

ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



Rafael de Arruda Amado

Rodrigo Vodola do Amaral

POLÍMEROS ATIVOS – MÚSCULOS ARTIFICIAIS

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do Diploma de
Engenheiro Mecatrônico

São Paulo

2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Amaral, Rodrigo Vodola do

**Polímeros ativos: músculos artificiais / R.V. do Amaral, R.A. Amado. -- São Paulo, 2010.
64 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Músculos 2. Polímeros (Materiais) 3. Sensores eletromecânicos I. Amado, Rafael de Arruda II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.

Agradecimentos

Primeiramente agradecemos nossas famílias e amigos pelo incentivo e apoio nas horas de dificuldade.

Nossos agradecimentos ao nosso orientador Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto pelo suporte e transparência com relação às expectativas envolvidas neste desafio.

Agradecemos também ao Prof. Dr. Julio Adamowski pela disponibilidade do laboratório de Ultrassom. E especialmente ao Engenheiro Alan por todo o suporte técnico e paciência.

Resumo

Os músculos realizam movimentos extremamente complexos que viabilizam o homem realizar tarefas das mais diversas. Alterando seu comprimento em resposta a estímulos nervosos, são capazes de exercer quantidades controladas de força.

Com base nesse exemplo da natureza, onde sistemas das mais diferentes formas exercem suas funções com a maior eficiência possível, pesquisadores e projetistas do mundo inteiro buscam novos materiais que modifiquem sua dimensão e/ou forma em resposta a estímulos externos a fim de criarem sistemas de atuação para dispositivos artificiais que mimetizam os músculos e suas funções.

Os materiais que apresentam maiores potenciais para desempenhar tal função e que vem sendo tema de diversos estudos ao redor do mundo são os polímeros que modificam sua forma e/ou dimensão através de estímulos externos. Os polímeros eletro-ativos ou EAP's (do inglês "Eletroactive Polymers") são um exemplo dessa classe de materiais que abrem espaço ao desenvolvimento de novos atuadores e sensores.

Este trabalho apresenta os diversos tipos de polímeros ativos. Foca o estudo no comportamento, modelagem e aplicação no polímero eletroativo do tipo dielétrico.

Com base em experimentos encontrados na literatura, apresenta-se um teste prático de uma proposta de atuador baseado nesta tecnologia. O teste consiste na aplicação de altas tensões (na ordem de 2 kV) em um corpo de prova elaborado segundo o princípio de funcionamento proposto. Para isso usou-se um polímero acrílico fabricado pela 3M, a fita dupla-face VHB 4905.

Em seguida é apresentado o projeto completo de um atuador polimérico, sua modelagem, testes e conclusões sobre o espaço dessa nova tecnologia no campo da engenharia.

Palavras-chave:

Músculos artificiais, Polímeros dielétricos, Atuadores poliméricos, ANTLA.

Abstract

Muscles perform extremely complex motions that enable the most diverse tasks. Changing its length in response to nerve stimulation, muscles are able to apply controlled amounts of force to carry huge variety of movements.

Inspired by this example of nature, where systems of different forms exert their function as efficiently as possible, researchers and designers from around the world are seeking new materials that change their size and/or shape in response to external stimuli in order to create effective actuation systems for artificial devices that mimic natural muscles and their functions.

Materials with the greatest potential to play that role that have been the subject of several studies around the globe are polymers that change shape or size in response to external inputs, the Electroactive Polymers (EAP). These materials allow the development of new types of actuators and sensors.

This paper presents various types of active polymers. The study focuses at the behavior, modeling and application of the dielectric active polymer.

Based on existing experiments, a practical test for a novel design of actuator, based on this technology, is conducted. This test consists on a high voltage application on a test subject assembled based on the working principles proposed. It was used an acrylic polymer made by 3M, the VHB 4905 tape.

Following that, it is presented the whole project of a polymeric actuator, its modeling analysis, tests and conclusions about the part of this relatively new technology in engineering.

Key-words:

Artificial muscles, Dielectric polymers, Soft actuators, ANTLA.

Sumário

1.	Introdução.....	12
1.1.	Motivação.....	12
1.2.	Objetivo	13
2.	Músculos Naturais	14
2.1.	Muscular Estriado ou Esquelético	14
2.2.	Muscular Estriado Cardíaco	15
2.3.	Muscular Liso	15
2.4.	Músculos da Face	16
3.	Músculos Artificiais	18
3.1.	Polímeros Ativos	18
3.1.1.	Não Eletricamente Estimulados	19
3.1.2.	Eletroativos.....	23
4.	Polímeros Dielétricos.....	29
4.1.	Atuadores baseados em Polímeros dielétricos	34
4.2.	Atuador Elastômero Dielétrico com pré-tensão (ANTLA)	36
5.	Ensaio: Teste de conceito	38
5.1.	Experimento de referência	38
5.2.	Experimento realizado	40
5.3.	Conclusões dos Ensaios	45
6.	Projeto de um atuador ANTLA.....	46
6.1.	Modelagem	46
6.1.1.	Modelagem estática	46
6.1.2.	Modelagem Dinâmica.....	50
6.2.	Descrição do atuador	52
6.2.1.	Desenho de conjunto.....	52
6.2.2.	Detalhes de fabricação.....	53

6.3.	Sistema Elétrico	55
6.4.	Simulações.....	57
6.4.1.	Previsão de Deslocamento.....	57
6.4.2.	Máxima tensão admitida.....	57
7.	Caracterização do atuador	59
7.1.	Tensão Elétrica X Deslocamento	59
7.2.	Tensão Elétrica X Força.....	64
7.3.	Modulação da Rigidez do Sistema.....	65
8.	Conclusões.....	67
9.	Bibliografia.....	68

Lista de Figuras

Figura 1 - Músculos da Face	17
Figura 2 - Funcionamento de um polímero de memória de forma	20
Figura 3 - Órtese para braço.....	20
Figura 4 - Polímero ativado por Luz.....	21
Figura 5 - Polímero ativado magneticamente	22
Figura 6 - Válvula automática feita com gel.....	22
Figura 7 - Nanoatuador.....	24
Figura 8 - Fluido eletro-reológico	25
Figura 9 - Elastômero Eletro-Estrictivo	28
Figura 10 - Aplicação de tensão elétrica em um elastômetro dielétrico	29
Figura 11 - Tabela de medição do desempenho de diversos polímeros	32
Figura 12 - Comparação entre tecnologias de atuação	33
Figura 13 - Construção do Atuador ANTILA	36
Figura 14 - Funcionamento do atuador ANTILA	37
Figura 15 - Resultados observados por experimento conduzido na PUC-RJ.	38
Figura 16 - Esquema da região ativa do polímero	39
Figura 17 - Gráfico de Força x Tensão	39
Figura 18 - Etapas para o pré-tensionamento	40
Figura 19 - Polímero pré-tensionado	41
Figura 20 - Inserção da parte inferior do aro.....	41
Figura 21 - Inserção da parte superior do aro.....	41
Figura 22 - Etapa 1 de montagem	42
Figura 23 - Etapa 2 de montagem	42
Figura 24 - Etapa 3 de montagem	42
Figura 25 - Fonte de Alta Tensão	43
Figura 26 - Deslocamento do ponto de referência.....	44
Figura 27 - Zoom da região do ponto de referência.....	44
Figura 28 - Modelo do "meio polímero" e elemento arbitrário.....	47
Figura 29 - Deslocamentos e Equilíbrio de forças	47
Figura 30 - Esquema da modelagem dinâmica	50
Figura 31 - Desenho de conjunto ANTILA	52

Figura 32 - Modificação no eixo de saída	53
Figura 33 - Desenho de Fabricação do frame	53
Figura 34 - Desenho de fabricação do filete	54
Figura 35 - Sistema Elétrico.....	55
Figura 36 - Esquema do circuito	56
Figura 37 - Deslocamento 500 V	59
Figura 38 - Deslocamento 1000 V	60
Figura 39 - Deslocamento 1500 V	60
Figura 40 - Deslocamento 2000 V	61
Figura 41 - Deslocamento 2500 V	61
Figura 42 - Deslocamento 3000 V	62
Figura 43 - Tensão X Deslocamento (Experimental)	63
Figura 44 - Comparativo deslocamento Experimental X Teórico.....	63
Figura 45 - Tensão X Força (HYOUK RYEOL CHOI, 2005)	64
Figura 46 - Estudo da variação da rigidez do atuador (HYOUK RYEOL CHOI, 2005)	65

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de polímeros eletroativos	23
Tabela 2 - Conversão Pixel - Metro	62

1. Introdução

1.1. Motivação

Durante os 3,8 bilhões de anos desde a estimativa do início da vida na Terra, a evolução tem resolvido diversos desafios da natureza levando a soluções que perduram até hoje com excelente desempenho utilizando o mínimo de recursos. As “invenções” da natureza sempre inspiraram as conquistas humanas e levaram a algoritmos, métodos, materiais, processos, estruturas, ferramentas, mecanismos e sistemas eficazes (BAR-COHEN, 2006).

Com os avanços tecnológicos atuais, materiais convencionais como metais e ligas estão sendo substituídos por polímeros em campos como o automobilismo, a aviação, utensílios domésticos e eletrônicos (TADOKORO, 2007).

Devido aos grandes avanços das tecnologias com materiais poliméricos, diversas técnicas de processamento têm sido desenvolvidas de modo a permitir a produção de polímeros com propriedades (mecânicas, elétricas etc.) convenientes a uma dada aplicação. Os polímeros possibilitaram o desenvolvimento de novos projetos mais baratos, menores e mais leves (BAR-COHEN, 2004). Cada vez mais surgem materiais que através de variações no ambiente, respondem de acordo.

Muitos polímeros desenvolvidos atuam dessa forma, ou seja, através de algum estímulo externo, mudam de forma ou tamanho. São os polímeros inteligentes ou também chamados de polímeros ativos.

Uma das aplicações significativas desses polímeros ativos é encontrada no biomimetismo – a prática de utilizar idéias e conceitos da natureza e implementá-las na engenharia e no projeto (TADOKORO, 2007).

Um dos benefícios substanciais do biomimetismo incluem o desenvolvimento de próteses que imitam os membros reais assim como *microchips* para o aumento do sensoriamento que estão sendo usados para interagir com o cérebro e ajudar na audição, visão e no controle de instrumentos (BAR-COHEN, 2006). Algumas das áreas do biomimetismo incluem inteligência artificial, visão computacional e músculos artificiais.

O sonho de engenheiros da área da robótica tem sido desenvolver robôs autônomos, com pernas e capazes de lidar com missões. No entanto, o

desenvolvimento desses robôs tem sido limitado pela complexidade da tecnologia de atuação, controle e potência que são incomparáveis aos simples sistemas do mundo natural (TADOKORO, 2007). Polímeros ativos com características similares aos músculos biológicos são uma grande promessa para o desenvolvimento do biomimetismo. Baixa rigidez e grandes deformações são algumas das características similares ao músculo natural. Eles são mais flexíveis que os motores convencionais e podem agir como amortecedores de impactos e vibrações. Essas características habilitam o desenvolvimento de dispositivos mecânicos sem embreagens, rolamentos ou outros mecanismos responsáveis pelos grandes custos e complexidade (BAR-COHEN, 2003).

Existem diversas razões para alcançar o desempenho dos atuadores naturais em vez de apenas imitar suas aparências. Seres vivos são mais eficazes que os robôs e dispositivos feitos pelo homem no que diz respeito à navegação na presença de obstáculos, velocidade sobre terrenos acidentados, agilidade e, em muitos casos, saída de potência ou energia por unidade de peso ao cumprir certas tarefas. O mais imediato, e provavelmente mais significativo obstáculo em alcançar aparências ou desempenhos naturais é a falta de tecnologia de atuadores no mercado que possam realmente imitar os músculos naturais mesmo nas suas funções mais básicas (R. PELRINE, 2000).

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é a apresentação e o entendimento da tecnologia dos músculos artificiais poliméricos, contando com o aprofundamento em relação ao princípio de funcionamento e modelagem dos Polímeros Dielétricos e ensaios para a comprovação da possibilidade de sua utilização como um atuador.

2. Músculos Naturais

Os músculos são responsáveis pelos movimentos do corpo. São constituídos por células alongadas (denominadas de fibras musculares) caracterizadas pela presença de grande quantidade de filamentos específicos. As células musculares apresentam grande desenvolvimento da função contratilidade e, em menor grau da condutibilidade. Esta especialização envolve alongamento das células, no sentido do eixo da contração, razão pela qual são comumente ditas fibras musculares.

De acordo com as características morfológicas e funcionais distinguimos nos mamíferos três tipos de tecido muscular: Muscular Estriado ou Esquelético; Muscular Estriado Cardíaco; e Muscular Liso.

2.1. Muscular Estriado ou Esquelético

O tecido muscular esquelético é formado por células alongadas, de forma cilíndrica, multinucleadas (sincício – cada célula possui muitos núcleos, a maioria dos quais está localizado periféricamente dentro da célula), variam de 10 a 120 micrômetros (mm) de diâmetro, e muitas vezes estendem-se em todo o comprimento de um músculo (40 cm). O nome estriado deriva do aspecto de estriações transversais observadas ao microscópio óptico. Também recebe o nome de músculo esquelético porque está geralmente inserido em ossos e é responsável pelos movimentos articulares.

As células do tecido muscular recebem a denominação específica de fibra, apresentam vários núcleos periféricos e o seu citoplasma apresenta-se preenchido por fibrilas paralelas, são as miofibrilas.

As fibras musculares são envolvidas por uma membrana de tecido conjuntivo que é denominada de endomísio. As fibras se agrupam em feixes que são envolvidas pelo perimísio formando os fascículos, e estes agrupados formam o músculo, que também é envolvido por uma membrana de tecido conjuntivo denominada de epimísio. O tecido conjuntivo desempenha importantes papéis na estrutura do músculo estriado, primeiro por manter as fibras unidas, permitindo que a força de contração gerada por cada fibra atue sobre o músculo inteiro; segundo por

permitir que a força de contração do músculo atue sobre outras estruturas como tendões, ligamentos, aponeuroses, periósteo, etc (Portal São Francisco).

A contração das fibras musculares estriadas é voluntária e rápida.

Resumindo, três funções do músculo esquelético são importantes:

1. Geração de força para a locomoção e para respiração
2. Geração de força para sustentação postural
3. Produção de calor durante períodos de exposição ao frio.

2.2. Muscular Estriado Cardíaco

Histologicamente tem característica de músculo esquelético, mas funcionalmente tem característica de músculo liso. Assim como o tecido muscular esquelético, apresenta fibrocélulas bastante compridas. É também chamado de *miocárdio*, e constitui a parede do coração. Apesar de ser estriado, possui movimentos involuntários. Este músculo se contrai e relaxa sem parar. Entretanto, suas células são mononucleadas ou binucleadas, com núcleos localizados mais centralmente. Também possuem discos intercalares, que são linhas de junção entre uma célula e outra, que aparecem mais coradas que as estrias transversais. No tecido cardíaco, têm bastante importância as fibras de Purkinje, células responsáveis pela distribuição do impulso elétrico que gera a contração muscular às diversas fibrocélulas cardíacas.

2.3. Muscular Liso

Coloração esbranquiçada, também chamados de músculos viscerais que entram na constituição dos órgãos profundos, ou vísceras, para assegurar-lhes determinados movimentos (contrações). Estes músculos têm estrutura "lisa" e funcionam independentemente da nossa vontade. A maneira com que se dispõem suas fibras é bem diferente da musculatura estriada. São involuntários e, em geral são longos e lentos. Os músculos lisos não apresentam estrias. Suas células têm o formato de fuso e constituem parede de órgãos governos, como o estômago e o intestino. Um dos trabalhos que realizam são os movimentos do tubo digestório – movimentos peristálticos - e o aumento e a diminuição da pupila.

2.4. Músculos da Face

As expressões faciais são uma parte importante da nossa linguagem diária. Nós usamos as expressões para mostrar nosso humor ou sentimentos sem o uso de palavras. Um sorriso, uma carranca, um nariz enrugado ou uma pálpebra erguida podem significar uma mensagem sem palavras ou podem fazer parte de uma conversa normal. Estamos continuamente enviando esses sinais e lendo-os na face de outras pessoas, geralmente sem qualquer pensamento consciente.

Todos esses exemplos da "linguagem corporal" são controlados pelos músculos da face. Há mais de trinta músculos faciais, a maioria deles ligados ao crânio e à pele.

Alguns têm finalidades específicas, como a do músculo que corre do lado da face ao canto da boca, que levanta o canto da boca e nos faz sorrir.

Outro músculo forma um anel plano ao redor dos olhos, permitindo que esse se estreite protegendo-se de uma luz brilhante.

Através da testa há uma cinta de músculos que enrugam a testa em uma carranca, e também ajuda a erguer as pálpebras.

Os lábios são controlados por uma série de músculos que produzem os meticulosos movimentos necessários para a fala. Os lábios são as partes da face que possuem maior movimento, podendo mover-se em várias direções diferentes. A boca e os órgãos ao seu redor são capazes de uma grande variedade de movimentos.

Os músculos da face e do lado da cabeça movem o maxilar nas ações de morder, trituras e esmagar enquanto comemos. Um conjunto de músculos que se estendem ao lado da cabeça até as têmporas dão uma força extra quando cerramos os dentes. Outros músculos movem o maxilar de um lado para outro e para a frente e para trás.

Os músculos labiais juntamente com os das faces, também são usados para comer. Eles posicionam a comida com a ajuda da língua, que é por si só quase toda constituída de músculos. A língua é extremamente ágil e capaz de delicados movimentos. Além de sua função de dirigir a comida para os dentes durante a

mastigação, ela é um importante órgão da fala. Os músculos do teto e do assoalho da boca e da garganta são usados para engolir.

Bem abaixo do maxilar, na parte superior da garganta, há uma estrutura comumente chamada de o pomo-de-adão, ou laringe, que produz os sons que usamos na fala, juntamente com os lábios e a língua. O ar que respiramos passa através da laringe, e é usado para vibrar duas faixas de tecido elástico - as cordas vocais.

As cordas são mantidas separadas durante a respiração normal, mas quando falamos, os músculos juntam as cordas vocais de maneira que a passagem de ar as faz vibrar e produzem sons. Os músculos variam as distâncias entre elas para produzir sons mais altos ou mais baixos (BIOLOGIA, 2007).

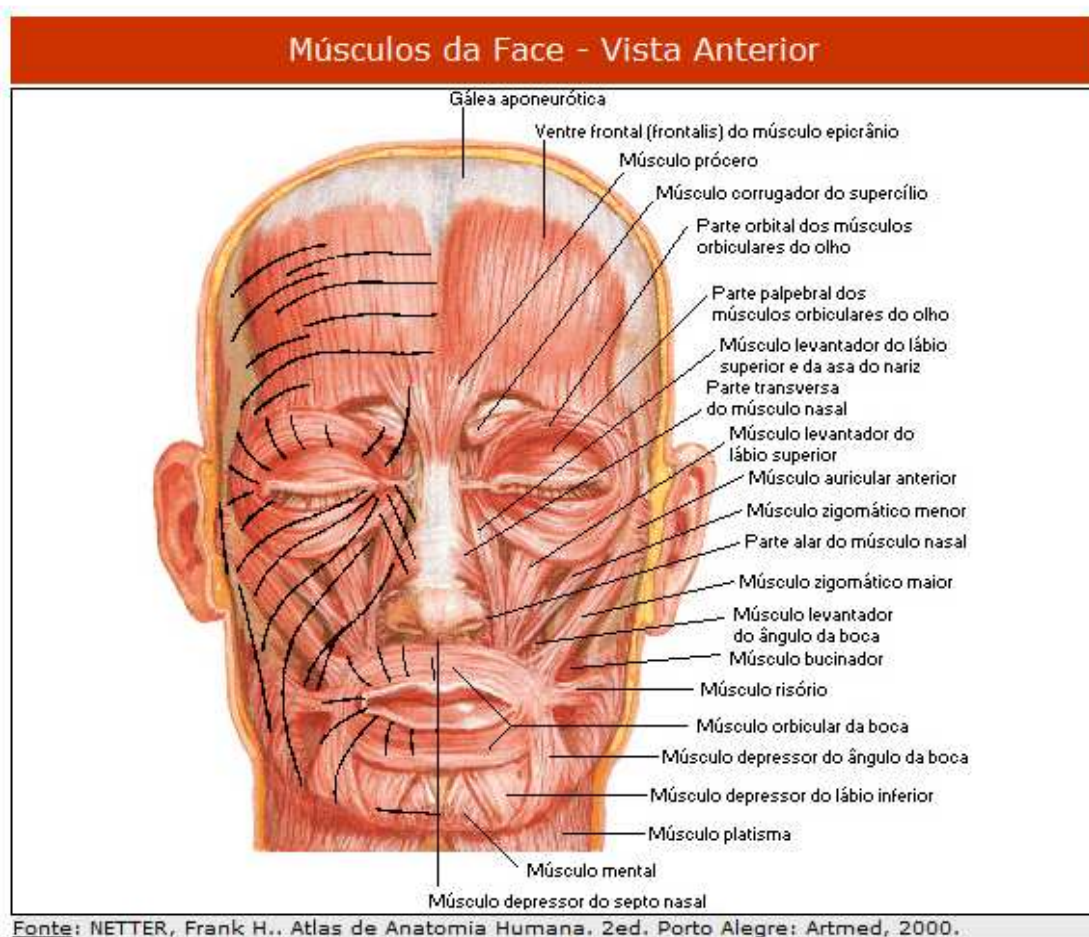


Figura 1 - Músculos da Face

3. Músculos Artificiais

3.1. Polímeros Ativos

Materiais inteligentes são aqueles que conseguem detectar variações em seu ambiente, processar essa informação e responder adequadamente (ZRIYI). Os polímeros ativos se encaixam nessa descrição e uma de suas aplicações mais significantes está na prática de coletar idéias e conceitos vindos da natureza e aplicá-los na engenharia.

Polímeros apresentam propriedades atraentes em termos de projeto. São leves, baratos, bastante tolerantes a esforços, flexíveis, facilmente processados e manufaturados, podem ser configurados em formas complexas e suas propriedades mecânicas podem ser manipuladas de acordo com a necessidade (BAR-COHEN, 2001). Esses polímeros podem apresentar, por exemplo, características similares as dos músculos humanos, inclusive em termos estéticos, o que viabiliza o desenvolvimento de mecanismos com um menor grau de complexidade e custo (ausência de engrenagens, rolamentos ou atuadores convencionais) (BAR-COHEN, 2003).

Dada a enorme variedade de estímulos que podem ser aplicados, existem diversos tipos de polímeros com diferentes propriedades passíveis de controle. Dependendo do tipo de atuação, esses materiais podem ser divididos em dois grupos: Polímeros não eletricamente estimulados, ativados por estímulos como pH, luz, temperatura, etc. e Polímeros Eletroativos (do inglês “EAP - Electroactive Polymers”) ativados por estímulos elétricos (BAR-COHEN, 2001).

3.1.1. Não Eletricamente Estimulados

Como dito anteriormente, existem polímeros que mudam seu tamanho e/ou dimensão em resposta a estímulos não elétricos. Estes podem ser estimulados por certos solventes, composições em gel, temperatura, pH, luz, magnetismo etc. Nesta seção descreveremos alguns desse polímeros.

3.1.1.1. Polímeros Quimicamente Ativados

O primeiro polímero quimicamente ativo foi desenvolvido em 1950 e era ativado por diferenças de pH, ou seja, contraíam ou expandiam seu volume dependendo do pH do líquido em que estavam submergidos. O polímero deste tipo mais usado é o 'polyacrylic acid' (PAA) que aumenta dimensionalmente quando movido de uma solução ácida para uma solução básica e mostra propriedades mecânicas fracas. Outro material que segue esse tipo de ativação é o polímero derivado de 'polyvinyl alcohol' (PVA) e do 'polyacrylonitrile' (PAN), este último de resposta mais rápida e variação maior de volume quando comparado com os outros.

3.1.1.2. Polímeros de Memória de Forma

Esses materiais têm resposta a estímulos mecânicos como qualquer outro, porém, se comprimidos mecanicamente, por exemplo, e resfriados abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g) mantém essa forma comprimida (estado de hibernação). Porém, se aquecidas novamente acima desta temperatura, voltam a sua forma normal. Se resfriadas abaixo da T_g de novo, manterão o estado em que estava, porém com alta rigidez (SOKOLOWSKI W. M., 1999).

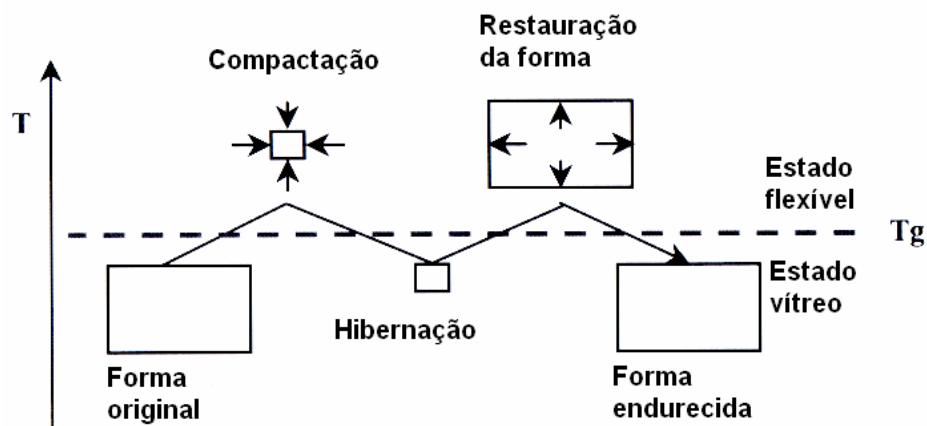


Figura 2 - Funcionamento de um polímero de memória de forma

3.1.1.3. Estruturas Infláveis

Alguns polímeros são configurados em estruturas que quando infladas (pneumaticamente) conseguem variar de volume longitudinalmente. Isso ocorre porque essa estrutura geralmente é formada por uma bexiga interna expansível e uma camada externa formada por uma malha trançada. Esta malha não varia seu volume (não deixando que a bexiga expanda radialmente), logo quando a pressão interna aumenta, o atuador se contrai longitudinalmente (CHOU C. P., 1996).



Figura 3 - Órtese para braço

3.1.1.4. Polímeros Ativados por Luz

São polímeros que mudam sua forma e volume em resposta a um estímulo luminoso. Quando há uma intensidade de luz, ocorre uma reação de ionização, desenvolvendo uma pressão osmótica interna na região. Logo, suas partículas na região se atraem temporariamente, voltando ao estado inicial quando a luz é removida.

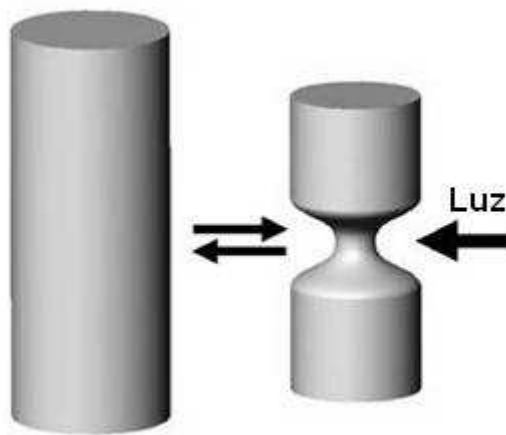


Figura 4 - Polímero ativado por Luz

3.1.1.5. Polímeros Ativados Magneticamente

São polímeros magnetostrictivos, também chamados de ferrogel. Eles mudam sua forma e/ou dimensão devido à aplicação de um campo magnético. São formados por uma rede de partículas quimicamente interligadas e, quando um campo magnético é aplicado, estas mudam de direção individualmente. Estas mudanças de direção individuais, quando somadas, criam uma deformação macroscópica do gel. Alongação, contração, dobramentos e torções podem ser obtidos dependendo do arranjo geométrico do material (ZRINYI M., 1999).

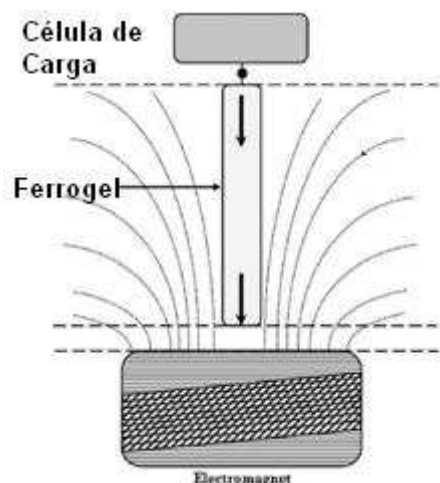


Figura 5 - Polímero ativado magneticamente

3.1.1.6. Polímeros Ativados Termicamente

Esses géis poliméricos termicamente ativados produzem uma mudança de volume devido a uma transição de fases que ocorre geralmente em um intervalo de 20°C a 40°C. Eles podem chegar a uma força contráct il de 100 kPa com tempo de resposta de 20 a 90 segundos (HIROKAWA Y., 1984). O exemplo mais comum desse tipo de polímero é o poly-vinyl-methyl-ether (PVME).

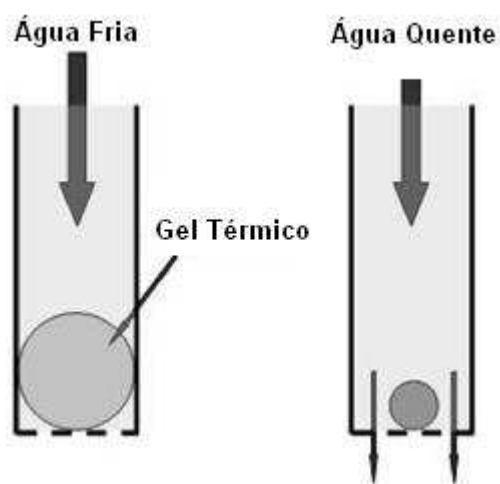


Figura 6 - Válvula automática feita com gel

3.1.2. Eletroativos

Os Polímeros Eletroativos são novamente classificados, em função do mecanismo responsável pela atuação, em Eletrônicos - sensíveis a campos elétricos ou forças de Coulomb, e Iônicos - que mudam sua forma pela movimentação ou difusão de íons em suas substâncias conjugadas. Exemplos são listados a seguir:

Tabela 1 - Tipos de polímeros eletroativos

Eletrônicos	Iônicos
Dielétricos	Gel iônico
Enxertos de elastômero eletrostrictivos	Composto iônico Polímero-Metal
Papeis eletrostrictivos	Condutores
Elastômeros eletro-viscoelásticos	Nanotubos de carbono
Ferroelétricos	
Elastômeros de cristal líquido	

Polímeros Eletroativos Eletrônicos normalmente requerem altas tensões de ativação, podem ser operados em ar sem nenhum tipo de restrição, apresentam respostas rápidas (na ordem de milisegundos) e são inadequados ao uso em baixas temperaturas. Em contraste, os Polímeros Eletroativos Iônicos são ativados por tensões baixas, devem ser operados com restrições de ambiente (imersos em água, por exemplo), apresentam respostas mais lentas, geram menores forças de atuação, mas com maiores deformações (BAR-COHEN, 2001).

3.1.2.1. Iônicos

Polímeros eletroativos iônicos mudam sua forma e/ou dimensão quando estimulados por um campo elétrico. O mecanismo de deformação é baseado na migração de grupos iônicos ou de cargas induzidas presentes na matriz polimérica.

3.1.2.1.1. Nanotubos de carbono (CNT)

As ligações entre carbonos, em um nanotubo, são suspensas em um eletrólito e as alterações no tamanho das ligações são responsáveis pelo mecanismo de atuação. Uma rede de ligações conjugadas conecta todos os carbonos e provê um caminho para o fluxo de elétrons ao longo das ligações. O eletrólito forma uma camada elétrica dupla com os nanotubos e permite uma grande injeção de cargas que afetam o equilíbrio entre cargas iônicas do nanotubo e do eletrólito. Quanto mais carga for injetada na ligação, maior será a deformação. A remoção de elétrons faz com que o nanotubo carregue uma rede positiva de cargas, que é espalhada por todo o núcleo do carbono, causando uma repulsão entre núcleos adjacentes de carbonos aumentando o comprimento da ligação entre eles. A injeção de elétrons também causa alongamento das ligações, resultando no aumento do comprimento e diâmetro do nanotubo (BAUGHAMAN R. H., 1999). A Figura a seguir mostra o conceito de um nanoatuador.

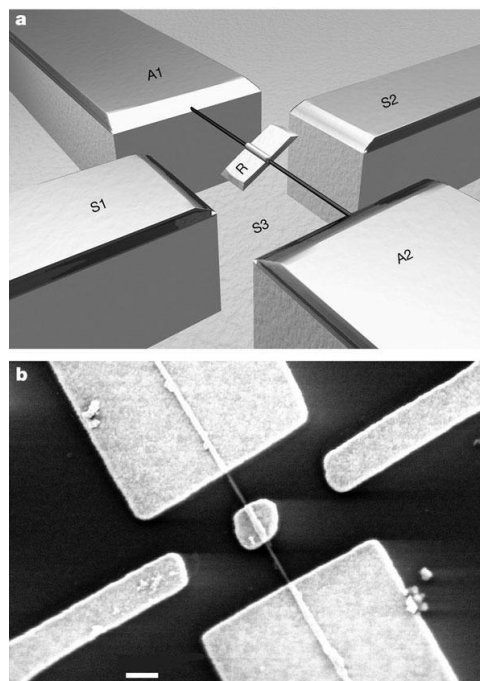


Figura 7 - Nanoatuador

Um rotor (placa de metal) é preso a um nanotubo de carbono reforçado (multiwalled carbon nanotube - MWNT) que age como eixo e é a fonte de rotação. Contatos elétricos com o rotor são feitos através do MWNT e os blocos ancorados (A1, A2). Três eletrodos (do estator), dois na superfície de SiO₂ (S1, S2) e um enterrado na superfície S3 fornecem elementos de controle de tensão adicionais. A montagem inteira do atuador está integrada em um chip de silício. A imagem (b) mostra a imagem do nanoatuador através de um microscópio eletrônico de varredura. A barra branca no canto inferior esquerdo possui 300 nm (FENNIMORE, 2003).

3.1.2.1.2. Fluido Eletro-reológicos (ERF)

Fluidos eletro-reológicos sofrem grandes alterações na sua viscosidade quando submetidos a campos elétricos. O efeito eletro-reológico aparece da diferença entre as constantes dielétricas do fluido e das partículas nele existentes.

Na presença de um campo elétrico, as partículas, devido ao momento de dipolos induzido, formam cadeias ao longo das linhas de campo. Essa estrutura induzida altera a viscosidade do ERF, tensão de escoamento e outras propriedades, permitindo que o material altere sua consistência de líquido para algo viscoelástico, como o gel, com tempo de resposta da ordem de ms, vide Figura abaixo.

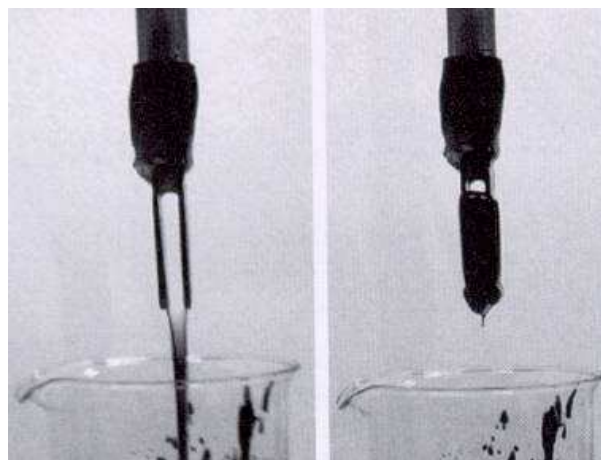


Figura 8 - Fluido eletro-reológico

3.1.2.2. Eletrônicos

3.1.2.2.1. Ferroelétricos

A piezoelectricidade trata da capacidade de um material gerar uma diferença de potencial em sua superfície em resposta a compressões em determinadas direções e é observado com muita frequência em cristais, como o Quartzo. O fenômeno inverso também é possível de ser observado, ou seja, quando certos materiais são submetidos a campos elétricos, sofrem uma alteração em sua forma.

Tal fenômeno ocorre em materiais não centro-simétricos e passa a ser chamado Ferroelectricidade quando o material exibe polarização espontânea, ou seja, quando expostos a um campo elétrico seus dipolos mudam sua orientação para uma ou mais direções cristalográficas, originando mudanças de forma no mesmo. Como exemplo, encontramos o PVDF (Fluoreto de polivinilideno) (BAR-COHEN, 2001).

3.1.2.2.2. Papéis Eletrostrictivos

Papel, como atuador eletrostrictivo, foi apresentado pela Universidade de Inha (Korea) (BAR-COHEN, 2001). Foi elaborado a partir da junção de dois pedaços de papel de prata laminado com eletrodos de prata alocados nas superfícies externas. Um deslocamento de flexão foi produzido quando um campo elétrico foi aplicado nos eletrodos.

O desempenho do atuador depende do tipo de papel utilizado como “recheio” para os eletrodos, da tensão imposta, sua frequência e do tipo de adesivo utilizado para unir os pedaços de papel (BAR-COHEN, 2001).

Eletrodos que apresentam menores valores de rigidez e papéis com maior presença de celulose em estruturas amorfas apresentam melhor desempenho e maiores valores para a força resultante (SEO, 2002).

O correto desenvolvimento desse tipo de atuador para aplicações práticas requer que voltemos nossa atenção a determinados pontos como pequenos deslocamentos, alta tensão de excitação, sensibilidade à umidade e degradação do desempenho com o passar do tempo.

3.1.2.2.3. Elastômeros Dielétricos

Atuadores elastômeros dielétricos são feitos a partir de um meio dielétrico incompressível e altamente deformável. Quando um campo elétrico é aplicado através das placas paralelas de um capacitor, as forças de Coulomb entre as cargas geram uma tensão, denominada tensão de Maxwell, fazendo com que os eletrodos aproximem-se, e com que o elastômero expanda na direção lateral (KOFOD, 2001).

Esses atuadores apresentam uma grande eficiência entre a entrada de energia elétrica e a energia mecânica criada (J.D.W MADDEN, 2004). Além disso, a aplicação de uma pré-carga permite guiar o movimento a uma direção desejada e eleva o valor da tensão máxima gerada.

Em geral, a tensão induzida é proporcional ao quadrado do campo elétrico e da constante dielétrica. Um dos meios de atingir altas tensões seria o aumento do campo elétrico, mas valores altos para o campo elétrico podem ocasionar uma falha dielétrica do material (Valor definido como o máximo campo elétrico que pode ser aplicado a um elastômero sem gerar danos ao mesmo). Assim, a tensão obtida pode ser elevada através do uso de materiais com maiores valores para a constante dielétrica ou filmes com pequena espessura. Observou-se que o valor para a falha dielétrica aumenta com o aumento da pré-carga (A. WINGERT).

3.1.2.2.4. Elastômero Eletro-strictivo com enxerto

Consistem de dois componentes. Uma espinha dorsal formada por cadeias primárias macromoleculares flexíveis e cadeias secundárias cristalizáveis ligadas a essa espinha dorsal, chamadas enxertos.

Os enxertos podem se cristalizar para formar redes tridimensionais e gerar domínios cristalinos polares em resposta a um campo elétrico. Quando o material está sob a ação de um campo elétrico, esses domínios polares sofrem uma rotação para alinharem-se à direção do campo. Esse movimento induz a reorientação das cadeias primárias, gerando deformação, que é anulada assim que o efeito do campo é cessado. A deformação segue uma dependência quadrática em relação ao valor do campo aplicado (J. SU, 2000). Sua elevada rigidez é uma propriedade distinta em relação a outros polímeros.

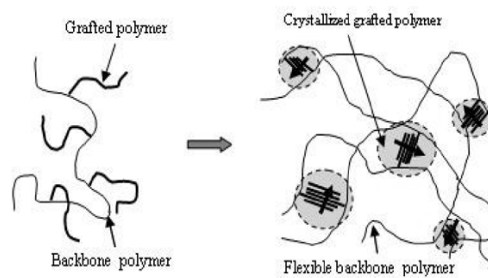


Figura 9 - Elastômero Eletro-Estrictivo

3.1.2.2.5. Elastômeros Eletro-viscoelásticos

Trata-se da forma sólida de um fluido repleto de partículas dielétricas suspensas. Quando esse fluido está sob a ação de um campo elétrico, os momentos de dipolo induzido fazem com que essas partículas formem cadeias na direção do campo, formando estruturas anisotrópicas complexas. Durante o processo a viscosidade do fluido aumenta substancialmente. Sua forma sólida é obtida se o meio que suspende tais partículas é polimerizado, podendo ser um elastômero (BAR-COHEN, 2001).

Quando da aplicação de um campo elétrico, as partículas tendem a moverem-se umas contra as outras, criando tensões responsáveis pela deformação do material. Trabalho pode ser obtido a partir dessa deformação.

A resposta desse material está intimamente ligada à densidade de partículas dielétricas suspensas (SHAW, 2003).

4. Polímeros Dielétricos

Entre os candidatos a músculos artificiais, os elastômeros dielétricos apresentam características típicas como peso reduzido, flexibilidade, baixo custo, fácil fabricação, etc., que os tornam atrativos em diversas aplicações, que incluem micro bombas, micro válvulas, disk drivers, auto-falantes, endoscópios inteligentes e outros (R. PELRINE, 2000).

Os elastômeros dielétricos são conhecidos por sua enorme capacidade de deformação (120 – 400%), grandes tensões (3.2 MPa), alta densidade de energia elástica de 3.4 J/g, alta velocidade de resposta em 0.001 s e altas taxas de deformação (34%/s) (BAR-COHEN, 2004) (R. PELRINE, 2000). Eles transformam energia elétrica diretamente em trabalho mecânico e produzem longas deformações. Os atuadores são normalmente compostos de um fino filme de elastômero (meio dielétrico) cercado em ambas as superfícies (inferior e superior) por dois eletrodos flexíveis, numa configuração típica de um capacitor. O polímero utilizado, como a maioria dos materiais elásticos, é incompressível (coeficiente de Poisson = 0.5) e viscoelástico. Quando uma tensão elétrica é aplicada nos eletrodos, uma força eletrostática é gerada entre os mesmos. Essa força comprime o filme, causando sua expansão na direção de seu plano (R. PELRINE, 2000)

Para atingir altas deformações e níveis de força significativos, podemos utilizar um material polimérico com elevada constante dielétrica e baixa rigidez sob a ação de um campo magnético da ordem de kV (R. PELRINE, 1998).

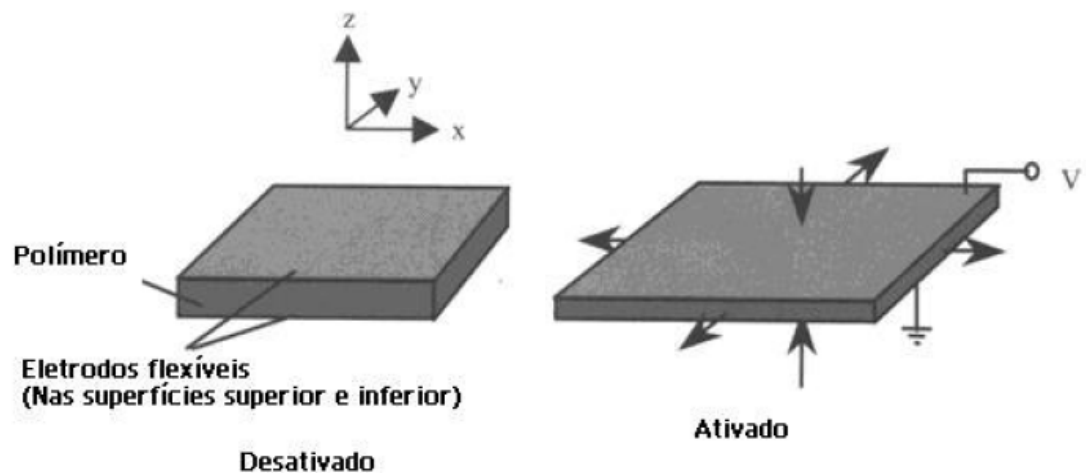


Figura 10 - Aplicação de tensão elétrica em um elastômero dielétrico

Para materiais perfeitamente elásticos, a alteração na energia eletrostática deve ser igual ao trabalho mecânico produzido pelo atuador (R. PELRINE, 2000).

A energia eletrostática (U) armazenada em um filme elastômero de espessura z e área A pode ser escrita como:

$$U = \frac{Q^2}{2 \times C} = \frac{Q^2 \times z}{2 \times \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times A} \quad (1)$$

Onde Q, C, ε_0 e ε_r , são a carga elétrica, capacitância, permissividade do espaço livre (8.85×10^{-12} F/m) e permissividade relativa, respectivamente. A capacitância é definida como:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times A}{z} \quad (2)$$

Da equação (1), a alteração na energia eletrostática pode ser relacionada a pequenas variações na espessura (dz) e na área (dA) com a restrição de que o volume total é sempre o mesmo devido à incompressibilidade. Então a pressão eletrostática gerada pelo atuador pode ser escrita da seguinte maneira:

$$P = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times E^2 = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times \left(\frac{V}{z}\right)^2 \quad (3)$$

Onde E e V são o campo elétrico e a tensão aplicados, respectivamente.

A performance do atuador pode ser obtida pela combinação da equação (3) e a equação constitutiva dos elastômeros. A mais simples destas equações de estado deve combinar a Lei de Hooke com o módulo de Young (Y), e relaciona a pressão eletrostática à deformação na espessura, da seguinte maneira:

$$P = -Y \times S_z \quad (4)$$

Onde $z = z_0 \times (1 + S_z)$ e z_0 é a espessura inicial do filme polimérico. Usando a mesma restrição de volume constante temos $(1 + S_x) + (1 + S_y) + (1 + S_z) = 1$ e

$S_x = S_y$, a deformação no plano do filme pode ser encontrada das equações (3) e (4).

Por exemplo, para uma pequena deformação em z (menor que 10%), podemos substituir z na equação (3) por apenas z_0 , e o resultado seria:

$$S_z = -\frac{\varepsilon_0 \times \varepsilon_r}{Y} \times \left(\frac{V}{z_0}\right)^2 \quad (5)$$

E a deformação no sentido planar expressa como (Poisson = 0.5):

$$S_x = 0.5 \times S_z = -\frac{\varepsilon_0 \times \varepsilon_r}{2 \times Y} \times \left(\frac{V}{z_0}\right)^2 \quad (6)$$

Essa equação aparece com frequência na bibliografia. Mas quando a deformação em z é maior que 10%, devemos combinar as equações (3) e (4) em uma equação quadrática:

$$S_z = -\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \times \left[f(S_0) + \frac{1}{f(S_0)} \right] \quad (7)$$

Onde

$$f(S_0) = \left[1 + 13.5 \times S_0 + \sqrt{27 \times S_0 \times (6.75 \times S_0 - 1)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$S_0 = -\frac{\varepsilon_0 \times \varepsilon_r}{Y} \times \left(\frac{V}{z_0}\right)^2$$

A deformação no eixo z pode ser convertida em deformação no plano do filme pela solução da equação quadrática com a restrição $S_x = (1 + S_z)^{-0.5} - 1$.

Para materiais pouco deformáveis, a densidade de energia elástica de deformação (u_e) do atuador pode ser estimada por (R. PELRINE, 2000):

$$u_e = \frac{1}{2} \times P \times S_z = \frac{1}{2} \times Y \times S_z^2 \quad (8)$$

No entanto, para materiais com alta capacidade de deformação, a área planar na qual a compressão é aplicada altera-se consideravelmente ao passo que o material sofre a deformação no eixo z, e conseqüentemente, a densidade de energia elástica de deformação pode ser obtida pela integração da pressão compressiva multiplicada pela variação na área planar devida ao movimento dz, resultando na seguinte relação (R. PELRINE, 2000):

$$u_e = \frac{1}{2} \times P \times \ln(1 + S_z) \quad (9)$$

A magnitude da resposta eletrostricitiva em um polímero determina a viabilidade de sua utilização como atuadores. Vários polímeros demonstram uma deformação superior a 10%. A figura a seguir apresenta tais resultados. Polímeros de silicone são os que apresentam melhor desempenho em termos de deformação, enquanto que polímeros de poliuretano apresentam maiores pressões de atuação.

Polymer	Energy density J cm ⁻³	Strain %	Pressure MPa	Young's modulus MPa
Polyurethane	0.10	11	1.9	17
Silicone	0.034	32	0.21	0.7
Fluorosilicone	0.019	28	0.14	0.5
Ethylene propylene	0.013	12	0.022	1.8
Polybutadiene	0.011	12	0.19	1.7
Isoprene	0.0052	11	0.094	0.85

Figura 11 - Tabela de medição do desempenho de diversos polímeros

A eficiência energética, importante parâmetro para determinadas aplicações, é estimada em 80-90% para faixas de atuação entre 1 e 20 Hz. Esta estimativa é baseada no cálculo da corrente de fuga junto com a medição tensão x deformação da histerese mecânica. Para altas taxas de atuação a corrente de fuga por ciclo é reduzida, aumentando a eficiência. No entanto as perdas por histerese em altas frequências não foram medidas (R. PELRINE, 2000).

A figura 12 é um gráfico que compara o desempenho de polímeros eletroativos com outras tecnologias de atuação. O eixo horizontal representa a

pressão de atuação efetiva devido pela densidade de material, um importante parâmetro para aplicações com restrição de peso, como micro-robôs móveis. Podemos pensar neste gráfico como um gráfico de força x deformação que foi normalizado pelo tamanho e peso dos atuadores. Nota-se que, enquanto as tecnologias já existentes apresentam bom desempenho ora em deformações ora na relação pressão/densidade, os polímeros eletroativos apresentam bons resultados em ambos os critérios. Além disso, vale observar que são facilmente comparáveis aos músculos humanos.

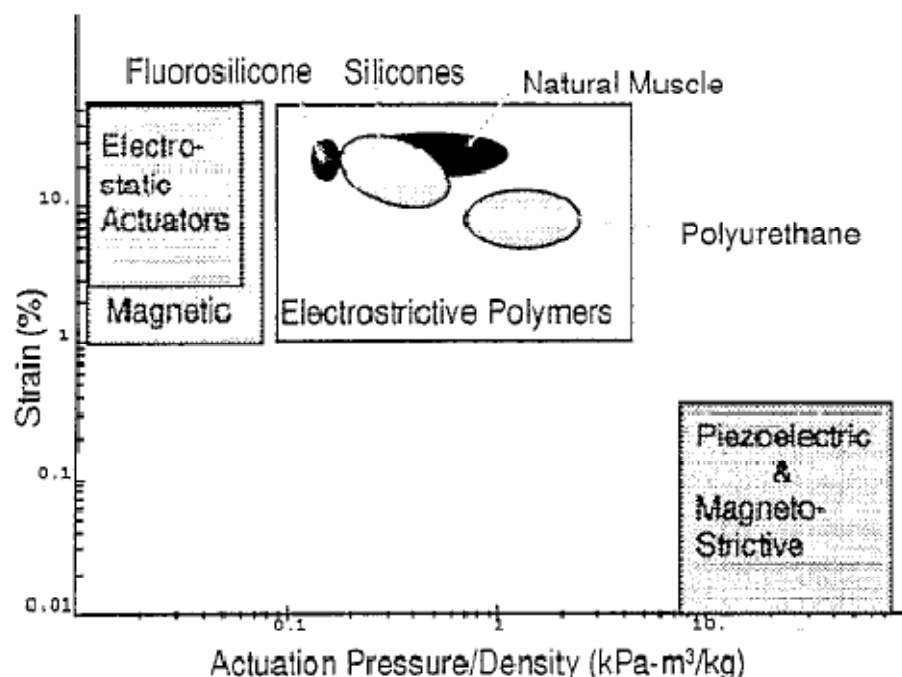


Figura 12 - Comparação entre tecnologias de atuação

4.1. Atuadores baseados em Polímeros dielétricos

A introdução de novos tipos de atuadores, os chamados atuadores macios (do inglês “Soft Actuators”), pode ser um ponto chave na nova tendência no desenvolvimento da robótica, o mimetismo. Isso é explicado ao observar as propriedades físicas dos atuadores tradicionais, como motores eletromagnéticos, motores de passo, etc., que muito se distanciam dos músculos animais, de forma que tais atuadores devem ser sempre mantidos em ambientes bem estruturados. De outro lado, prover certa flexibilidade ao esqueleto estrutural e também aos atuadores pode ser o caminho crítico à próxima geração robôs.

A transformação de energia sob o ponto de vista da termodinâmica não abre espaço a grandes oportunidades de desenvolvimento, principalmente por que a observação macroscópica do fluxo de energia já foi bem caracterizada. Principalmente o fluxo energético mecânico-elétrico, o qual se atribui ao fenômeno eletromagnético e que já é objeto de estudo por muitas décadas. Conseqüentemente, a maioria das aplicações em engenharia, onde existe a necessidade da transformação de energia elétrica em mecânica (ou vice versa), utilizam transdutores eletromagnéticos.

O desenvolvimento de materiais para essa aplicação ainda se encontra em estágios primários. Assim, reconhecendo-se o grande número de aplicações que podem exigir novos meios de transformação de energia, o desenvolvimento de atuadores inovadores torna-se uma atividade motivadora.

Existem duas grandes razões que explicam o porquê tais materiais merecem especial atenção dos engenheiros no campo do desenvolvimento da robótica. Primeiramente, eles são capazes de prover movimentos retilíneos sem a necessidade da assistência de um complexo sistema de transferência de potência. Tais sistemas, quando empregados, dão origem a robôs volumosos, impedindo-os muitas vezes de realizar tarefas delicadas. A eliminação total ou parcial dos sistemas de transferência de potência beneficia a expansão de aplicações onde são necessários movimentos precisos e delicados. Além disso, reduzir o número de estágios de transmissão de força/torque obviamente aumenta a eficiência energética do sistema (BAR-COHEN, 2001).

Em segundo lugar, a inerente flexibilidade de materiais poliméricos dá maior espaço à criação de máquinas biomiméticas. Tomando consciência do fato de que

os animais, assim como seus sistemas de atuação (os músculos) são naturalmente flexíveis, o desenvolvimento de atuadores macios deve ser um dos mais importantes pré-requisitos para o desenvolvimento do campo biomimético (DEROSS, 1999).

Muito embora os atuadores feitos com polímeros apresentem muitas vantagens em relação aos atuadores eletromagnéticos mais tradicionais, ainda existem controvérsias a respeito de sua viabilidade. Problemas com estabilidade e durabilidade dos materiais são as principais preocupações. Mas, considerando a fase de desenvolvimento desta tecnologia, que ainda se encontra em seu estágio inicial e a ausência de tecnologias refinadas para a manufatura, o debate não deve ser a limitação ou o ponto final para essa ciência, mas um elemento motivador aos estudos e pesquisas no ramo.

Existem diversos tipos de materiais poliméricos disponíveis para o desenvolvimento, e a pesquisa em atuadores poliméricos é certamente multidisciplinar, e tipicamente não é uma tarefa fácil encontrar uma solução dominante ou um consenso a fim de concentrar recursos e acelerar as atividades de pesquisa.

Existem inúmeros livros e artigos a respeito de sensores e atuadores poliméricos, mas a maioria deles desenvolve um enorme leque de informações sobre a transformação de energia, desde os básicos princípios aos fenômenos mais avançados da física. No entanto, o objetivo deste capítulo foge à norma. Focando-se em combinar a física envolvida no comportamento de elastômeros dielétricos com aplicações robóticas. Serão apresentadas propostas para o projeto de atuadores funcionais.

A ênfase nos elastômeros dielétricos se dá por conta de se apresentarem como os mais populares em termos de aplicações industriais e por sua facilidade de obtenção.

4.2. Atuador Elastômero Dieétrico com pré-tensão (ANTLA)

A operação básica de um atuador elastômero dielétrico simplesmente se dá pelo fato de que o polímero se deforma expandindo-se ou contraindo-se, quando da aplicação de uma tensão nos eletrodos.

Existe uma significativa limitação na aplicação prática de um atuador composto por um polímero dielétrico, que se apresenta na forma de um fino filme muito delicado.

Para contornar esse problema e para amplificar os resultados de força e deformação obtidos, o conceito de atuador pré-tensionado foi proposto por pesquisadores do SRI, que obtiveram 100% de deformações em um polímero dielétrico após aplicar uma pré-tensão na direção da atuação (R. PELRINE, 1998).

A figura a seguir ilustra uma proposta para a construção de um mecanismo de atuação conhecido na literatura como ANTLA (“antagonistically configured actuation mechanism”). O efeito da pré-tensão ocasionada por essa configuração permite que o polímero produza deformações relativamente grandes (R. PELRINE, 2000). O filme polimérico pré-tensionado é preso a uma moldura e ao terminal de saída do movimento, permitindo uma combinação de forças do tipo “puxa/empurra” com grandes amplitudes de movimento.

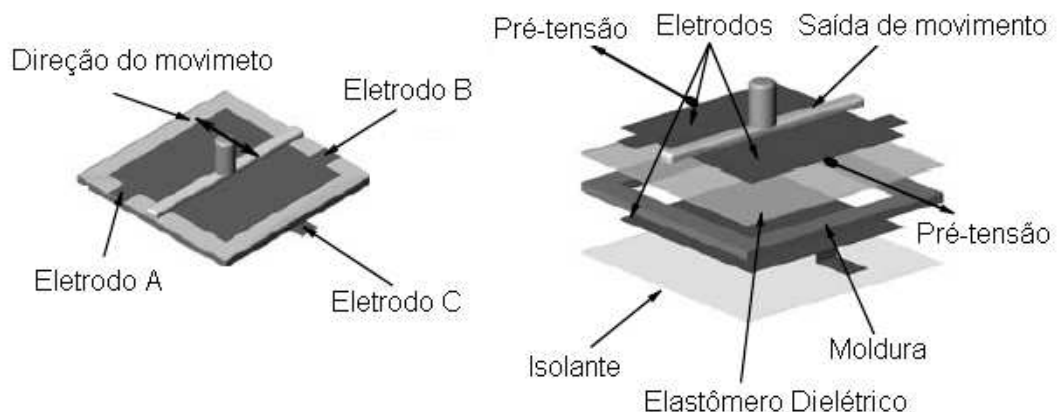


Figura 13 - Construção do Atuador ANTLA

Nesta configuração, o atuador é composto por uma única camada de filme polimérico dielétrico pré-tensionado e fixado a uma rígida moldura quadrada, permitindo que a pré-tensão seja uniforme na direção da atuação. Após estar esticado e preso à moldura, a superfície inferior é coberta por um eletrodo flexível

(possivelmente uma pasta condutiva), representando o eletrodo C. A superfície superior é dividida em duas metades, as quais são cobertas por camadas independentes de pasta condutiva, gerando os eletrodos A e B. Por fim, um terminal de saída do movimento é colocado na divisão os eletrodos da parte superior.

Quando aplicamos, por exemplo, uma tensão positiva no eletrodo A e deixamos o eletrodo B e C em terra, o terminal de saída de movimento movimentar-se na direção do eletrodo B, pois a parte do elastômero coberta pelo eletrodo A expande, devido à aplicação do campo magnético. O movimento é análogo para o caso em que a tensão positiva é aplicada no eletrodo B enquanto os eletrodos A e C estão aterrados.

Além do funcionamento básico de atuação, o projeto apresenta ainda uma característica adicional não comum aos atuadores já existentes. Sua compliança pode ser ativamente modulada pelo controle das tensões aplicadas. Por exemplo, se tivermos aplicadas tensões positivas em A e B, enquanto aterrmos o eletrodo C, o atuador torna-se menos rígido (apresenta maior compliança). Por outro lado, passará a ser mais rígido se todos os eletrodos encontrarem-se em terra.

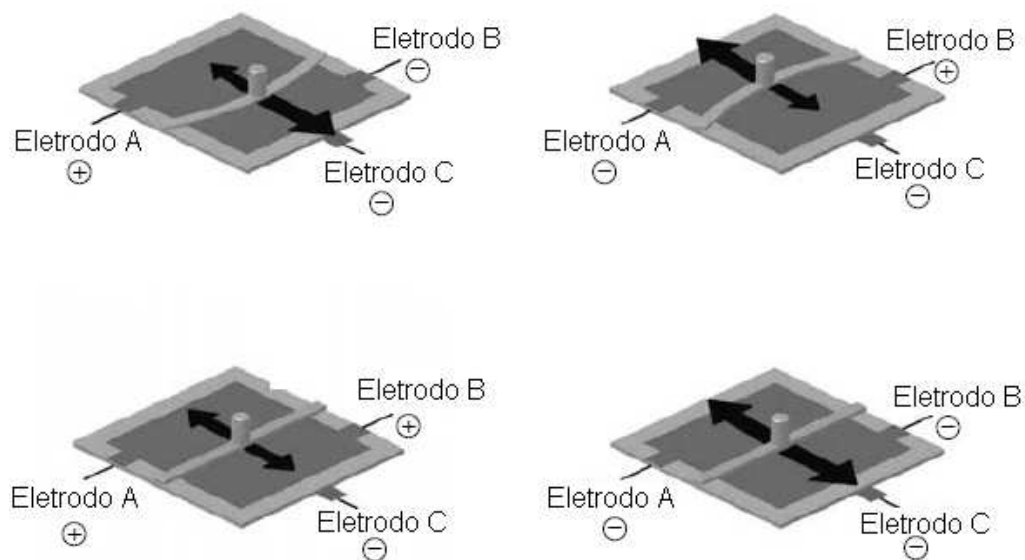


Figura 14 - Funcionamento do atuador ANTLA

O projeto proposto apresenta quatro estados de atuação: Direita, esquerda, Rígido e Flexível. Muito semelhante ao músculo humano (H.R. CHOI).

5. Ensaio: Teste de conceito

5.1. Experimento de referência

Em experimento conduzido na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (ASSIS, 2007), em uma adaptação ao experimento realizado por Wissler e Mazza (M. WISSLER, 2006), aplicou-se um perfil de tensão em forma de rampa com taxa de 20,7 V/s até que a tensão de 4,1 KV fosse atingida, quando ocorreu a quebra do dielétrico.

Como resultado, pode-se observar uma deformação de 223% na área ativa do polímero, representando um aumento de 79% do raio inicial.

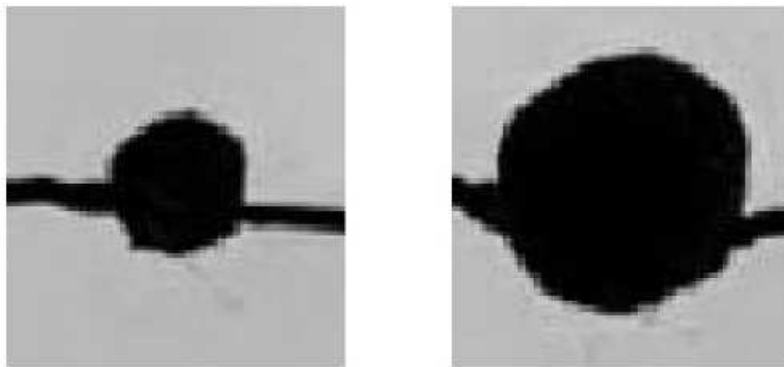


Figura 15 - Resultados observados por experimento conduzido na PUC-RJ

A idéia do experimento é desenhar sobre a superfície pré-tensionada do polímero uma circunferência de raio muito menor que o diâmetro de uma moldura circular ($r_0 = \frac{R}{10}$) e aplicar a tensão sobre esta área ativa.

A pré-tensão deve ser de 400% nos eixos x e y.

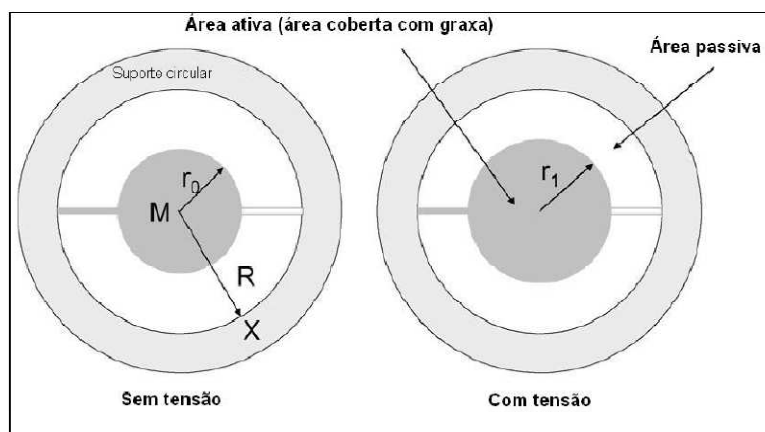


Figura 16 - Esquema da região ativa do polímero

Outro resultado obtido pelo estudo de conduzido na PUC-RJ (ASSIS, 2007) foi a determinação da variação de força ocasionada pela aplicação de uma tensão elétrica.

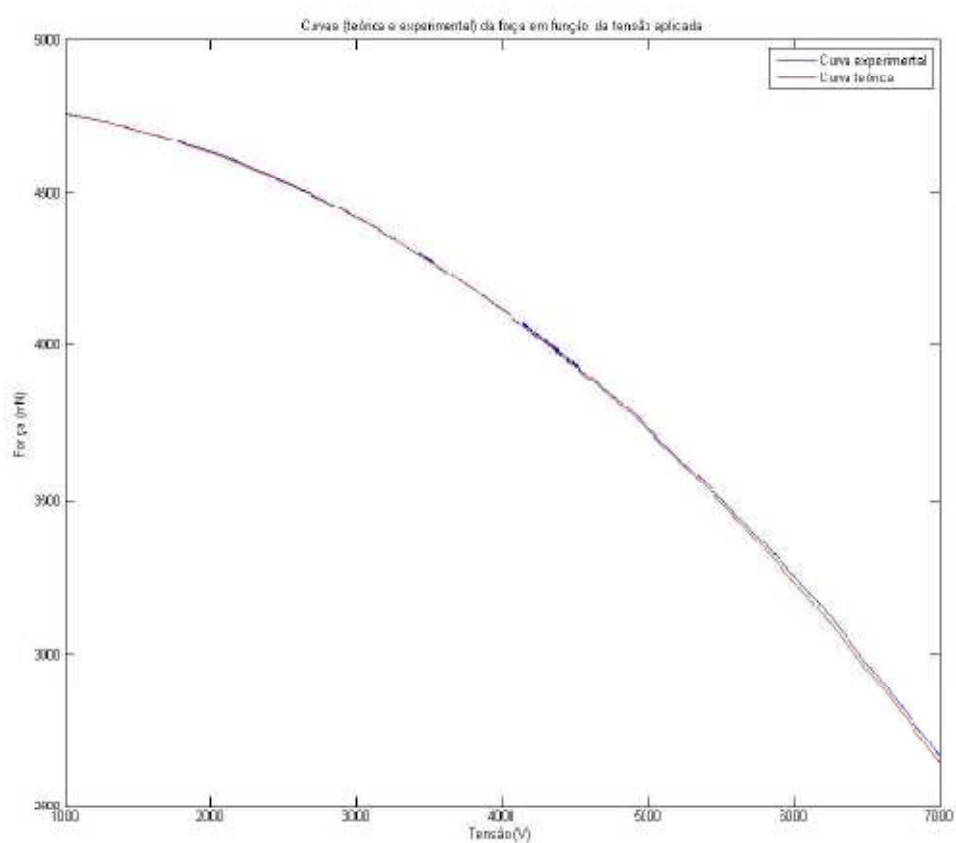


Figura 17 - Gráfico de Força x Tensão

Do gráfico nota-se que a força exercida varia de 2 N para uma tensão variando de zero a 7 kV.

5.2. Experimento realizado

Para efeito de comprovação do conceito de aplicação do atuador ANTLA proposto na seção 4.2, conduzimos um ensaio semelhante com o mesmo tipo de polímero dielétrico. Trata-se de uma fita acrílica produzida pela 3M, a VHB 4905.

Foi construído um mecanismo capaz de esticar o polímero para que o mesmo pudesse ser mantido em seu estado de pré-tensão por uma moldura circular plástica de 60 milímetros de diâmetro.

A figura 17 representa os passos utilizados para o pré-tensionamento do filme polimérico. O polímero foi alocado entre as molduras circulares com deformações de 400% em x e y.

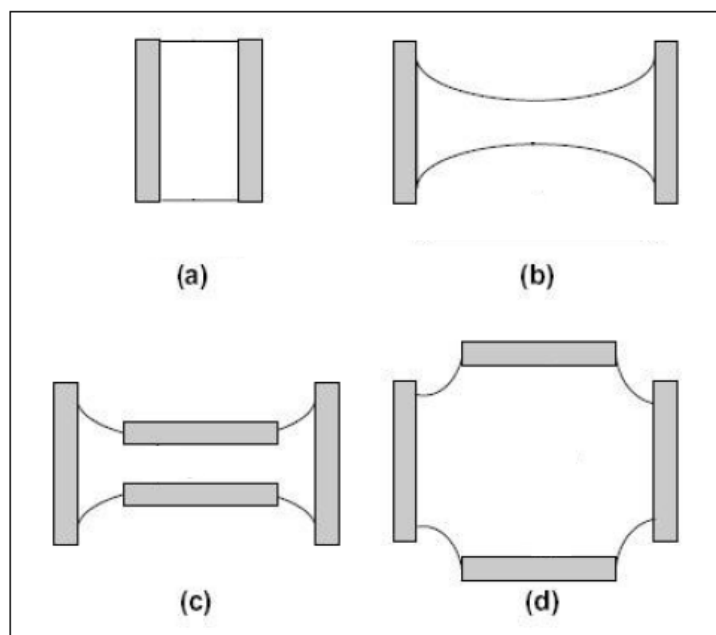


Figura 18 - Etapas para o pré-tensionamento

Abaixo, são apresentadas imagens sequenciais para a aplicação da pré-tensão no polímero e a montagem do aro circular.

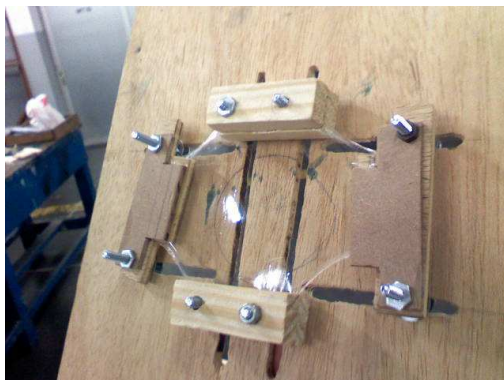


Figura 19 - Polímero pré-tensionado

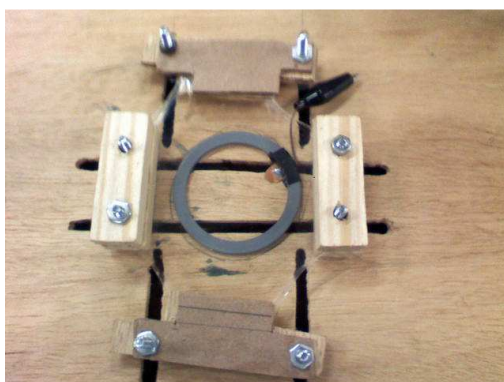


Figura 20 - Inserção da parte inferior do aro

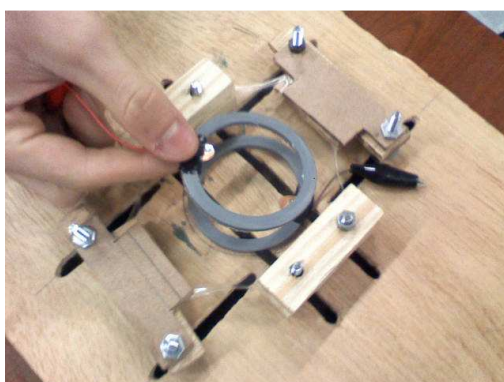


Figura 21 - Inserção da parte superior do aro

Para melhor entendimento da configuração de montagem do corpo de prova, elaborou-se um desenho em um software de CAD.

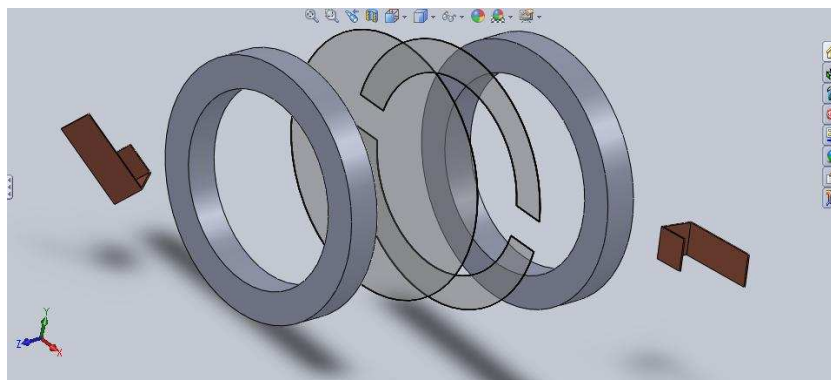


Figura 22 - Etapa 1 de montagem

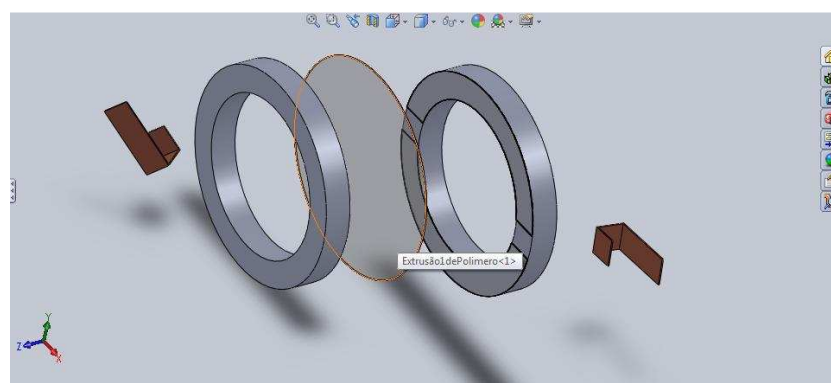


Figura 23 - Etapa 2 de montagem

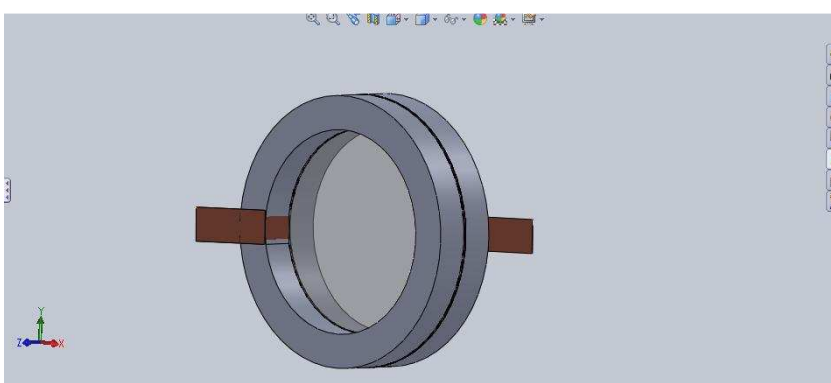


Figura 24 - Etapa 3 de montagem

Na etapa 1 da montagem podemos observar a vista explodida do corpo de prova composto por dois anéis contruídos a partir de um tubo de PVC de 60 milímetros de raio interno e espessura de aproximadamente 5 milímetros. Para a melhor aderência do filme polimérico aplicou-se um contorno do próprio material adesivo (etapa 2). Em cada anel foi instalado uma aba de folha de cobre para garantir o contato entre a saída da fonte e a região ativa do polímero (etapa 3).

Para a aplicação dos campos elétricos exigidos utilizou-se uma fonte geradora de alta tensão presente no laboratório de estudos de ultrassom. A saída desta fonte (pólo positivo e terra) foi conectada ao corpo de prova através das abas de folha de cobre, que por sua vez estavam ligados ao polímero através do contato com os eletrodos flexíveis, representados pelo gel condutor.

Aplicou-se um perfil de tensão em rampa com uma taxa de aproximadamente 50 V/s até o valor de 2 kV, quando houve a quebra do dielétrico.

Durante a aplicação pode-se observar a lenta movimentação do ponto de referência e seu retorno imediato à posição inicial após a quebra.



Figura 25 - Fonte de Alta Tensão

O ensaio confirmou o funcionamento da configuração de atuador proposto, uma vez que o ponto de referência apresentou um deslocamento máximo de aproximadamente três milímetros.

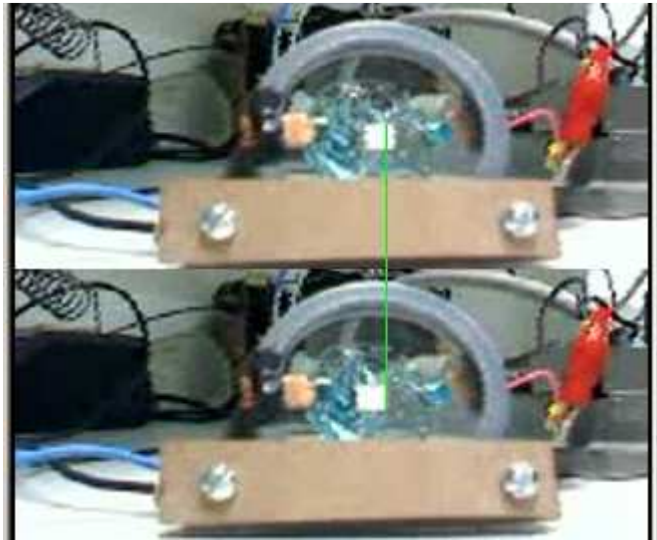


Figura 26 - Deslocamento do ponto de referência

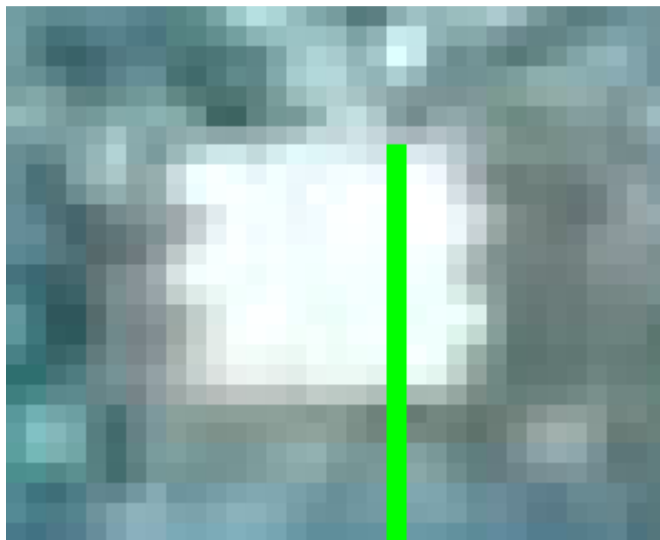


Figura 27 - Zoom da região do ponto de referência

5.3. Conclusões dos Ensaios

Baseando-se nos resultados dos experimentos de referência e do experimento realizado além do embasamento teórico fornecido pela revisão bibliográfica, conclui-se que polímeros eletroativos demonstram um nível desempenho geral comparável aos músculos naturais. Dados experimentais e modelos analíticos indicam que o mecanismo da eletrostricção é devido à atração eletrostática entre cargas livres nos eletrodos flexíveis (graxa condutiva). A força eletrostática causa compressão no polímero que, por conta de sua incompressibilidade, expande na direção de seu plano, abrindo espaço ao desenvolvimento de possíveis atuadores.

Quanto ao experimento realizado, atingiu-se um deslocamento em função de uma variação de tensão elétrica. Isso motiva a aplicação do polímero como atuador. Espera-se que com o aprimoramento do corpo de prova e do controle da tensão aplicada, melhores resultados sejam obtidos, aumentando ainda mais sua aplicabilidade.

Quanto ao polímero utilizado, encontrou-se muita dificuldade em seu manuseio, devido ao motivo de sua fabricação. Trata-se de uma fita dupla-face muito fina com alto poder adesivo. Além disso, o fato de se trabalhar com altas tensões faz com que esta tecnologia ainda seja menos atrativa quando comparada aos atuadores tradicionais.

6. Projeto de um atuador ANTLA

No presente trabalho, apresenta-se o projeto de um atuador feito a partir de uma camada pré-tensionada de filme polimérico bi seccionado em dois eletrodos flexíveis. Cada uma dessas partes do elastômero pode gerar uma operação do tipo “puxa-empurra” e, conseqüentemente, a atuação bidirecional. Ainda, o atuador permite o controle de sua rigidez, o que beneficia em muito a pesquisa em biomimética.

Aparentemente atuação bidirecional e controle de rigidez são as características mais importantes para um atuador ser empregado como um músculo artificial. (HYOUK RYEOL CHOI, 2005). O design de atuador proposto pode satisfazer esses requerimentos sem qualquer sistema de transmissão de movimento. E levando-se em conta seu processo de fabricação relativamente simples, trata-se de uma solução viável em termos de custo. Sua estrutura permite que seja aplicado em uma grande faixa de dimensões físicas, do micro à macro escala em aplicações robóticas.

O objetivo desta etapa do trabalho é a demonstração prática dos princípios de funcionamento, modelagem de seu comportamento e análise dos resultados atingidos.

6.1. Modelagem

6.1.1. Modelagem estática

Neste momento será apresentada, de maneira resumida, a modelagem estática do ANTLA. Seguiu-se como base os cálculos encontrados em artigos presentes na bibliografia (HYOUK RYEOL CHOI, 2005). Esta modelagem começa a partir da consideração de uma metade do polímero, como ilustrado na figura a seguir:

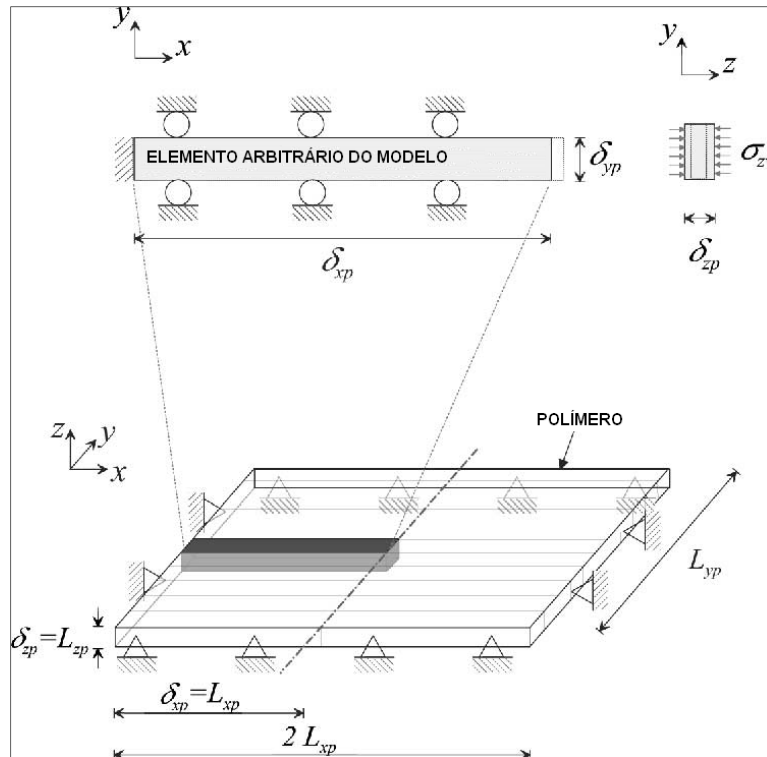


Figura 28 - Modelo do "meio polímero" e elemento arbitrário

O atuador pode ser dividido em elementos de comprimento infinitesimal, e então se pode realizar o balanço das forças atuantes nesses elementos, conforme a figura a seguir:

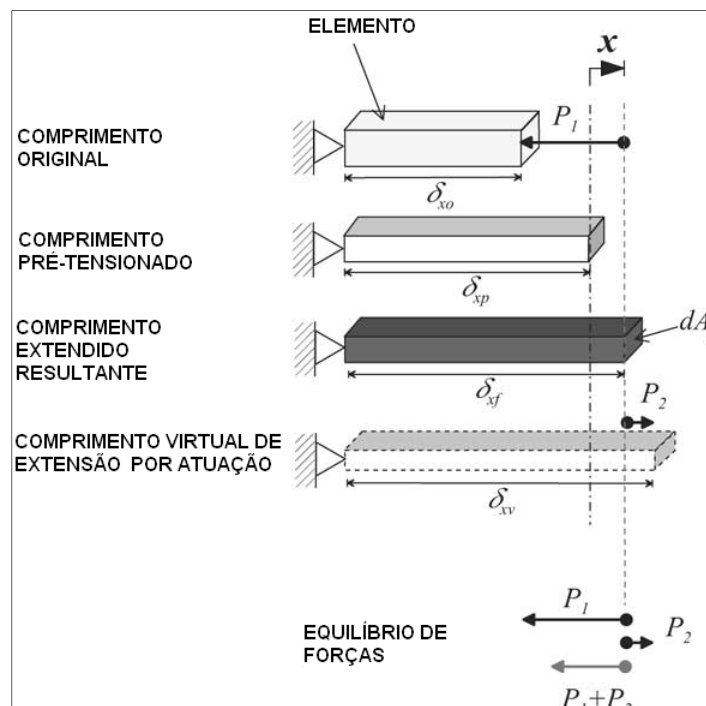


Figura 29 - Deslocamentos e Equilíbrio de forças

Quando a tensão elétrica é aplicada no elastômero dielétrico, o equilíbrio de forças é restabelecido pela força de natureza elástica P1 e a força de Maxwell P2, que podem ser escritas como:

$$P_1 = -dA_f Y_x^0 \varepsilon_{xp} + \frac{x}{\delta_{xo}} \quad (1)$$

$$P_2 = dA_f Y_x \frac{\delta_{xf}}{\delta_{xo}} \left\{ \frac{Y_z}{Y_z - \frac{\delta_{xo} \epsilon_r \epsilon_0}{\delta_{xf}} \left(\frac{V}{\delta_{xf}} \right)^2} - 1 \right\} \quad (2)$$

Onde os subscritos das o, p e f denotam os estados original, pré-tensionado e resultante após a atuação, respectivamente. Y_x representa o módulo de elasticidade na direção x, $^0 \varepsilon_{xp}$ é a tensão na direção x decorrente da pré-extensão, dA_f é a área transversal do elemento de análise, ϵ_0 e ϵ_r são a permissividade do espaço livre e a permissividade do elastômero. Assim, P1 é a força de restauração elástica devido ao pré-tensionamento e P2 representa a força eletrostática como uma função do deslocamento e tensão elétrica aplicada.

Consequentemente, a força resultante é a soma dessas duas forças encontradas:

$$P = -Y_x \delta_{yp} \delta_{xf} \left[^0 \varepsilon_{xp} + \frac{x}{\delta_{xo}} - \frac{\delta_{xf}}{\delta_{xo}} \left\{ \frac{Y_z}{Y_z - \frac{\delta_{xo} \epsilon_r \epsilon_0}{\delta_{xf}} \left(\frac{V}{\delta_{xf}} \right)^2} + 1 \right\} \right] \quad (3)$$

As equações obtidas no modelo de “meio-polímero” com um elemento infinitesimal podem ser facilmente estendidas para o modelo completo (“polímero inteiro”) pela integração das forças entre vários outros elementos infinitesimais. No modelo completo, o deslocamento final é determinado no ponto de equilíbrio entre a força gerada no lado esquerdo e no lado direito. Assumindo como positivos os deslocamentos direcionados para a direita, em um deslocamento arbitrário x a força total exercida pelo atuador pode ser expressa por:

$$F = P_d - P_e \quad (4)$$

$$F = g_k K(x) - g_e E(x, V_e, V_d) \quad (5)$$

Onde as forças no terminal de saída exercidas pelo lado direito e esquerdo do polímero são P_d e P_e , $K(x)$ e $E(x, V_e, V_d)$ representam a força de pré-tensão e efeito eletrostático, V_e e V_d são as tensões elétricas nos lados esquerdo e direito do atuador.

$$K(x) = Y_x L_{yp} \left\{ {}^0 \varepsilon_{xp} (\delta_{Ezf} - \delta_{Dzf}) + \frac{x(1 + {}^0 \varepsilon_{xp})}{\delta_{xp}} (\delta_{Ezf} + \delta_{Dzf}) \right\} \quad (6)$$

$$E(x, V_e, V_d) = \left[\delta_{Ezf} \frac{\delta_{Exf}}{\delta_{Exo}} \left\{ \frac{Y_z}{Y_z - \frac{\delta_{Ezo} \epsilon_r \epsilon_0 \left(\frac{V_e}{\delta_{Ezf}} \right)^2} - 1} \right\} - \delta_{Dzf} \frac{\delta_{Dxf}}{\delta_{Dxo}} \left\{ \frac{Y_z}{Y_z - \frac{\delta_{Dzo} \epsilon_r \epsilon_0 \left(\frac{V_d}{\delta_{Dzf}} \right)^2} - 1} \right\} \right] \quad (7)$$

Onde δ_{Ejf} e δ_{Djf} são os comprimentos finais na direção j do lado esquerdo e do lado direito. Enquanto que δ_{Ejo} e δ_{Djo} são os comprimento originais nessa direção. g_k e g_e são chamados restauração efetiva e coeficiente eletrostático, respectivamente (HYOUK RYEOL CHOI, 2005).

Esses coeficientes dependem de fatores geométricos, como o tamanho do frame, espessura do terminal de saída de movimento, etc. São determinados experimentalmente. As equações acima estabelecem as relações estáticas entre o deslocamento e as tensões aplicadas.

6.1.2. Modelagem Dinâmica

Na modelagem dinâmica, o atuador será simplificado para um modelo de massas aglomeradas, como na figura abaixo:

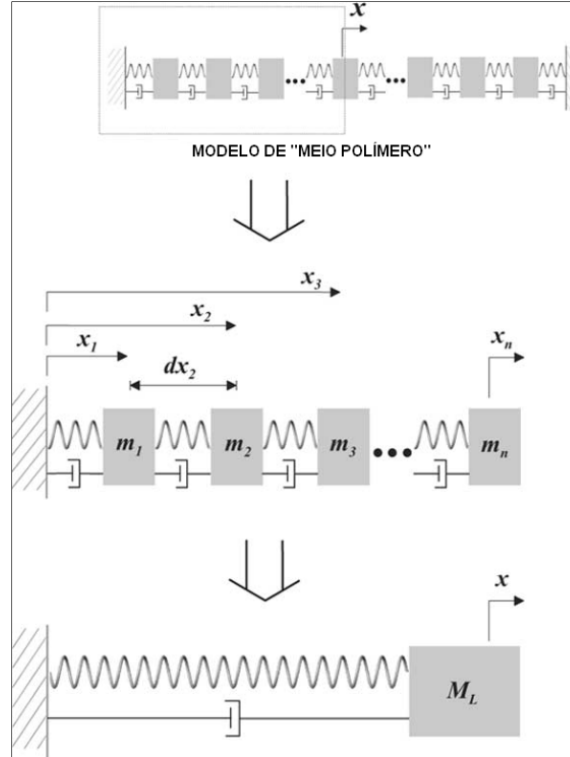


Figura 30 - Esquema da modelagem dinâmica

No entanto, o modelo matemático tem uma forma complicada devido ao comportamento não linear e aspectos como amortecimento viscoso, etc. Baseando-se no modelo proposto a equação dinâmica pode ser expressa por:

$$F(t) = M\ddot{x} + B(\dot{x}) + g_k K(x) - g_e E(x, V_e, V_d) \quad (8)$$

Onde $M\ddot{x}$ é a força inercial, $B(\dot{x})$ representa a força de amortecimento e $F(t)$ são as forças externas. $K(x)$ e $E(x, V_e, V_d)$ são expressos por (7) e (8).

Todos os i-ésimos elemento tem seu próprio deslocamento $x_i = \sum_{j=1}^i d_{xj}$ e aceleração $\ddot{x}_i = \sum_{j=1}^i \frac{d^2 x_j}{dt^2}$. Assumindo que $m_i = dm = \rho \Delta l / n$ e $d\ddot{x} = \ddot{x} / n$, temos que o termo da força inercial será:

$$M_L \ddot{x} = dm\{nd\ddot{x}_1 + (n-1)d\ddot{x}_2 + \dots + \ddot{x}_n\} = \frac{n+1}{2n} \rho \Delta_L \ddot{x} \quad (9)$$

Onde, ρ é a densidade de massa do material elastômero, Δ_l é o volume, e M_e denota a massa equivalente da metade esquerda do atuador. Utilizando o mesmo raciocínio para a metade direita, a massa equivalente total do polímero fica:

$$M = M_e + M_d = \frac{1}{2} \rho \Delta \quad (10)$$

Por conta de seu comportamento visco elásticos, os elastômeros apresentam mecanismos particulares de dissipação de energia como a fricção viscosa não linear, deformação plástica, amortecimento de Coulomb, etc. Fato que torna difícil a consideração de todos esses efeitos. Por isso um efeito geral será incluído por meio da introdução do conceito de amortecimento equivalente, que não será constante, mas apresentado na forma de uma equação. Por exemplo, o amortecimento equivalente viscoso $B(\dot{x})$ da fita VHB 4910 pode ser representado por:

$$B(\dot{x}) = \frac{h}{w^{0,25}} \dot{x}^{1/2} \quad (11)$$

Onde h representa o coeficiente de amortecimento de histerese da fita e w a frequência de excitação. Temos que h depende do material e apresenta um valor de 0,3 para o caso da VHB4910 com 200% de pré-deformação.

Tais modelos encontrados na equação dinâmica e nas formulações estáticas podem ser úteis para o desenvolvimento de métodos de controle para o atuador proposto.

6.2. Descrição do atuador

O ANTILA foi construído a partir de um par de frames quadrados responsáveis pela manutenção do estado de pré-tensão do elastômero dielétrico. O qual é dividido por um filete de saída de movimento na região que divide entre os eletrodos superiores.

A fita VHB4910 foi escolhida baseada nos experimentos realizados em etapas anteriores do trabalho (quando se utilizou a VHB4905) por apresentar maior espessura e largura, fato que facilita seu manuseio.

Os frames são compostos de polipropileno por apresentar propriedades isolantes. O filete de saída de movimento é feito de borracha com baixa rigidez para que não apresente algum tipo de restrição ao movimento do atuador.

6.2.1. Desenho de conjunto

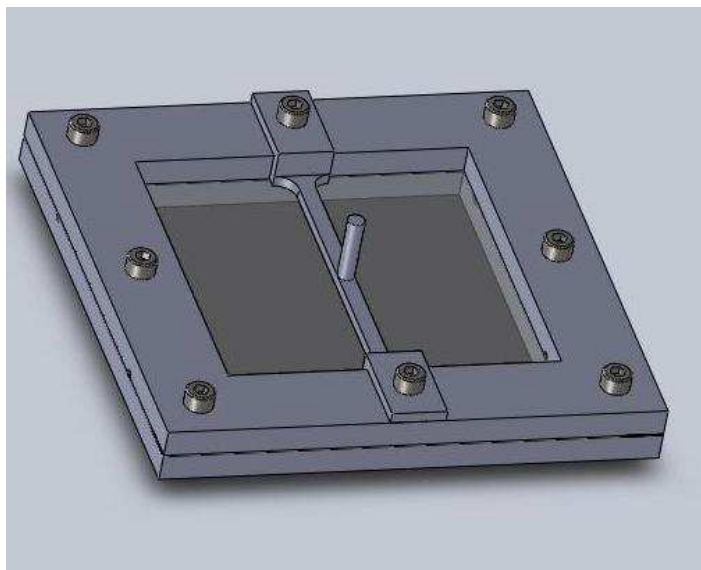
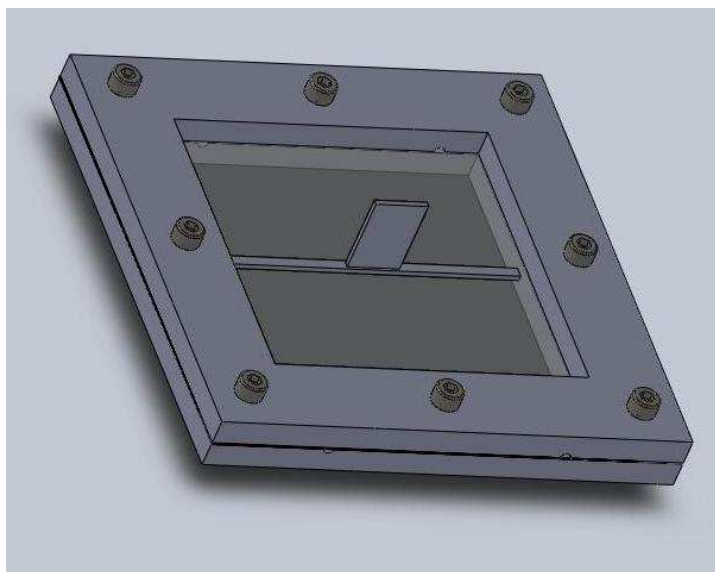


Figura 31 - Desenho de conjunto ANTILA

A figura acima ilustra o design do atuador proposto em CAD. Vale notar que para efeitos de medição adaptou-se o eixo de saída de movimento para uma chapa, uma vez que esta facilitaria a aquisição de dados sobre os deslocamentos.



6.2.2. Detalhes de fabricação

A seguir são apresentados os desenhos utilizados na fabricação do atuador.

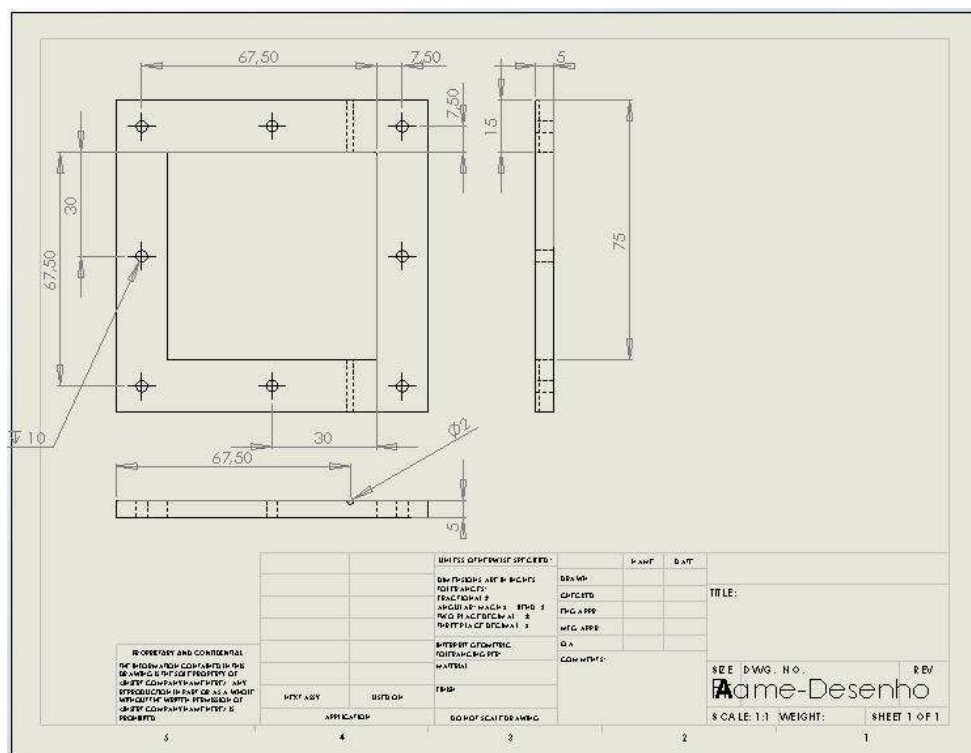


Figura 33 - Desenho de Fabricação do frame

6.3. Sistema Elétrico

O sistema elétrico utilizado para os testes de comprovação de conceito nos capítulos anteriores era baseado em uma fonte de alta tensão que se encontra no laboratório de estudos de ultrassom da Universidade de São Paulo. Por motivos de praticidade e mobilidade optou-se pela elaboração de um circuito mais compacto para a aplicação das tensões elétricas necessárias ao funcionamento do atuador.

O circuito mostrado na figura a seguir é composto de dois blocos. O primeiro deles (1) é um circuito auto-oscilador, capaz de gerar um formato de onda quadrado de amplitude variando de acordo com sua entrada. Em nosso caso, a entrada se dá a partir de uma bateria de 12V, o que gera uma saída alternada com o valor de pico de 500V no circuito oscilador. O segundo bloco (2) representa um circuito multiplicador, que recebe a tensão alternada gerada no primeiro bloco e, a cada estágio de multiplicação, soma o valor de seu pico, ao mesmo tempo em que retifica o sinal.

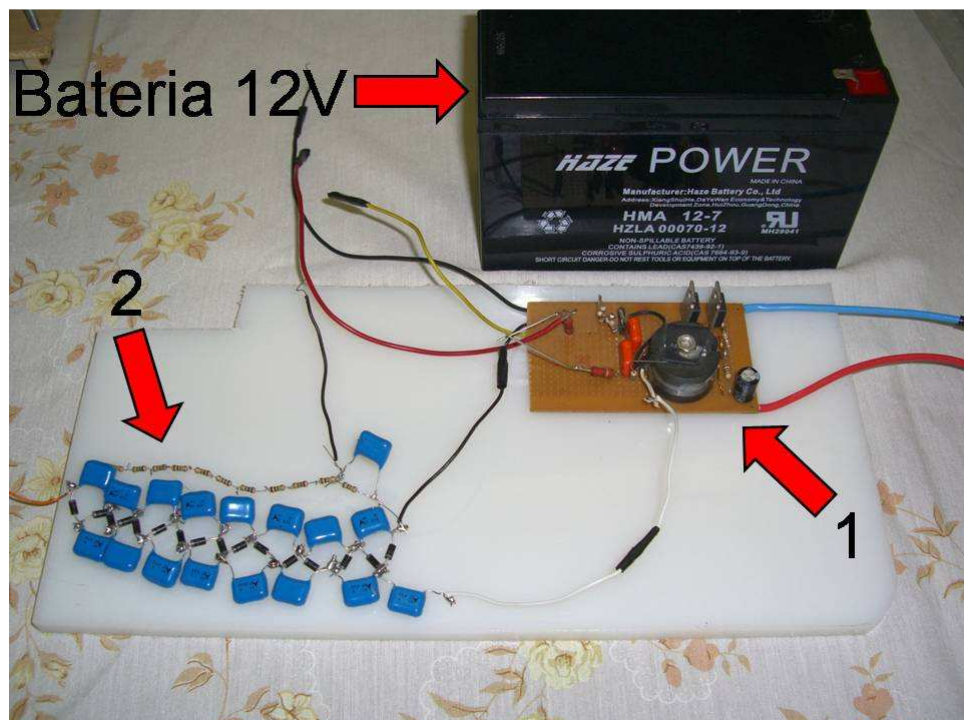


Figura 35 - Sistema Elétrico

Neste circuito os capacitores tem valor de 100 nF / 400 V e os diodos são do tipo 1N4937.

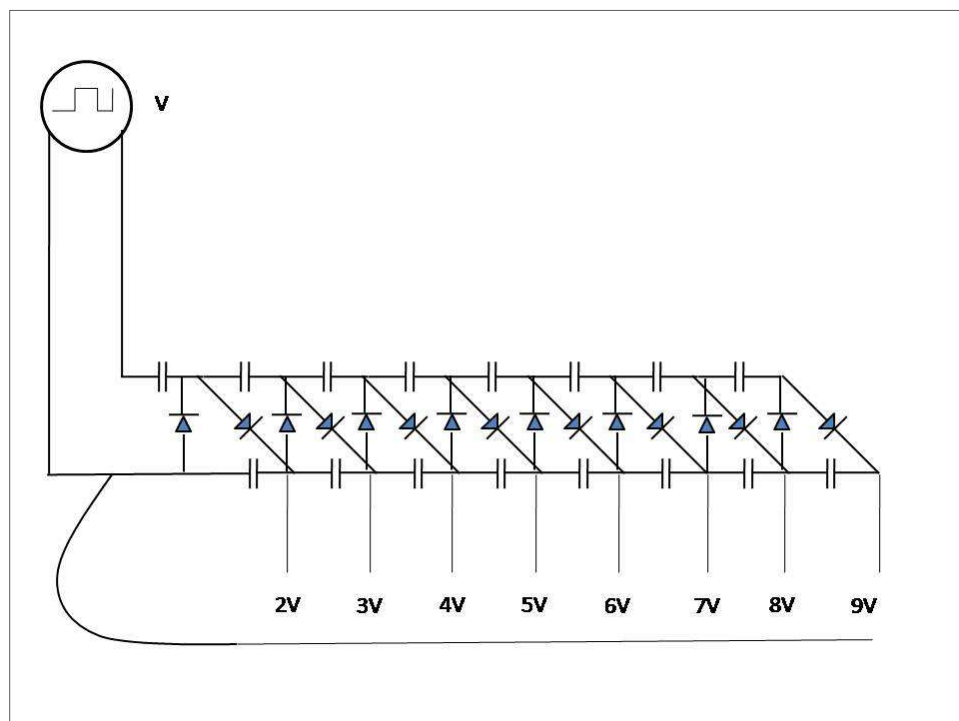
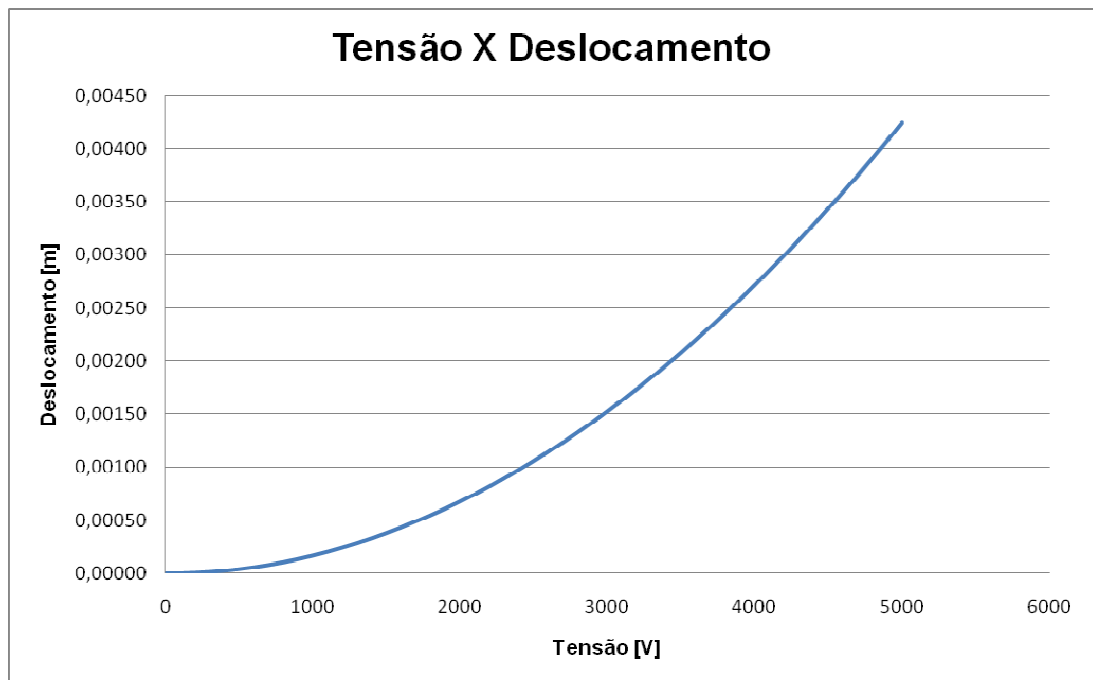


Figura 36 - Esquema do circuito

6.4. Simulações

6.4.1. Previsão de Deslocamento

A partir dos cálculos de modelagem para o comportamento do elastômero dielétrico em sua configuração do modelo de atuador proposto gerou-se uma tabela no MS Excel que relaciona a tensão aplicada com os deslocamentos esperados.



6.4.2. Máxima tensão elétrica admitida

Para a previsão de máxima tensão suportada pelo atuador (e conseqüentemente o máximo deslocamento), realizaram-se os cálculos a partir dos dados presentes nas especificações disponibilizadas pelo fabricante da fita VHB4910.

No primeiro momento da aplicação da pré-tensão (no eixo x) temos os eixos y e z livres para readequar suas dimensões, de acordo com a lei de poisson (0.5). Assim, a extensão do eixo x de quatro vezes seu tamanho, admite uma redução igualmente distribuída nos eixos livres. Sendo duas vezes em y e duas vezes em z.

No passo seguinte da aplicação da pré-tensão (no eixo y), o eixo x já está fixado. Assim, toda redução será gerada em z. Novamente, estica-se y de quatro vezes seu tamanho. Assim, reduzimos z em quatro vezes.

No total, olhando somente para o eixo z temos no primeiro passo uma redução de duas vezes seu tamanho e no segundo uma redução de quatro vezes, totalizando uma redução de oito vezes em sua dimensão.

Dessa forma, uma fita de espessura inicial de 1 mm, ao final do processo apresentará 0,125mm de espessura.

De acordo com o fabricante, sua rigidez dielétrica está entre os valores de 14,4 kV/mm e 20 kV/mm. Desta forma, a máxima tensão que podemos aplicar em nosso polímero, após a aplicação da pré-tensão (mecânica) está entre 1,8 kV e 2,5 kV.

7. Caracterização do atuador

Para efeito de comparação com a teoria e modelagem proposta realizou-se um ensaio para a caracterização do atuador.

7.1. Tensão Elétrica X Deslocamento

O ensaio contempla a aplicação de valores discretos de tensão e apuração dos deslocamentos por meio de uma câmera posicionada de maneira estratégica para o posterior tratamento das imagens.

Para cada valor de tensão aplicado obteve-se uma imagem do deslocamento gerado (observação do novo ponto de equilíbrio entre as duas metades do elastômero).

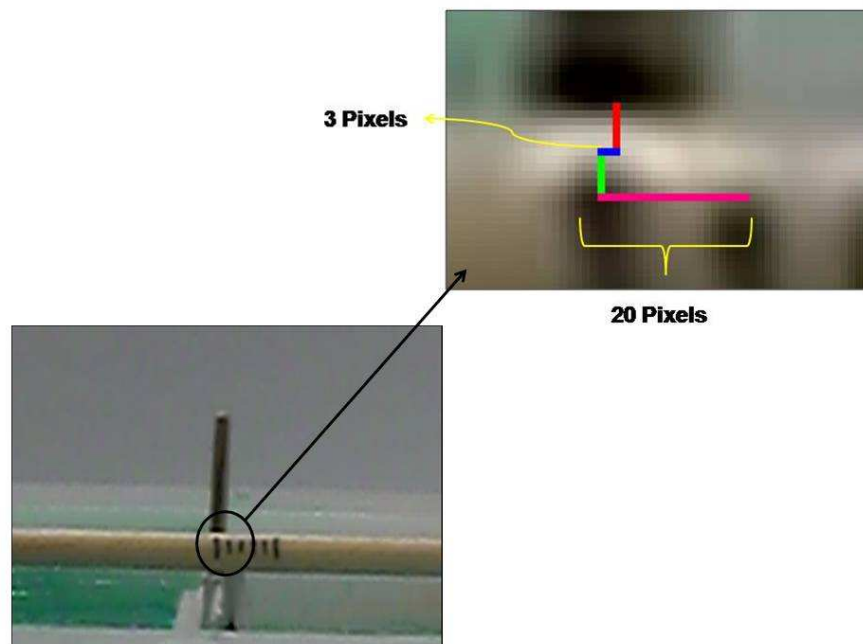


Figura 37 - Deslocamento 500 V

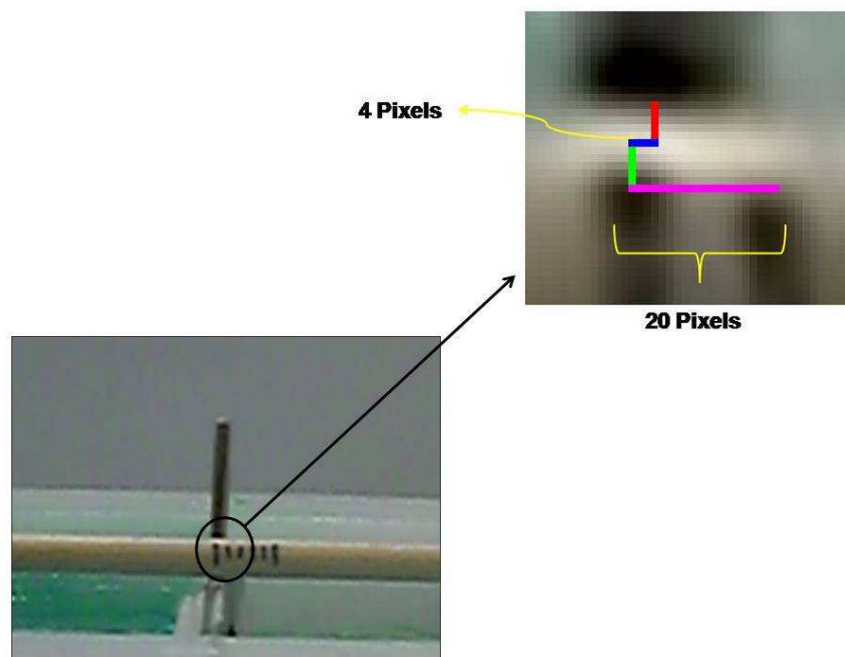


Figura 38 - Deslocamento 1000 V

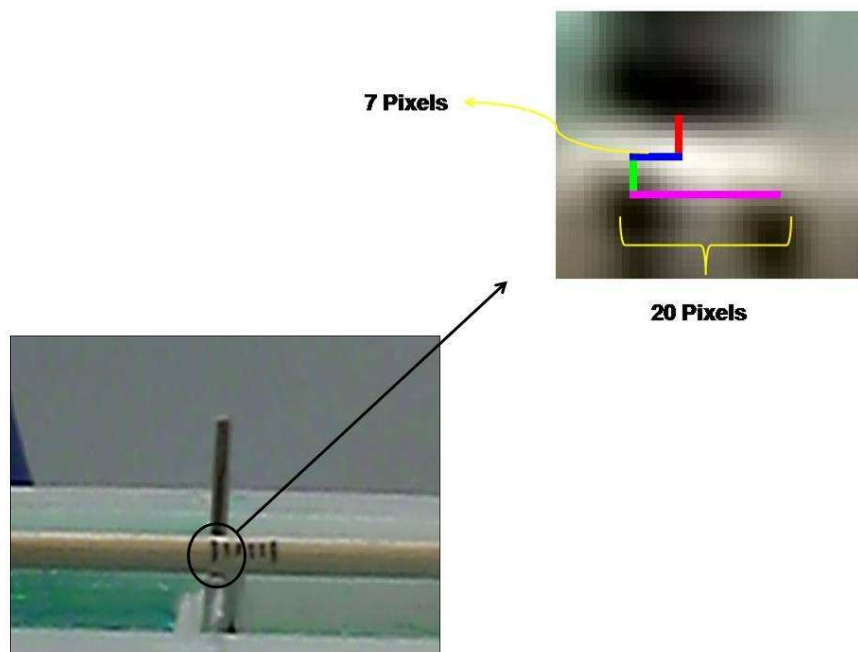


Figura 39 - Deslocamento 1500 V

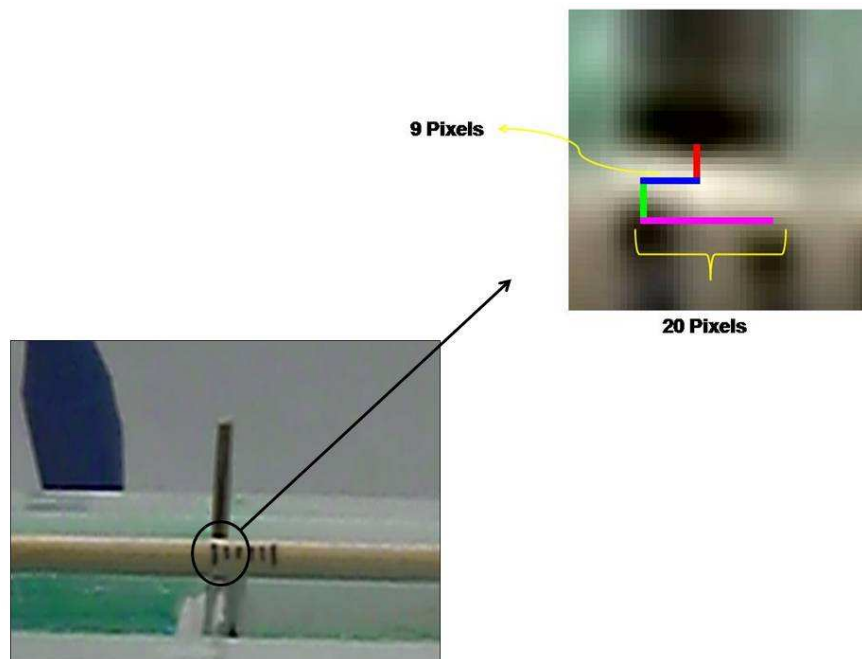


Figura 40 - Deslocamento 2000 V

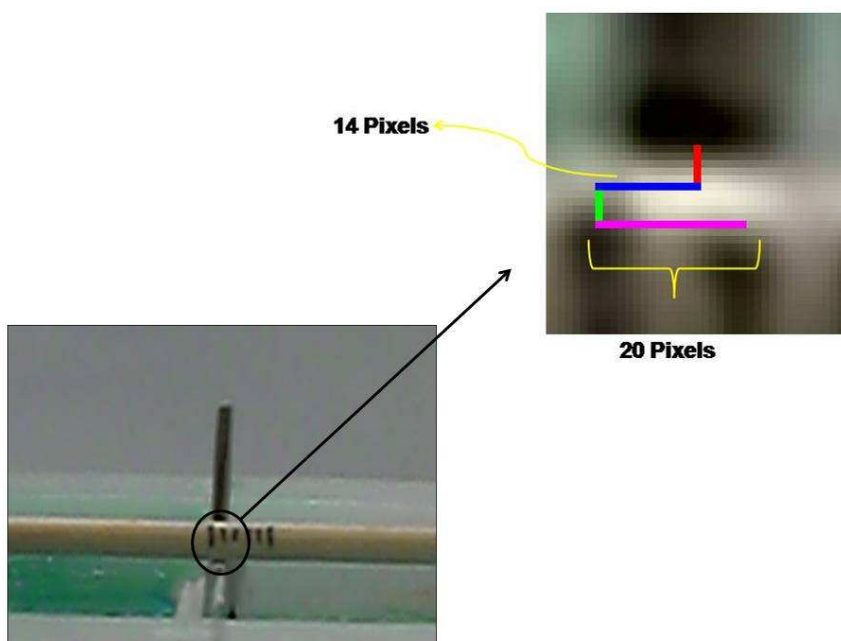


Figura 41 - Deslocamento 2500 V

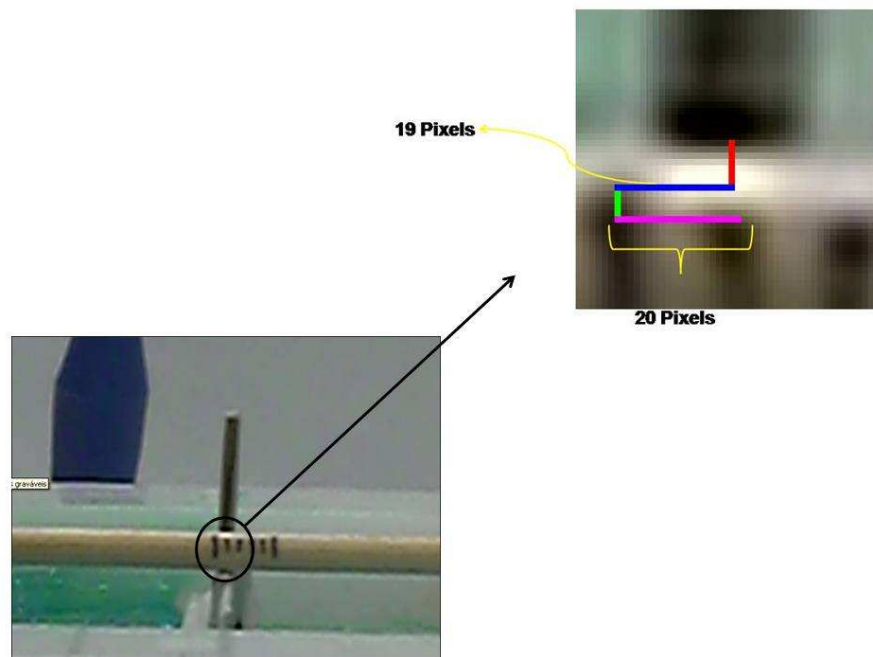


Figura 42 - Deslocamento 3000 V

Tais imagens possibilitaram a criação da seguinte tabela de conversão:

Tabela 2 - Conversão Pixel - Metro

Tensão (V)	Pixels	Pixels Referência (1 mm)	Medida (m)
500	3	20	0,00015
1000	4	20	0,0002
1500	7	20	0,00035
2000	9	20	0,00045
2500	14	20	0,0007
3000	19	20	0,00095

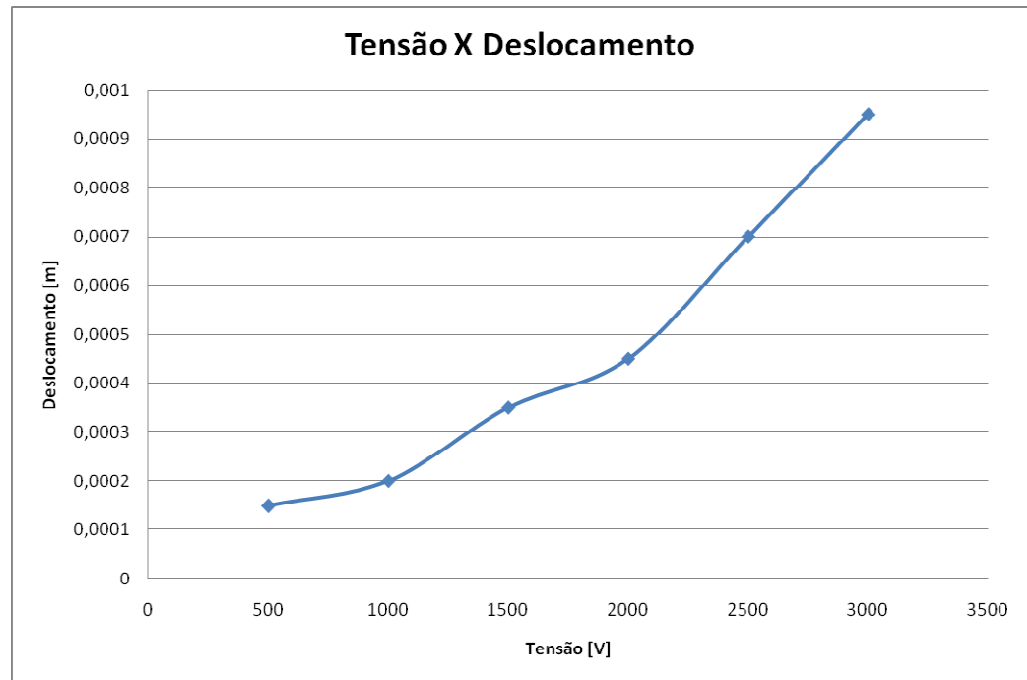


Figura 43 – Tensão Elétrica X Deslocamento (Experimental)

Neste momento fez-se a comparação dos dados obtidos experimentalmente e os dados previstos para o deslocamento.

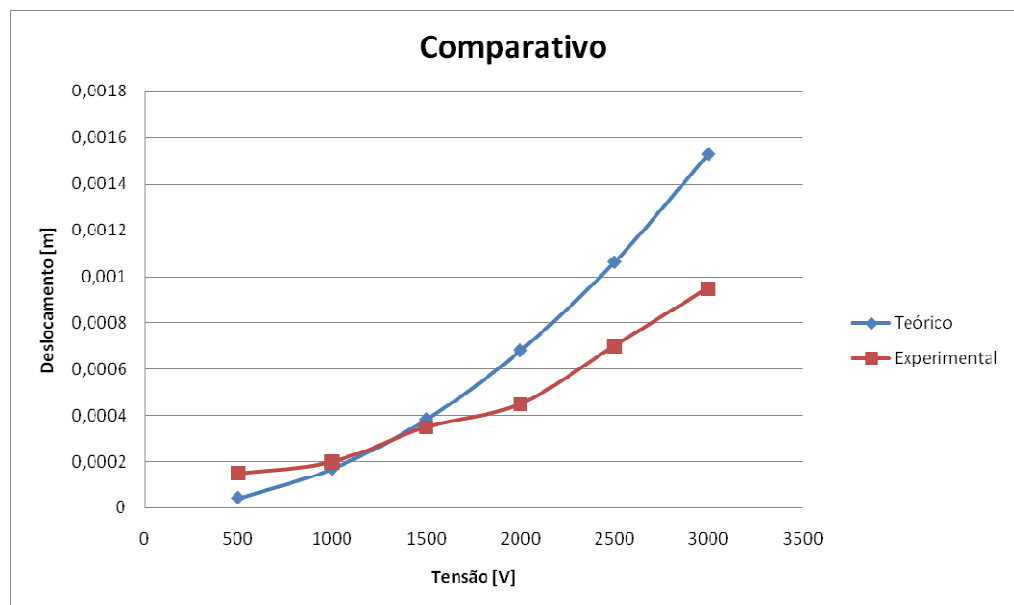


Figura 44 - Comparativo deslocamento Experimental X Teórico

Pode-se observar no gráfico que o atuador apresenta o comportamento previsto pela teoria.

Ainda, pode-se dizer que as formulações teóricas são mais precisas na região de menores deslocamentos. Isso se dá por conta de que para maiores deslocamentos, os fatores como a não linearidade, efeito visco-elástico e a histerese tem seus efeitos acentuados.

A ruptura dielétrica se deu para o valor de 3000 kV aplicados no eletrodo, valor superior ao esperado. Tal fato pode ser explicado pela possibilidade de que o gel condutor não estivesse transmitindo toda a tensão ao polímero, dessa forma a ruptura pode ainda estar dentro do valor teórico.

7.2. Tensão Elétrica X Força

A caracterização do atuador na questão das envolvidas fica a cargo de referências bibliográficas. Vale ressaltar que nesta aquisição utilizou-se a fita VHB4905. Observa-se um valor máximo de aproximadamente 0.04 N para o atuador ANTILA.

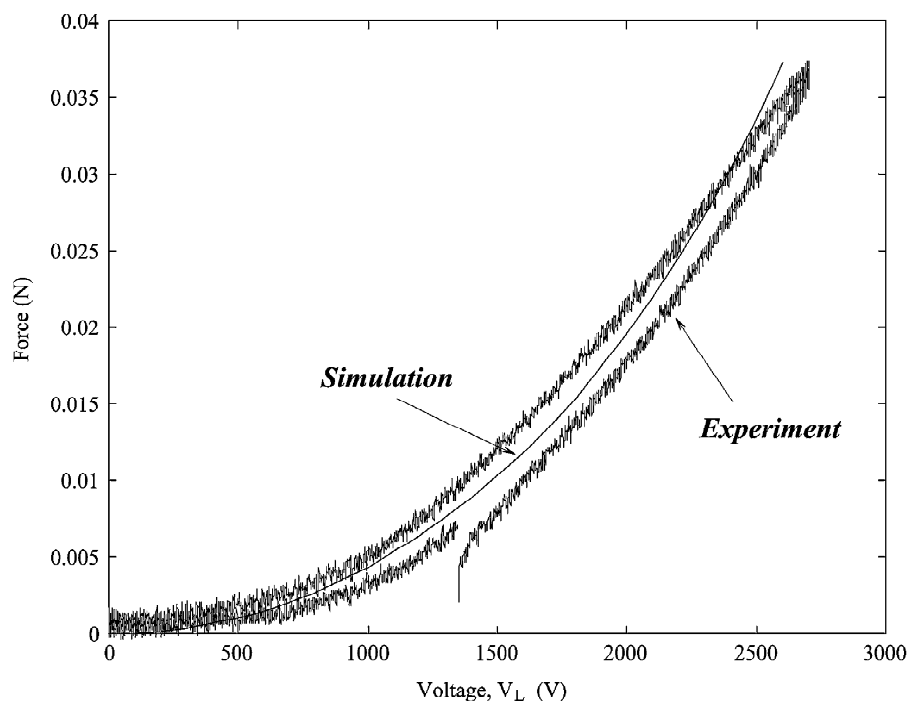


Figura 45 – Tensão Elétrica X Força (HYOUK RYEOL CHOI, 2005)

7.3. Modulação da Rigidez do Sistema

A característica de rigidez do atuador foi estudada a partir da aplicação de diferentes tensões nos eletrodos esquerdo e direito (HYOUK RYEOL CHOI, 2005). De fato, quando as tensões aplicadas aumentam, o atuador torna-se menos rígido, conforme citado anteriormente no item 4.2.

A figura a seguir é um gráfico de contorno que representa a relação entre deslocamentos, rigidez, tensões elétricas aplicadas e posições de saída. O eixo das abscissas denota a tensão aplicada na metade esquerda do atuador enquanto que o eixo das ordenadas representa as tensões no lado direito. No gráfico estão ainda presentes linhas de estados de mesmo valor para a rigidez e deslocamentos. Assim, podemos atribuir estados de rigidez e deslocamento do atuador proposto em função das tensões de entrada nos eletrodos.

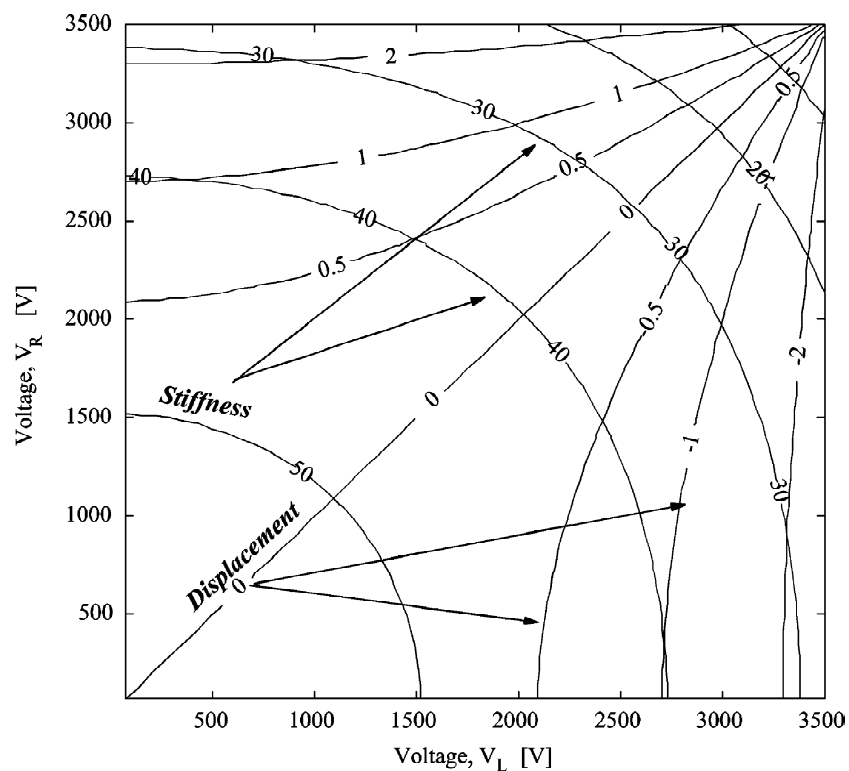


Figura 46 - Estudo da variação da rigidez do atuador (HYOUK RYEOL CHOI, 2005)

Por exemplo, imaginando que o terminal de saída de movimento está na coordenada $x = 0$ com a rigidez de 40 N/m (note que existem inúmeras posições para $x = 0$ no gráfico porque existem diversos estados de rigidez para esse deslocamento). As tensões de entrada são 2.15 kV em ambos os eletrodos. Então

se deseja mover o terminal de $x = 0$ a $x = 0.5$ mm, para isso devemos mudar os valores de VL para 1.6 kV e VR para 2.4 kV.

Imaginando agora que se deseja alterar o valor da rigidez de 40 a 50 N/m sem alterar o valor da posição de equilíbrio do terminal. Então VR e VL devem apresentar ambos 1.5 kV.

Dessa forma, a posição pode ser controlada sem que alteremos a rigidez ou a rigidez pode ser alterada sem que se mude o valor do deslocamento, em função da manipulação das tensões VR e VL. Implicando que a posição e a rigidez do atuador podem ser controladas independentemente.

Tal característica aproxima muito o atuador das funções desenvolvidas pelos músculos.

8. Conclusões

O atuador ANTLA desenvolvido a partir do conceito do uso de polímeros eletro-ativos mostrou-se funcional. Os objetivos foram atingidos uma vez que obteve-se a curva característica de atuação.

Desta curva conclui-se que sua atuação está limitada a escalas milimétricas já que os deslocamentos máximos encontrados e as forças envolvidas são de ordem reduzida.

Destaca-se ainda a manipulação de tensões de grandes ordens, podendo representar um risco à segurança, diminuindo seu leque aplicabilidade.

Por outro lado entre as vantagens encontradas estão: características semelhantes aos músculos naturais, efetividade de custo e facilidade de fabricação.

As idéias contidas no projeto proposto podem ainda ser estendidas em outras variações em design no campo da robótica. Trata-se de um domínio novo e promissor.

9. Bibliografia

A. WINGERT, M. LITCHTER. Hyper-redundant robot manipulators actuated by optimized binary dielectric polymers. **Proceedings of SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials, EAPAD.**

ASSIS, P. F. **Caracterização de atuadores baseados em músculos artificiais poliméricos por efeito capacitivo.** PUC RJ. Rio de Janeiro, p. 89. 2007.

BAR-COHEN, Y. **Polymer Actuators as Artificial Muscles (Reality, Potential and Challenges).** Washington: SPIE Press, 2001.

BAR-COHEN, Y. Actuation of biologically inspired intelligent robotics using artificial muscles. **Industrial Robot: An international Journal**, 2003. 331-337.

BAR-COHEN, Y. **Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential and challenges.** 2ª Edição. ed. Washington: SPIE, 2004.

BAR-COHEN, Y. **Biomimetics: Biologically Inspired Technologies.** **CRC Press - Taylor & Francis Group**, Boca Raton, 2006.

BAUGHMAN, C. CUI, A. A. ZHAKIMOV. Carbon Nanotube Actuators. **Science**, v. 284, 1999.

BIOLOGIA. Mundo Vestibular - Artigos - Esqueletos e os movimentos. **Mundo Vestibular**, 2007. Disponível em: <<http://www.mundovestibular.com.br/articles/470/2/O-ESQUELETO-E-OS-MOVIMENTOS/Paacutegina2.html>>. Acesso em: 12 Maio 2010.

CHOU C. P., B. H. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 12, p. 90-112, 1996.

DEROSSI, Y. OSAK. **Polymer Sensors and Actuators**. [S.I.]: Springer, 1999.

FENNIMORE, A. M., YUZVINSKY, T. D., HAN, W. Q., FUHRER, M. S., CUMINGS, J., ZETTL, A. Rotacional actuators based on carbon nanotubes. **Nature**, v. 424, 2003.

H.R. CHOI, K.M. JUNG, J.C. KOO, J.D. NAM. Robotic Applications of Artificial Muscle Actuators. In: TADOKORO, K. J. K. A. S. **Electroactive Polymers for Robbotic Applications**. [S.I.]: Springer.

HIROKAWA Y., T. T. Volume transition in nonionic gel. **J. Chem. Pshysics**, 1984.

HYOUK R. C., KWANGMOK J., SUNGMOO R., JAE-DO N., JAEWOOK J., JA C. K., KAZUO T. Biomimetic Soft Actuator: Design, Modeling, Control, and Applications. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics Vol. 10**, Outubro 2005.

J. SU, J.S. HARRISON, T. ST. CLAIR. Novel polymeric elastomers for actuation. **Proceedings of IEEE International Symposium on Application of Ferroeletrics**, 2000. 811-819.

J.D.W MADDEN, A.N. VANDESTEEG, P.A. ANQUETIL, P.G.A MADDEN, A. TAKSHI, R.Z. PYTEL, S.R. LAFONTAINE, P.A. WIERINGA, I.W. HUNTER. Artificial muscle technology: Physical and naval prospects. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, 2004. 706-728.

KOFOD, G. **Dielectric Elastomer Actuators**. The Technical University of Denmark. [S.I.]. 2001.

KOFOD, G. **Dielectric elastomers actuators**. Technical University of Denmark. [S.I.]. 2001.

M. WISSLER, E. M. Mechanical behavior of an acrylic elastomer used in dielectric elastomer actuator. **Sensors and Actuators A**, Junho 2006.

PORTAL São Francisco. Disponível em:
<<http://www.portalsaofrancisco.com.br>>. Acesso em: 12 Maio 2010.

R. PELRINE, R. KORNBLUH, J.P. JOSEPH. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a mean of actuation. **Elsevier**, 64, 1998. 75-85.

R. PELRINE, R. KORNBLUH, Q. PEI, J.P JOSEPH. High-Speed electrically actuated elastomers with strain greater then 100%. **Science** **287**, 2000. 836-839.

SEO, J. K. A. Y. B. Electroactive paper actuators. **Smart materials and structures**, 2002. 355-360.

SHAW, Y. An, M. T. Actuating properties of soft gels with ordered iron particles: Basis for a shear actuator. **Smart materials and structures**, 2003. 157-163.

SOKOLOWSKI W. M., A. B. CHMIELEWSKI, S. HAYASHI. Cold hibernated elastic memory self-deployable structures. **Proceedings of the SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures ans Materials**, 1999.

TADOKORO, K. Electroactive Polymers for Robotics Applications. **Springer**, New York, USA, 2007.

WINGERT, A. R. **Development of a Polymer-Actuated Binary Manipulator**. Massachusetts Institute of Technology. Massachussetts. 2002.

ZRINYI M., D. S. J. F. Comparative studies of electro- and magnetic field sensitive polymer gels. **Proceedings of the SPIE's 6th Annual International Symmposium on Smart Structures and Materials**, 1999.

ZRÍYI, M. Intelligent polymer gels controlled by magnetic fields. **Colloid & Polymer Science**. 278.