido, o CompactDAQ e a fonte de 18VDC.

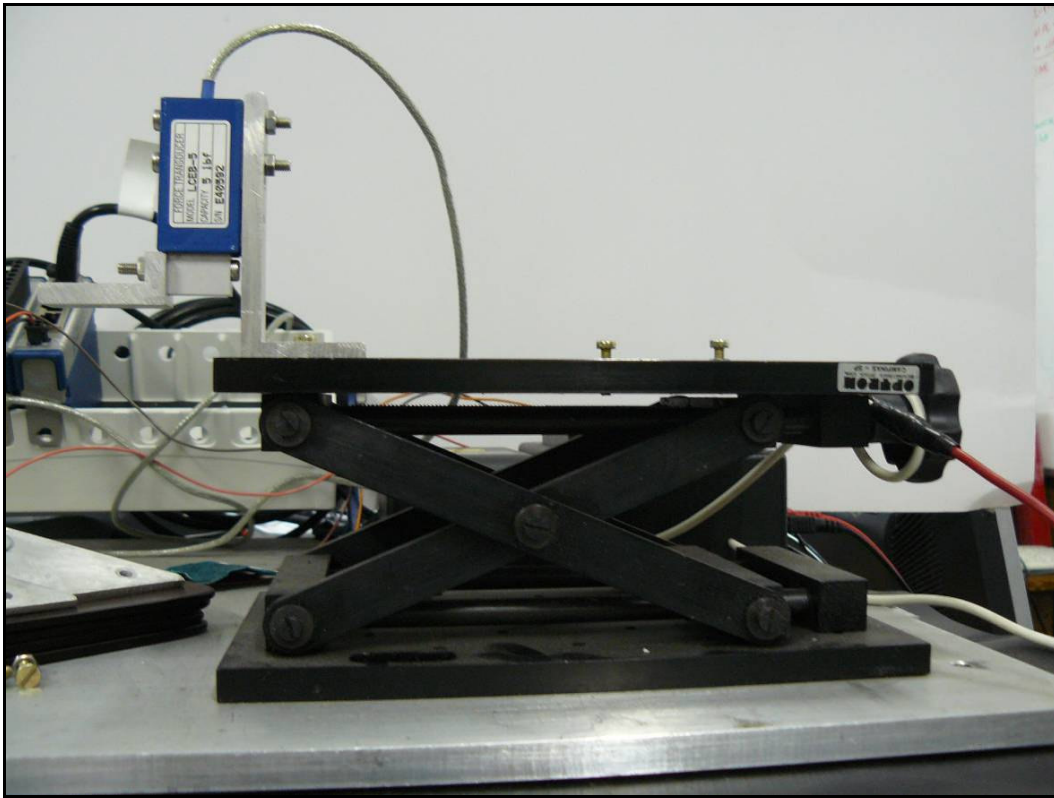


Figura 29: Suporte elevador onde é preso o sensor de força (no alto à esquerda).

Nesta bancada fixou-se o polímero nas duas configurações estudadas na pesquisa: molduras circulares de nylon para estudo da deformação, e molduras retangulares de fenolite para estudo da força, e aplicou-se diversos perfis de tensão de acordo com cada característica em estudo.

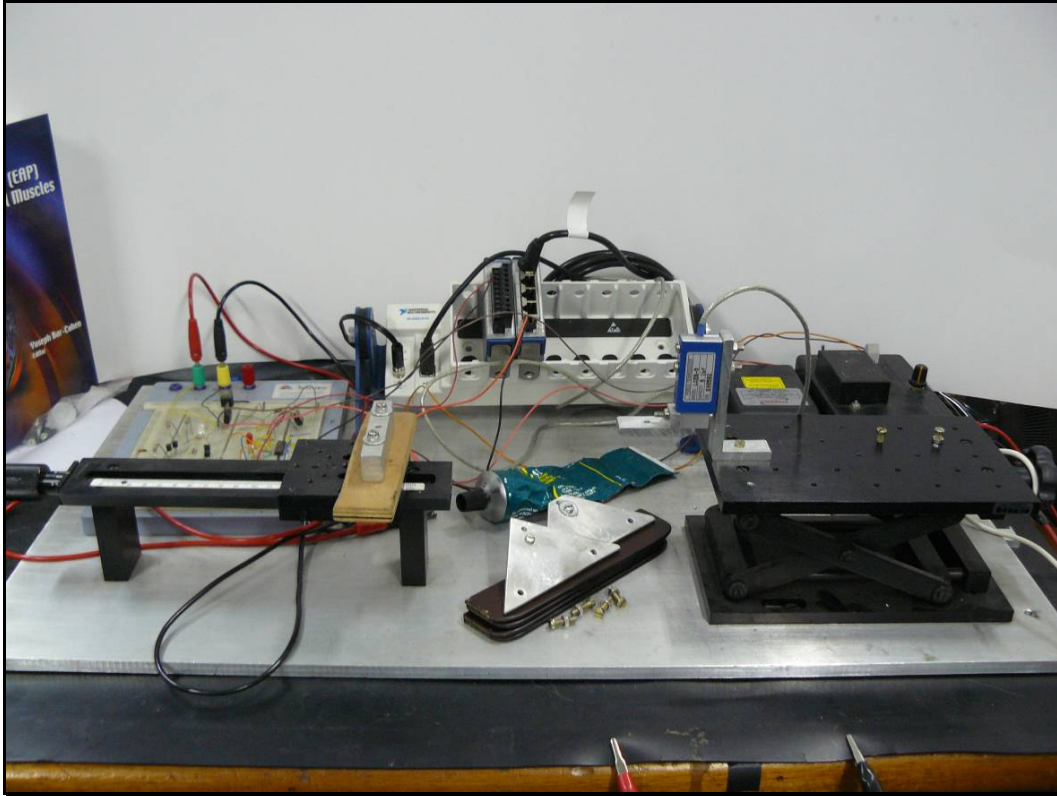


Figura 30: Bancada de teste sem o atuador.

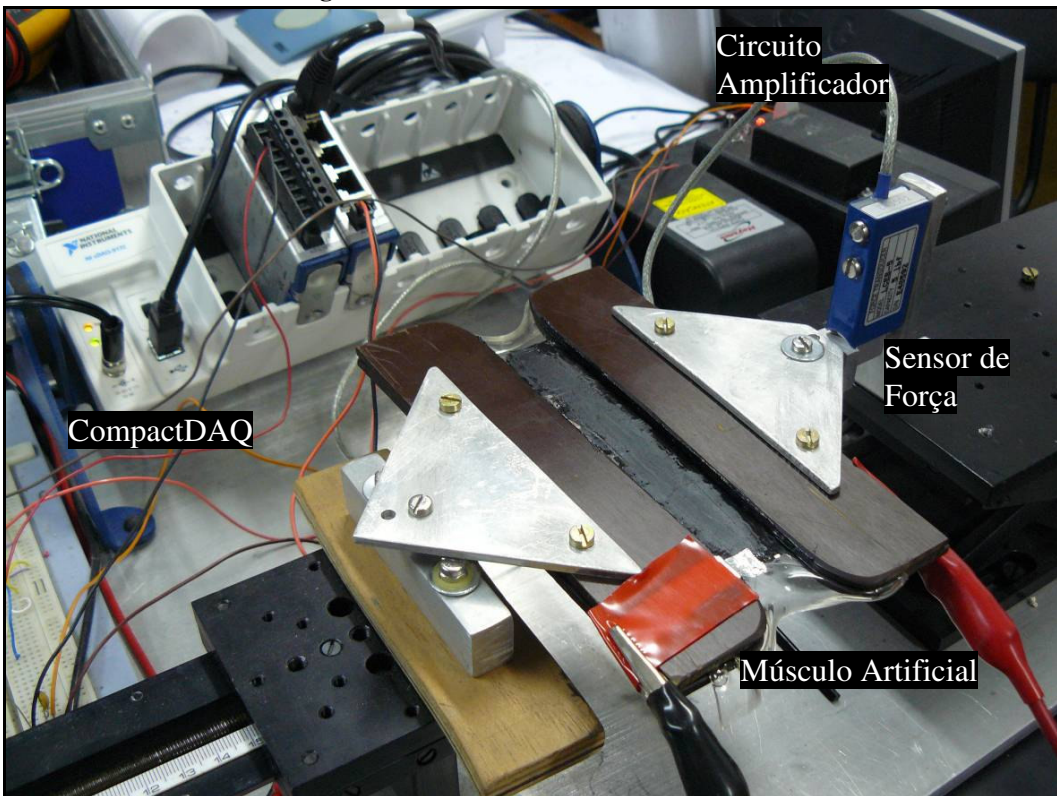


Figura 31: Detalhe da bancada com o atuador montado.

5.2.1 Deformação em uma moldura fixa

Essa experiência foi realizada para reproduzir um dos marcos publicados na área que mostra o potencial dessa tecnologia. Para tal foram cortadas duas molduras circulares de nylon com 95 mm de diâmetro interno, e o polímero foi colocado entre as molduras com uma deformação inicial de 400% em ambas as direções x e y . Foi desenhada uma região ativa com a graxa condutora na forma de um círculo com 8 mm de diâmetro (como mostra a Figura 32), de forma a reproduzir o experimento de Wissler e Mazza (Wissler e Mazza, 2006), que foi a maior deformação encontrada nos artigos estudados para essa pesquisa. Aplicou-se um perfil de tensão em forma de rampa com uma inclinação de 20,7 V/s, atingindo uma tensão máxima de 4,1kV (quando ocorreu a quebra do dielétrico) para verificar a deformação máxima. Vale ressaltar que o perfil de tensão aplicado por Wissler e Mazza foi uma tensão constante de 3,5kV durante 900s, e que o polímero utilizado foi o VHB4910. Essas seriam as principais diferenças entre os experimentos e serão melhor exploradas na seção seguinte.

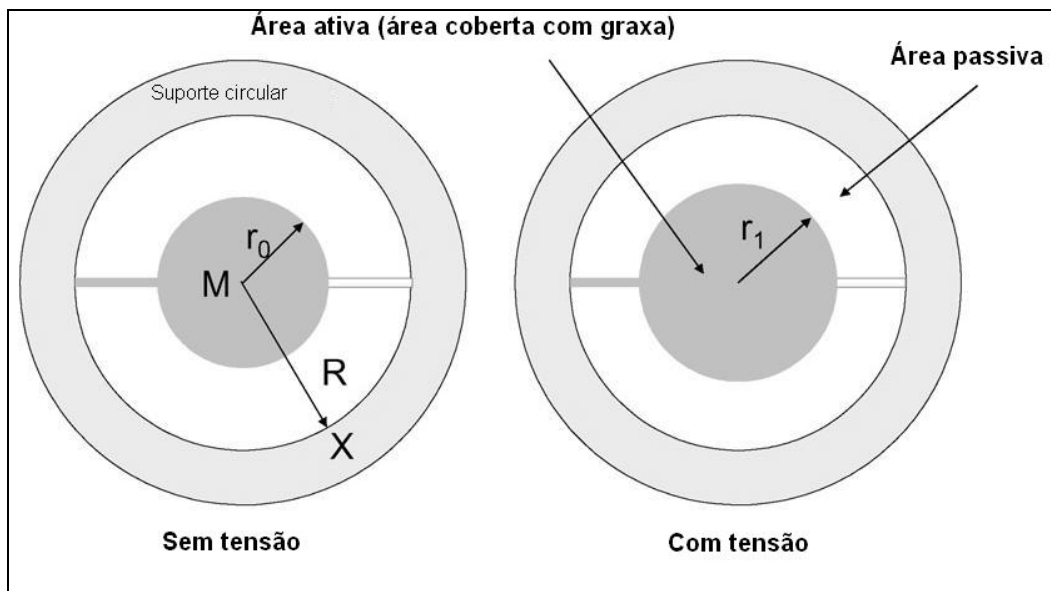


Figura 32: Esboço do experimento de deformação mostrando as regiões ativa e passiva, antes e depois de aplicar a tensão elétrica [Wissler e Mazza, 2006].

5.2.2 Relaxamento do polímero

Construiu-se um atuador de força que consistiu em prender uma amostra retangular de polímero, pré-esticado com 400% em uma das direções (a direção x na Figura 33), com quatro pedaços retangulares de fenolite. A parte marrom representa um par de placas de fenolite com parte do polímero no meio e a região preta simboliza a região ativa do polímero.

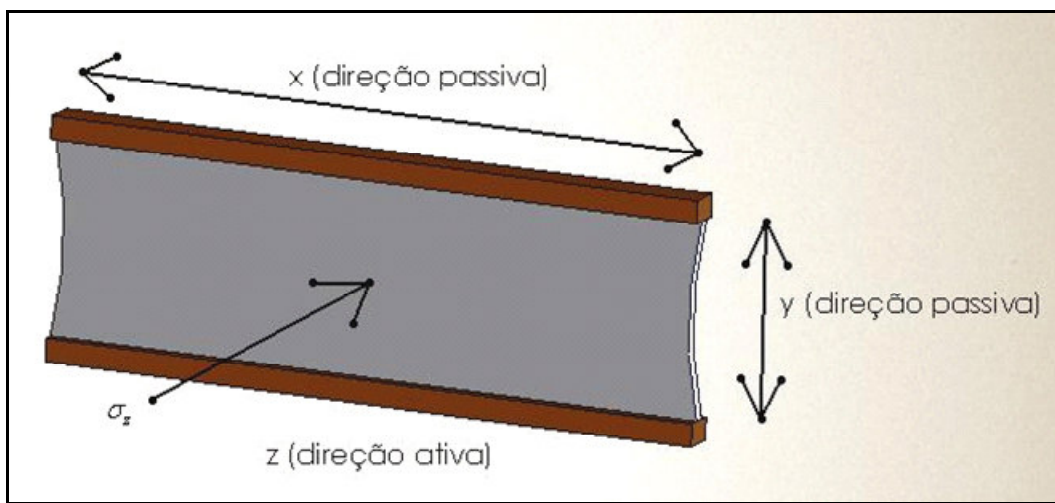


Figura 33: Esboço mostrando a montagem do atuador utilizado nos experimentos.

As placas de fenolite são presas na bancada entre o suporte separador e o sensor de força. De forma a minimizar ao máximo os efeitos da viscoelasticidade do material, antes dos testes de resposta de força, o polímero era esticado na bancada até a deformação desejada na direção y. Assim ele permanecia durante longos períodos de tempo (dois dias no máximo) até que a variação de força do atuador devido ao relaxamento do polímero fosse desprezível.

5.2.3 Resposta de força sem estímulo elétrico

Para analisar a variação da tensão mecânica do polímero com relação a sua deformação foi montado o mesmo experimento descrito na seção 5.2.2 sem as pré-deformações do polímero e sem a aplicação de tensão elétrica como mostra a Figura 34. Inicialmente o atuador foi preso na bancada com as placas de fenolite bem próximas de forma que a força lida pelo sensor fosse o menor valor positivo

possível. Em seguida a distância entre as placas de fenolite era incrementada em 1mm a cada 3 minutos, até a quebra do polímero devido a tração aplicada sobre o material. Os valores de força do experimento foram salvos em uma planilha do Excel e comparados com os valores obtidos através do modelo de Ogden ajustado através do método dos mínimos quadrados.

5.2.4 Resposta de força com estímulo elétrico

Com a configuração descrita anteriormente (como mostra a Figura 34), diferentes perfis de tensão são aplicados no polímero. Experimentou-se perfis como rampas, degraus, senos e dentes de serra, com diferentes frequências, e tensões constantes também.

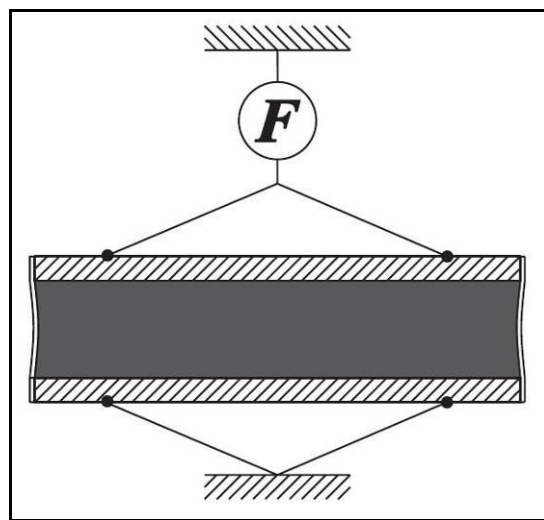


Figura 34: Esboço da montagem dos testes de força com molduras de fenolite [Kofod, 2001].

Não só a força foi monitorada, mas também a tensão aplicada. Todas as informações foram salvas em planilhas (MSExcel).

Foram feitos também testes de forma a obter curvas de força em função da deformação para diferentes valores de tensão. Para tal, variou-se a deformação do polímero de 100% a 400% a uma taxa de 1mm a cada 3 minutos para valores de tensão que variavam entre 1,5kV a 5,5kV.

5.2.5 Aplicação do controlador desenvolvido

Por último, testou-se um controlador PID padrão, onde os ganhos são constantes, para fazer o controle de força do atuador. Por não levar em conta as não-linearidades do sistema, a utilização desta tecnologia pode prejudicar a estabilidade do mesmo, pois com os ganhos constantes o controlador não é capaz de ajustar a saída de um sistema que possui uma dinâmica diferente dependendo da tensão elétrica aplicada e da sua espessura.

Foi testado também um controlador PID cujos ganhos foram alterados de acordo com o estado atual do polímero utilizado conforme descrito na seção 3.3. Esse ajuste seguiu as equações desenvolvidas no Capítulo 3. Desta maneira o controlador acaba sendo ajustado automaticamente ao sistema fornecendo um comportamento dinâmico igual para qualquer estado em que o polímero se encontre.

Na realização dos testes, foram aplicados diversos degraus de valores desejados de força em diferentes faixas de atuação do sistema, de modo a explorar os efeitos não-lineares detalhados no Capítulo 3.

5.3 Equipamentos

Utilizou-se para o experimento dois equipamentos (um de aquisição e outro de atuação) da National Instruments Corporation. Para atuar no polímero e ler a força gerada, utilizou-se o CompactDAQ (www.ni.com/compactDAQ) com dois módulos distintos (Figura 35). Este equipamento consiste em um chassi com oito *slots* para conexão de diversos módulos, tanto para aquisição quanto para atuação. Sua comunicação com o computador é feita através do barramento USB2.0, e sua alimentação é feita com uma fonte de 12V que acompanha o aparelho na compra. Ele possui um botão de dois estados para ligá-lo e desligá-lo e cada *slot* possui um conector do tipo DB15 fêmea para a alimentação e comunicação entre o chassi e os módulos. Estes por sua vez podem ser aquisitores de dados com diferentes números de canais de entrada, diversas taxas de aquisição e resoluções de 12, 16 e 24 bits, a serem escolhidos de acordo com as

necessidades do projeto. Cada módulo de aquisição já vem com um condicionador de sinais específico para o tipo de sensor a ser utilizado. Como nessa experiência necessitava-se ler os dados de um sensor de força (do tipo *strain gauge*), optou-se por utilizar o módulo NI9237. Este módulo possui quatro entradas analógicas de -25mV a 25mV, com 24 bits de resolução com uma taxa máxima de aquisição de 50kS/s para cada canal. Seu condicionador de sinais interno permite a utilização de sensores *strain gauge* de meia ponte e de ponte completa, com tensões de excitação de até 10V. Caso a potência exigida (do sensor ou de todos os sensores conectados ao módulo) seja superior a 150mW, uma fonte externa deve ser ligada ao módulo.

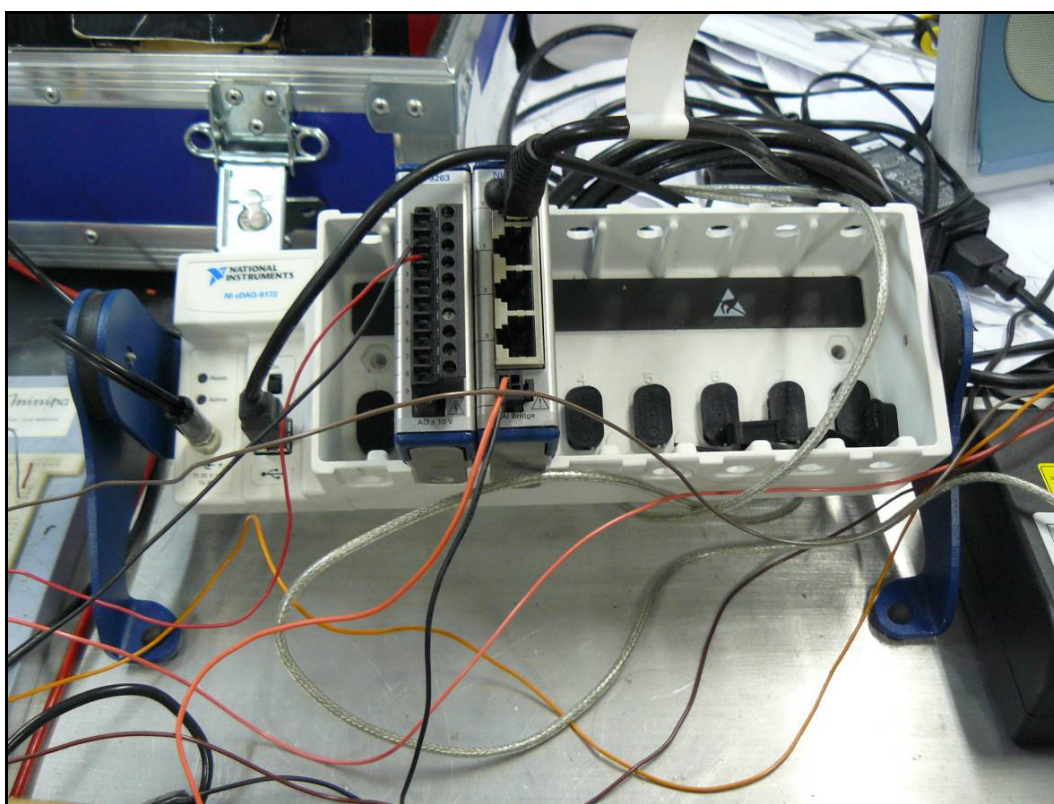


Figura 35: Módulo CompactDAQ com apenas dois módulos para leitura do sensor de força e atuação sobre o sistema.

Para atuação sobre o sistema, escolheu-se utilizar o módulo NI9263, que possui 8 saídas analógicas de -10V a 10V (configuráveis para outras faixas de atuação) com 100kS/s de atualização das saídas para cada canal e 16 bits de resolução. Esse módulo fornece apenas uma tensão de referência, podendo fornecer no máximo 1mA de corrente.

Esses dois módulos, juntamente com o chassi CompactDAQ, são responsáveis pela leitura da força do músculo e pela sua atuação. Para obter a

leitura da tensão que está efetivamente sendo aplicada no polímero, optou-se por utilizar o módulo USB-6009 (<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14605>) de baixo custo também da National Instruments mostrado na Figura 36. Esse módulo possui diversas entradas e saídas tanto analógicas quanto digitais com uma resolução de 14bits a uma taxa de 48kS/s no máximo.

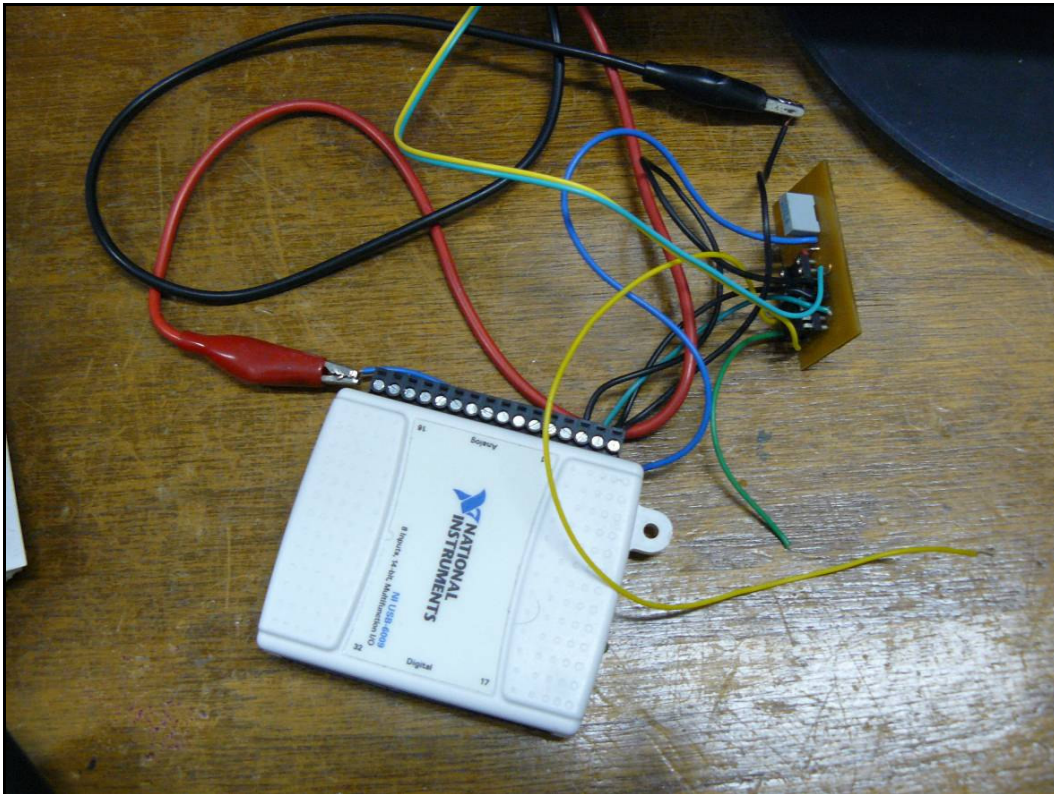


Figura 36: Módulo USB-6009 com o circuito de condicionamento para leitura do sensor de alta tensão.

5.4 Sensores

As duas grandezas lidas durante as experiências foram a força exercida pelos atuadores e a tensão elétrica aplicada nos mesmos. Para que essas grandezas sejam lidas pelo computador, dois sensores foram adquiridos. Para a tensão, utilizou-se o divisor de tensão V1G com uma razão de 1000:1 da Emco High Voltage Corporation (*datasheet* no Apêndice). Esse sensor consiste de dois resistores em série (um com 999M Ω e o outro com 1,11M Ω), de forma que a leitura da tensão (se feita por um equipamento com 10M Ω de impedância de

entrada) sobre o resistor de menor resistência seja de um milésimo da tensão aplicada sobre o mesmo. Para a leitura da força, utilizou-se a célula de carga LCEB-5 da Omega Engineering Inc. (*datasheet* no Apêndice), que fornece uma leitura de até 5 lb (ou 22,3 N) para tração ou compressão. É um sensor com *strain gauge* na configuração de ponte completa, alimentado com 10V, vide Figura 37.

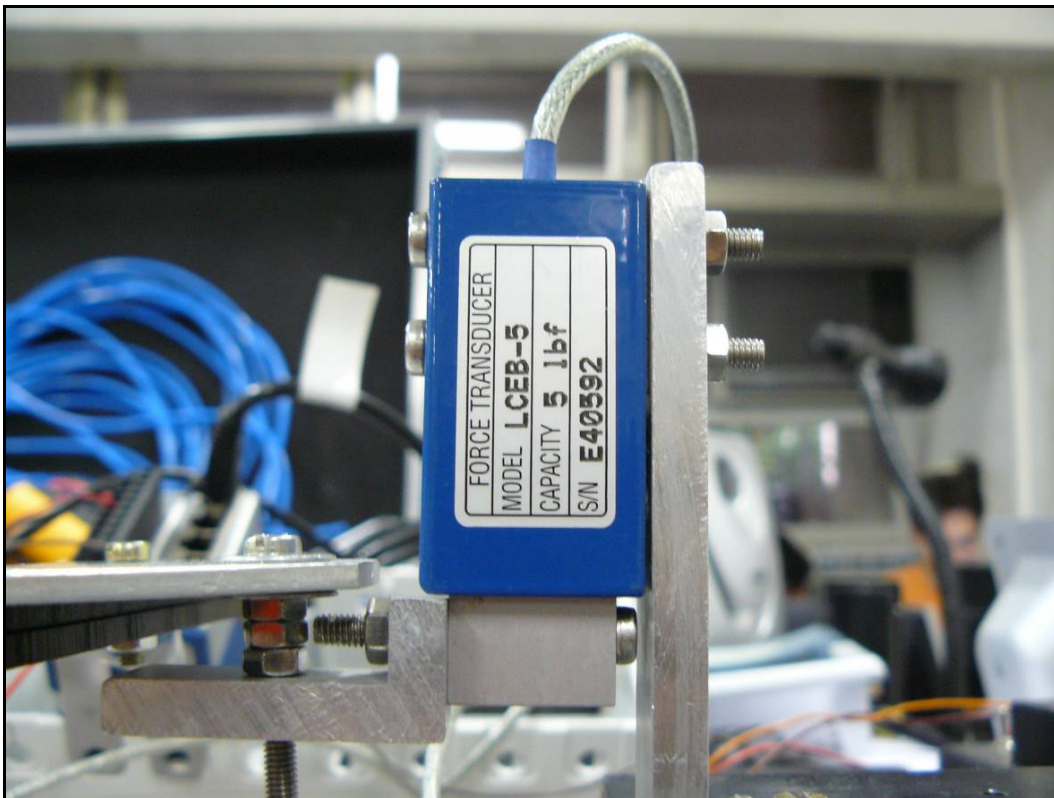


Figura 37: Detalhe do sensor de força montado na bancada de teste.

5.5 Montagem do atuador

O atuador utilizado para os experimentos consiste basicamente do polímero VHB4905 esticado através de suportes rígidos que são fixados à bancada de teste para que as tensões elétricas sejam aplicadas. Os materiais para suporte dos atuadores são nylon e fenolite, como descritos anteriormente. Para esticar o polímero, construiu-se uma armação, com estruturas de alumínio, em forma de moldura quadrada com três barras também de alumínio livres para deslizarem sobre a estrutura, e uma quarta barra de alumínio fixa à mesma como pode-se ver na Figura 38. Para as barras livres a serem movimentadas, parafusos

foram colocados em suas pontas permitindo ao usuário prendê-los à estrutura quando estiverem nas posições desejadas.

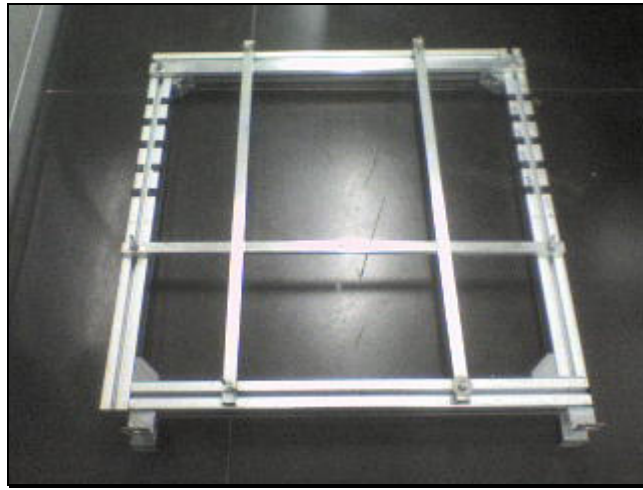


Figura 38: Armação de alumínio utilizado para esticar o polímero.

Para o experimento em que a moldura circular de nylon é utilizada, gruda-se o polímero inicialmente entre duas barras paralelas, afastando-as até a deformação desejada da primeira direção. Em seguida, às outras duas é fixado o polímero de forma que o mesmo seja esticado na outra direção (antes livre) até que a configuração final de deformação seja alcançada conforme mostra a Figura 39. Depois de esticado o polímero, as molduras são grudadas em ambos os lados, tomando-se o cuidado de mantê-las alinhadas o melhor possível. Finalmente aplica-se graxa condutora no material, apenas nos pontos onde se deseja ter a área ativa do atuador. Um caminho entre a área ativa e a moldura é feito também com a graxa de forma a ter-se um contato com os eletrodos da fonte de alta tensão. Neste caso, o sensor de força não é utilizado, pois apenas a deformação da área ativa sobre atuação é monitorada. Esse monitoramento é então feito com câmera de filmagem e suas imagens são posteriormente processadas no computador para averiguação dos resultados.

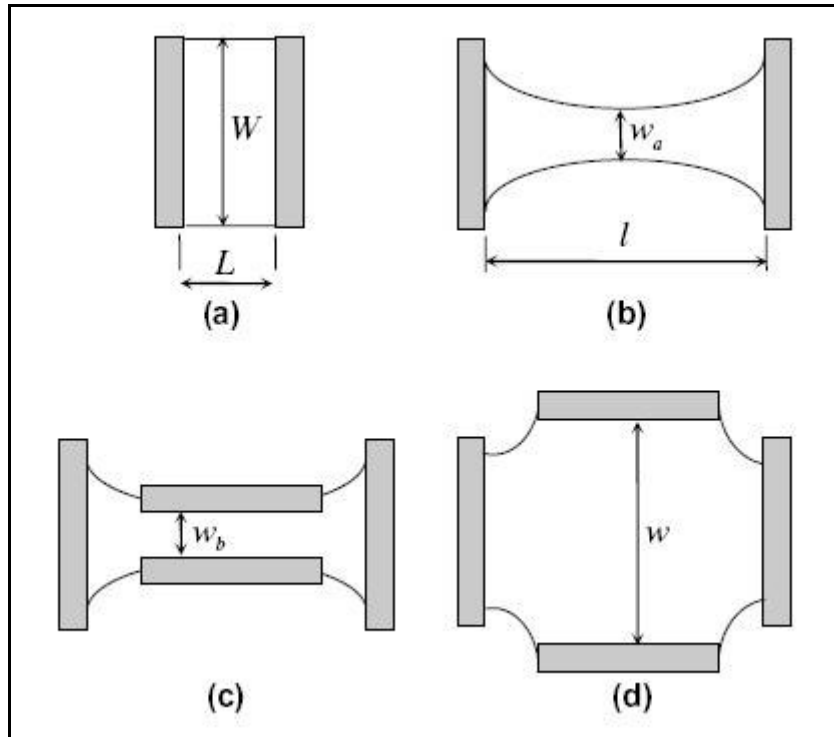


Figura 39: Seqüência para esticar o polímero nas deformações desejadas [Plante e Dubowsky, 2006].

Desta forma, as deformações podem ser obtidas da seguinte maneira:

$$l = \lambda_{1,pre} L \quad (5.1)$$

$$W_L = W \frac{w_b}{w_a} \Rightarrow w = \lambda_{2,pre} W_L \quad (5.2)$$

onde $\lambda_{1,pre}$ e $\lambda_{2,pre}$ são as pré-deformações, e as outras dimensões estão definidas na Figura 39.

No caso em que se deseja medir e/ou controlar a força do atuador, uma outra moldura é utilizada (as placas de fenolite), e só é necessário esticar o polímero em uma direção. Com isso, o procedimento de preparação do polímero para o experimento é muito parecido com o descrito no parágrafo anterior, com a alteração da moldura a ser utilizada e a deformação, efetuada em apenas uma direção. A outra direção só será deformada na bancada de testes, e seu comprimento final dependerá do experimento a ser realizado. Nessas placas de fenolite foram feitos dois furos para que fossem fixadas na bancada de teste através de parafusos. Esses mesmos furos são utilizados como guias na etapa em

que são grudadas no polímero, de maneira que as mesmas não fiquem desalinhadas entre si.

A aplicação da graxa condutora pode ser feita com pincéis de diferentes calibres, de acordo com a área e a precisão necessária para a confecção da região ativa. A graxa utilizada nesta pesquisa foi a *41 Extreme High Temperature Bearing Grease* da *Dow Corning*.

Durante os testes, verificou-se uma grande dificuldade ao manipular o polímero. Primeiramente, o fato de ser uma fita dupla-face faz com que o material grude em qualquer coisa que encostar nele em qualquer posição. Sua elasticidade aliada à potente cola utilizada na sua fabricação fazem com que seja impossível desgrudar (sem danificá-los) dois pedaços de polímeros que porventura tenham sido postos em contato.

Como todos os testes envolvem obrigatoriamente uma pré-deformação do polímero em pelo menos uma direção, para que haja um aumento da constante dielétrica do mesmo, todos os equipamentos utilizados na manipulação do material tensionado tiveram que ser cuidadosamente preparados de forma a não ter cantos vivos ou partes afiadas, pois o material é facilmente danificado sob altas tensões mecânicas devido a pequena espessura do material.

5.6 Software de controle

Foi desenvolvido um *software* utilizando LabVIEW8.0 para fazer todos os testes descritos acima, que inclui atuação sobre o sistema, leitura dos dados e a gravação dos mesmos em arquivos do MSExcel. Nele o usuário pode ver gráficos da tensão aplicada no músculo, da força produzida, e da tensão de entrada na caixa preta, vide Figura 40. Valores médios da alta tensão e da força do músculo também são disponibilizados, mas em indicadores. Os perfis de tensão possíveis são o seno, triangular, quadrada, dente de serra e constante, onde as amplitudes, frequências e *offsets* são configuráveis. Para segurança, o sistema possui um botão para ligar a alta tensão, um algoritmo que detecta a quebra do dielétrico e desliga a atuação de modo a preservar o módulo de alta tensão E101, e limites para tensões máximas e mínimas nos atuadores. Um botão para iniciar e terminar a gravação de dados pode ser visto em cima do mostrador do tempo de gravação corrente. Há ainda o módulo do controlador do sistema com possibilidade de

ativar ou não a compensação das não-linearidades do sistema nos ganhos do PID. Por último, é possível alterar a frequência de corte do filtro digital implementado para o sinal de força adquirido, bem como as constantes para a conversão dos valores lidos do sensor para valores de força em N.



Figura 40: Tela do software de controle da bancada de teste desenvolvida.