

7,20 (sete e dois /
hbm)

1

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia Mecatrônica

MICRO PINÇA ATUADO COM EFEITO PIEZELÉTRICO

Trabalho de Formatura

Prof Orientador: Prof Dr. Ricarrdo Cury Ibrahim .
Aluno: Gustavo Luis Antunes de Araujo.

18/10/2002

Agradecimentos:

Primeiramente ao Prof. Emílio pela sua ajuda durante todo o trabalho, aos alunos de mestrado Vitorio, Roni, aluno de doutorado Paulo, de pós Gilder todos da Escola Politécnica e principalmente à minha namorada Juliana pela paciência.

SUMÁRIO

- 1- Introdução
- 2- MEMs
 - 2.1- Definição de MEMs
 - 2.2- Fabricação de MEMs
 - 2.3 – Materiais para MEMs
 - 2.4 – MEMs robôs
- 3- Mercado e Futuro MEMs
 - 3.1 – Mercado
 - 3.2 – Futuro
- 4- Micro Pinças
 - 4.1- Desenvolvimento
 - 4.2 – Fabricação
 - 4.3- Características de flexibilidade e atuadores da pinça
 - 4.4 – Fabricação por LIGA
- 5- Materias Piezo elétricos
 - 5.1 – Introdução
 - 5.2 – Aplicação dos materiais piezo
 - 5.3 – Considerações Mecânicas
 - 5.4 – Geração de Força
 - 5.5 – Quesitos elétricos para operação dos piezos
 - 5.6 – Tempo de Vida do Piezo

6- Simulação Topológica

7- Fabricação

8- Testes

9- Lista de Referências

1 - INTRODUÇÃO

O Projeto de Formatura será o desenvolvimento de uma micro pinça, desde o seu projeto de design, projeto estrutural até a sua construção.

Para que isso seja possível, será necessário primeiramente um estudo generalizado sobre MEMs, observando os tipos de MEMs, suas construções, formas de montagem e utilidades. Além dos MEMs, um estudo sobre micro pinças já existentes será necessário. No relatório estão dispostos vários tipos de micro priças.

Durante o projeto serão necessários também estudos sobre materiais flexíveis e ainda sobre materiais piezoelétricos, material que será o atuador do movimento da micro pinça.

2 - MEMS

2.1 - Definição de MEMs

Os sistemas Micro-eletromecânicos (MEMS) são uma tecnologia que combina computadores com dispositivos mecânicos minúsculos tais como sensores, válvulas, engrenagens, espelhos, e atuadores encaixados em microplaquetas de semicondutor. Esta é a definição dado aos MEMs pelo DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), que é um seção de pesquisa do departamento de defesa dos Estados Unidos. (<http://www.darpa.mil/>)

2.2 - Fabricação de MEMs

A fabricação de micro estruturas hoje em dia se apoia muito no conhecimento de fabricação de componentes eletrônicos (transistores, diodos, resistores).

Existem dois tipos de fabricação de micro-estruturas:

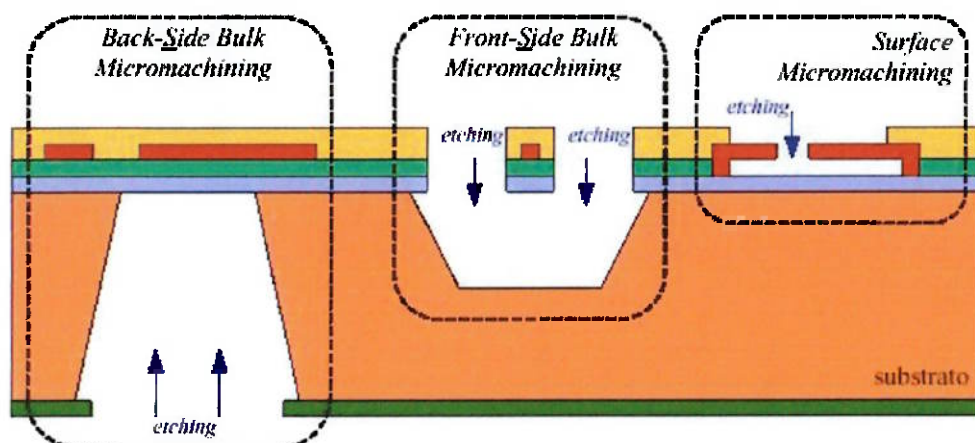
- processos específicos para microsistemas
- processos compatíveis com a microeletrônica

Os processos específicos como LIGA e SCREAM geralmente comprometem a integração com eletrônica.

As técnicas compatíveis com a fabricação de circuito integrados (microeletrônica), poderiam ser classificadas segundo as regiões ou camadas que são removidas para a liberação das estruturas.

- remoção do substrato pela face anterior ou frontal (front-side bulk micromachining);
- remoção do substrato pela face posterior (back-side bulk micromachining)
- remoção das camadas sacrificiais da superfície do substrato (surface micromachining)

A construção de tais estruturas é feita após a fabricação dos circuitos eletrônicos. Abaixo temos a caracterização dos métodos de liberação das microestruturas.



Formas básicas de micro-usinagem para a construção de estruturas suspensas.

Usinagem em volume

Microestruturas suspensas são construídas a partir da corrosão da face anterior ou posterior do substrato. Existem diferenças entre essas duas técnicas, tanto pelo processo, tanto pela estrutura a ser fabricada.

No caso de usinagem da face anterior, a suspensão da estrutura deve-se principalmente ao processo de corrosão lateral. Neste caso o alinhamento da máscara para a etapa da gravação é muito simples, permitindo a obtenção de estruturas menores. A geometria da estrutura é determinada pelo posicionamento das aberturas na máscara previstas para a corrosão do substrato. Esta técnica é eficiente em termos de custos e tempo de fabricação assim como em relação à compatibilidade com a eletrônica. Porém, quase inexistente liberdade de alteração de etapas do processo e as características das camadas limitam a aplicações alvejadas

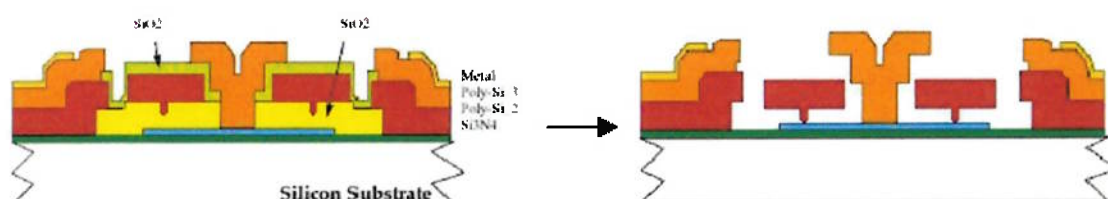
A usinagem da face posterior do substrato, por sua vez, é bastante utilizado para a realização de membranas. O objetivo principal é a realização de uma corrosão profunda e praticamente sem corrosão lateral significativa.

Neste método o alinhamento da máscara posterior representa um problema, assim como o controle da profundidade da corrosão.

As soluções químicas utilizadas para a corrosão podem ser tanto líquidas, ou secas, como gases ou plasmas. Porém a principal característica do ataque por líquidos é a anisotropia, isto é, a velocidade de ataque diferente para diferentes direções e ainda a seletividade do ataque, onde só é corroído o material de sacrifício.

Usinagem de superfície

Esta técnica constrói micro-estruturas suspensas através da corrosão de camadas presentes na superfície do substrato. Estas camadas podem ser tanto dielétricos quanto metais. Um exemplo deste método é a construção de micro estruturas com a remoção da camada sacrificial de óxido de silício. Esta tecnologia não permite a integração de componentes eletrônicos, sendo usada exclusivamente para a construção de estruturas mecânicas sobre o substrato de silício, abaixo temos um exemplo.

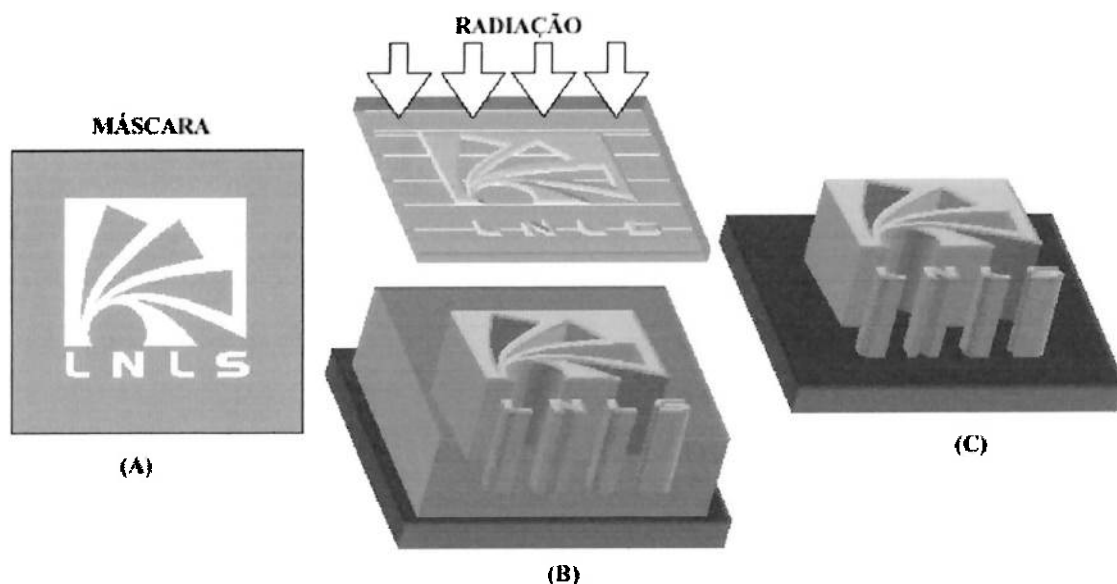


Fabricação de estruturas suspensas na superfície do substrato.

Micro fabricação por LIGA

A tecnologia LIGA foi originalmente concebida com base na litografia profunda por raiosX (LIGA-RX), mas recentemente, graças avanços na área de materiais, viabilizou-se uma variante tecnológica baseada em litografia profunda por ultravioleta (LIGA-UV).

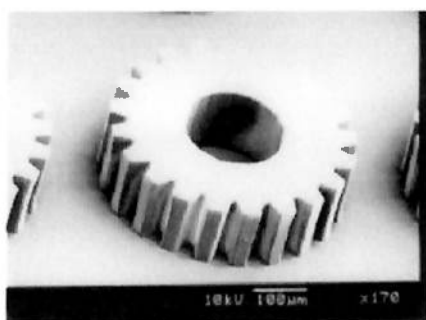
A primeira etapa do processo, usa-se máscaras litográficas.



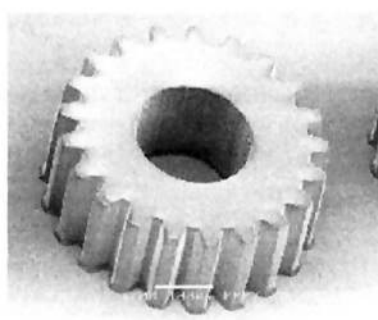
Etapas da litografia profunda: A) Desenho da máscara litográfica, onde as regiões claras são transparentes à radiação e as regiões escuras são opacas à radiação, B) Projeção da imagem da microestrutura numa resina fotosensível (fotorresiste), tornando insolúvel as regiões atingidas pela radiação, e C) Revelação da resina, removendo-se as regiões não atingidas pela luz e obtendo-se a microestrutura de fotorresiste.

Nesta etapa já temos um protótipo de fotorriste, porém quando se deseja o protótipo em metal, deve-se ainda empregar o processo de eletroformação.

Abaixo temos alguns exemplo de estruturas formadas pelo processo LIGA.



A)

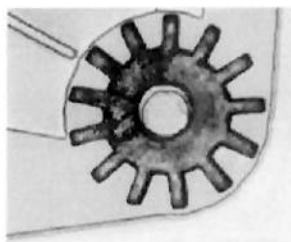


B)

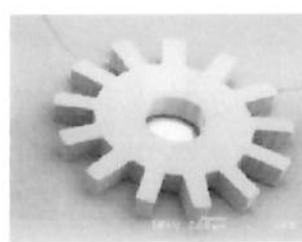
Microengrenagem de 470µm de diâmetro e 125µm de espessura produzida por litografia profunda em fotorresiste SU-8. a) Caso em que se utilizou litografia UV. b) Caso em que se utilizou litografia RX. Note-se a superior verticalidade das paredes obtida com RX.



A)



B)



C)

A) Micromotor hidráulico, e microfluxômetro. As engrenagens menores do micromotor, de 1mm de diâmetro, são giradas pelo fluir de um líquido ou gás e o movimento é transmitido às engrenagens maiores, de 2 e 4 mm de diâmetro, respectivamente B) Detalhe do microfluxômetro com turbina de 2mm de diâmetro. C) Fotografia de uma turbina. Em ambos os casos os canais e eixos foram feitos em fotorresiste SU-8 sobre substrato de silício e as partes móveis foram feitas à parte e montadas nos eixos. Note-se os canais para fibras ópticas para medição da velocidade de rotação das engrenagens e da turbina.

2.3 - Materiais de MEMs

Entre os materiais utilizados na fabricação, o de maior utilização sem dúvida é o silício, basicamente por três características:

- o processo de fabricação com silício é estável.
- o silício apresenta propriedades mecânicas adequadas
- habilita a integração com eletrônicos e sensores.

Abaixo temos um exemplo de MEM que é fabricado em silício. No caso é um MEM corrente onde os elos são de silício, este MEM foi fabricado pelo laboratório Sandia.

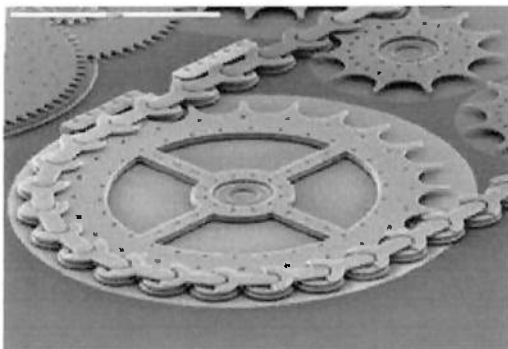


Fig. 5 Corrente MEM de silício

2.4 - MEMs Robôs

Uma categoria avançada de MEMs são os MEMs robôs. Estes Robôs podem ter distintas funções: veículos autônomos, micro armas para aplicações militares, pequenos inspetores internos de equipamentos e micro cirurgiões. Muitos esquemas foram implementados para o desenvolvimento de MEMs robôs, alguns deles de relativa importância, hoje se sabe que a aplicação de rodas para locomoção desses

equipamentos não seria adequado. Na figura abaixo temos uma solução adotada para o movimento destes micro robôs.

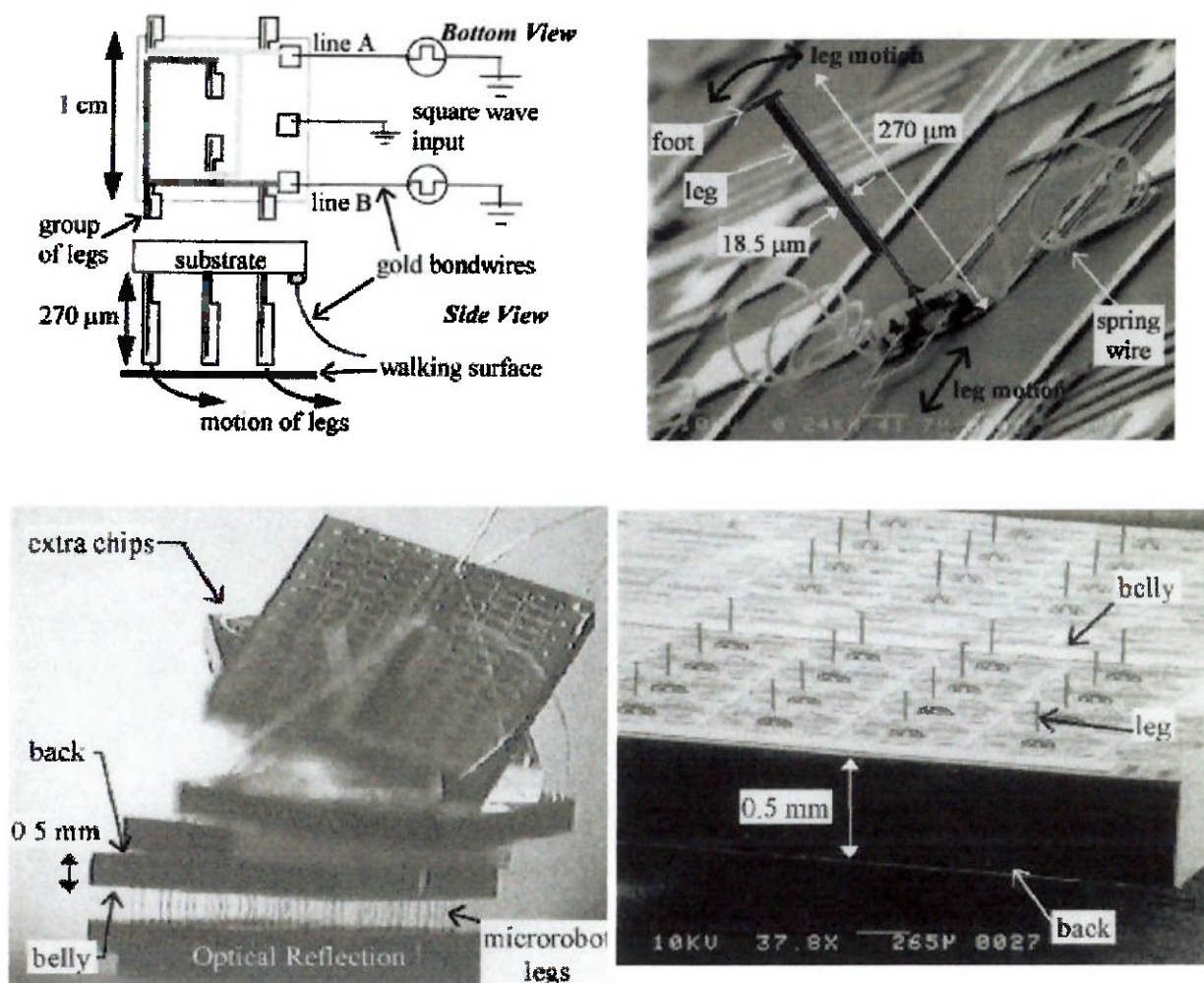


Fig. 6 Solução para movimentação dos robôs

No caso foram empregados pernas sobre uma plataforma. Estas pernas se locomovem através da técnica ETC (electro-thermal-compliant). Técnica que utiliza a dilatação do aquecimento da passagem de corrente para conseguir o movimento e será melhor analisada adiante.

3 - Mercado dos MEMs

3.1 Mercado de MEMs

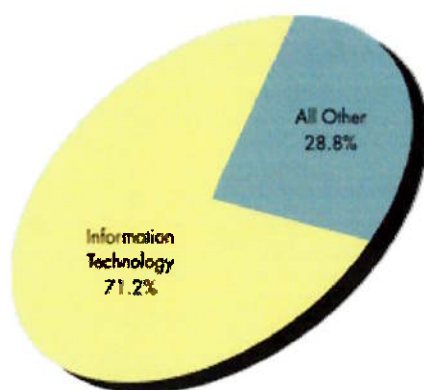
A indústria de MEMs tem uma previsão de crescimento de 10% para 2002 e um mercado estimado em US\$ 8 bilhões, grande parte deste mercado se concentra no EUA, onde as empresas locais e também o governo federal tem grande interesse no desenvolvimento dessa tecnologia para fins tanto comerciais como militares.

Podemos dividir o mercado de MEMS em duas partes, a parte voltada para produtos IT e a non-IT, sendo IT (Information Technology) um mercado principalmente para componentes de computadores e impressoras.

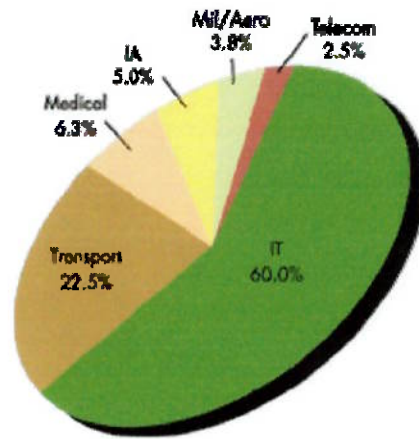
- *Componentes IT:*

Estes componentes são basicamente 2. Dentro desta área temos o desenvolvimento do posicionador do leitor de HD de micros computadores e também o acionador do cartucho de tinta das impressoras jato de tinta.

Abaixo temos uma gráfico diferenciando os dois mercados:



Neste gráfico de Pizza podemos observar a divisão do mercado, onde 79% dele está voltado para a produção de produtos para computadores. (1999)



Neste gráfico acima, existe uma previsão do mercado para 2004, onde a parcela utilizada por produtos IT cai para 60% de participação, dando espaço assim para novas aplicação que hoje não estão muito desenvolvidas.

- Componentes no-IT

Nesta região de produtos atualmente os produtos comerciais que utilizam fabricação CI mais populares são os micro sensores. São eles *ADXL150* da Analog Devices e *XMMAS40GWB* da Motorola. Estes acelerômetros tiveram como primeira função atuarem no sistema de Air-Bag automotivos. Hoje são utilizados como sensores de inclinação e também de choque. O dispositivo da Motorola trabalha na faixa de $\pm 40g$ em um único eixo até uma frequência de 400Hz, tendo uma saída analógica. Já o dispositivo da Analog Devices tem a opção de ser utilizado em um (*ADXL150*) ou dois (*ADXL250*) eixos. Ambos trabalhando na faixa de $\pm 50g$ e frequência de 100Hz, tendo também uma saída analógica. Abaixo temos algumas características do *ADXL150*

- Massa de prova de 0.1 μ gramas
- 0.1pF em cada lado do Capacitor Diferencial

- 10^{-18} F é a menor variação de capacitância detectável
- A variação total de capacitância para toda a escala é de 10 fento Farads
- O espaço entre as placas do capacitor é de $1.3\mu\text{m}$
- O menor deslocamento detectável da massa de prova é de 0.2\AA (um décimo de um diâmetro atômico)
- A distância entre a massa de prova suspensa e o substrato é de $1.6\mu\text{m}$
- A frequência de ressonância da massa de teste é de 10 a 22kHz

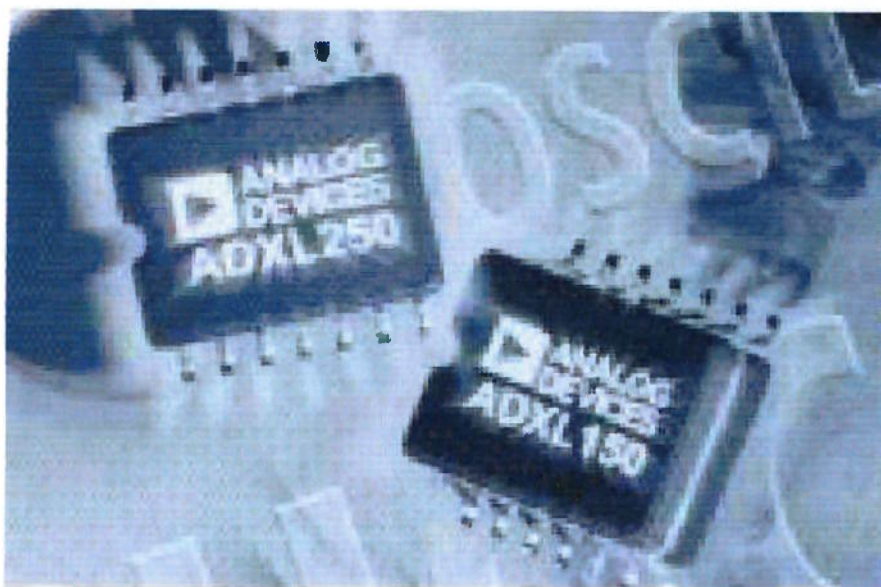
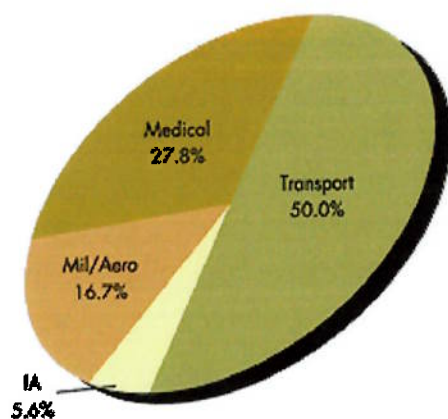


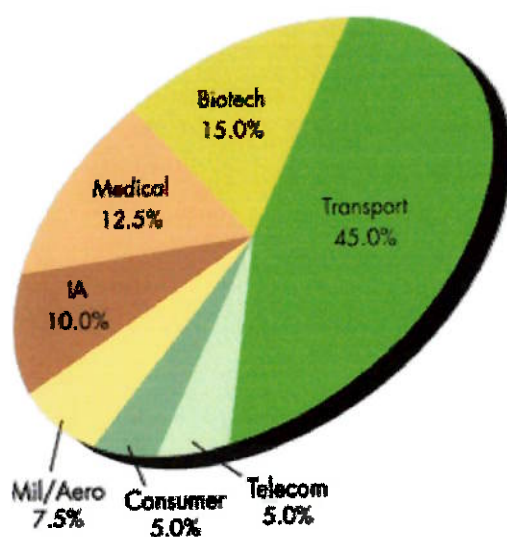
Fig. 7 Foto ilustrativa dos dispositivos ADXL 250/150

A evolução desses dispositivos estão melhorando seus desempenhos, e desta forma abrindo um leque de novas possibilidades de aplicação, como controle de estabilidade, referência de altitude, sensoriamento de navegação, isto no plano militar, já no comercial, existe aplicações na navegação, controle e diagnóstico veicular, como também aplicações em realidade virtual no sensoriamento de ambiente.

Abaixo temos um gráfico de participação no mercado de no-IT



Este gráfico é representativo do mercado de 1999 e temos uma previsão de mercado em 2004 mostrada abaixo.



A principal diferença entre o gráfico de 1999 e 2004 é o aparecimento de novos setores de mercado onde os MEMs estão sendo utilizados para responder a demandas de outros setores.

Existem algumas razões para que os sensores nesta área se sobressaíam sobre os outros modelos. Diferente dos micro sensores, os micro motores não estão bem

difundidos na indústria. As causas principais são duas, o seu baixo torque e também a dificuldade de acoplar ferramentas no motor.

Os Micros transmissores, estão melhorando a atuação dos micro motores, aumentando o torque disponível dos mesmos.

3.2 - Futuro dos MEMs

Os MEMs estão exatamente na fase de transição dos laboratório para as indústrias. O futuro dos MEMs está voltado principalmente para duas frentes, a primeira é o seu desenvolvimento dentro do campo da micro máquinas, criando máquina cada vez menores e mais complexas, podem desempenhar mais funções de maneira mais fácil, além do aprimoramento de seu processo de fabricação, facilitando este processo. Outra vertente de seu desenvolvimento é aquela volta mais para a indústria, com a busca por aplicações práticas para esta nova tecnologia.

Observamos que a tecnologia dos MEMs tem a vantagem da grande precisão e preço baixo, porém tem a limitação de ser em duas dimensões, pequeno comprimento, pequena saída de potência somado à grande vulnerabilidade à interferências externas como sujeiras e umidade. O futuro dos MEMs estão principalmente votados a pequenos pacotes independentes com micro mecanismos, micro eletrônicos e micro sensores e qualquer interação com objetos fora do seu pacote será feito através de sinais elétricos, magnéticos ou óticos.

Os MEMs ainda não estão acobertados pelo ganho da produção em grande escala. Esta é ainda uma barreira a ser enfrentada, pois para esta produção em massa ocorrer deve-se antes ter saber onde aplicar estas micro máquinas. Hoje pensa-se em utilizar os MEMs na substituição de equipamentos já existentes, em parte isto já está ocorrendo principalmente com os micro sensores que estão ocupando o lugar dos sensores normalmente utilizados. O ganho neste caso é obvio, ganho de espaço e diminuição do peso total do equipamento. Podem ser fabricados micro acelerômetro,

alguns micro giroscópios estão sendo produzidos com função de teste para no futuro serem comercializados.

Outra possível atribuição para o micro atuadores seria o controle de dispositivos convencionais, porém dificilmente os micro atuadores teriam potência suficiente para realizar o seu trabalho. Estes micro atuadores podem ser extremamente úteis em certos ambientes, principalmente para micros posicionamentos. Estes ambientes específicos podem ser por exemplo qualquer eletrônico como um leitor de disco rígido que necessite de um posicionamento específico

Os MEMs estão evoluindo como uma nova tecnologia desde a década passada e continuarão sua evolução como uma tecnologia independente no futuro, enquanto suas extensões tecnológicas migrarão para outras áreas.

A estratégia de desenvolvimento dos MEMs tem se mostrado um sucesso, implementando novas formas para os MEMs, entretanto muita atenção está sendo voltada para novas formas de comunicação dos MEMs com o mundo externo.

Os MEMs podem desenvolver novas atribuições. Substituições de máquinas tradicionais eletromecânicas podem não estar no foco do desenvolvimento dos MEMs.

O desenvolvimento dos MEMs vai continuar muito próximo ao desenvolvimento da produção de CI's.

4 - MICRO PINÇAS

4.1 - Desenvolvimento

O desenvolvimento e a fabricação de micro pinças tem encontrado boas oportunidades de crescimento principalmente pela requisição de outra áreas como a medicina e a biologia.

Isto ocorre porque é exigido cada vez mais uma maior precisão na manipulação de células. Antes da advento das micro pinças os pesquisadores adotavam métodos como a utilização de alfinetes bem finos ou ainda equipamentos que diminuía a amplitude dos movimentos e esses métodos traziam muitas perdas para o pesquisador, isto é, para efetuar um procedimento, várias tentativas deveriam ser realizadas para obter um sucesso, com a introdução das primeiras micro pinças a taxa de perdas caíram.

Também com a introdução das micro pinças, novos procedimentos puderam ser realizados, procedimentos estes que antes não eram realizados pela total falta de condição de manipulação. Como por exemplo as técnicas de clonagem, onde se deve inserir um núcleo em uma célula mãe, além da técnica de transgênico onde se insere DNA em uma célula zigoto. Sendo assim podemos concluir que existe ainda um amplo mercado de micro pinças, tendo em vista que as pesquisas com clonagens, manipulação de genes diversos, desde animais até de bactérias causadores de doenças em pessoas e plantas, tudo isso requer a fabricação de novas e diferentes tipos de micro pinças. Abaixo temos alguns tipos de micropinças e também podemos observar o seu tamanho em relação à mão do pesquisador.

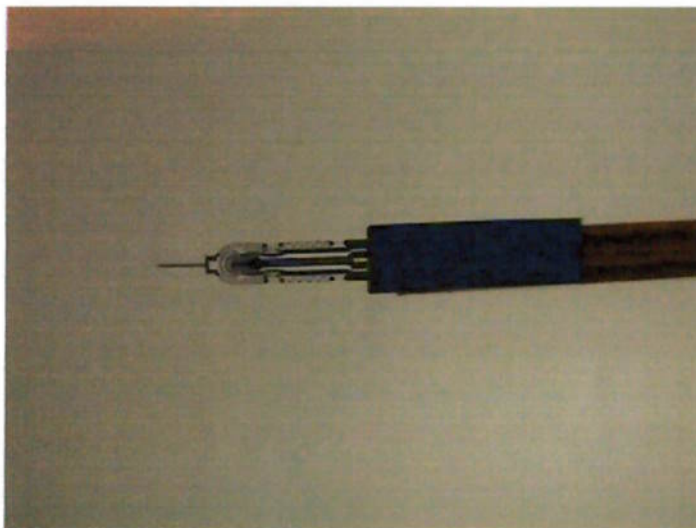


Fig. 8 Tipos de Micro Pinças

4.2 - Manipulação de elementos biológicos

Apesar das micro pinças terem sido idealizadas para a manipulação de pequenos objetos mecânicos, algumas manipulações biológicas podem ser feitas. Desde pequenos insetos, plantas, células animais em soluções.

A manipulação de elementos biológicos é o caminho para novos desenvolvimentos e criação de novas aplicações para esta tecnologia. Com o micro posicionamento, é possível fazer fertilizações *in vitro* e micro cirurgias em células.

Pela extrema fragilidade dos elementos biológicos, sua manipulação implica em diferentes aproximações e diferentes técnicas de manipulação. Em particular, micros manipulações para aplicações biológicas devem:

- trabalhar em soluções líquidas e ambientes esterilizados.
- Controlar precisamente a força de agarre para evitar destruição do material biológico.

Ser pequeno, e ter tamanho compatível com os pequenos tamanhos das materiais biológicos.

Também com a introdução das micro pinças, novos procedimentos puderam ser realizados, procedimentos estes que antes não eram realizados pela total falta de condição de manipulação. Como por exemplo as técnicas de clonagem, onde se deve inserir um núcleo em uma célula mãe, além da técnica de transgênico onde se insere DNA em uma célula zigoto. Sendo assim podemos concluir que existe ainda um amplo mercado de micro pinças, tendo em vista que as pesquisas com clonagens, manipulação de genes diversos, desde animais até de bactérias causadores de doenças em pessoas e plantas, tudo isso requer a fabricação de novas e diferentes tipos de micro pinças.

4.3 – Característica de flexibilidade e atuadores da pinça

Qualquer pinça sempre tem a função de manipular algo. Para que isso seja possível, a pinça deve ser montada de forma que tenha duas partes móveis entre si. Nas pinças que conhecemos este movimento é adquirido construindo as pinças em forma de alicate, isto conduz à adoção de um ponto de junção com um vínculo.

Quando vamos construir micro pinças a construção do vínculo se torna um problema, pois a pinça já tem sua construção pequena e seu vínculo deve Ter uma dimensão reduzida, sem contar com outros problemas como atrito e montagem dessa junção.

Este problema foi superado com a adoção de materiais flexíveis. Esta técnica faz com que toda pinça seja constituída em um único módulo, sem a necessidade de junções. Porém a necessidade de duas partes móveis continua e este problema foi contornado graças aos materiais flexíveis pois sua flexibilidade garante essa

mobilidade necessária para a pinça. Esta flexibilidade também é útil para a ampliação de forças ou deslocamentos. Abaixo temos um esquema ilustrativo dos materiais flexíveis e um gráfico sobre coeficiente de ampliação.

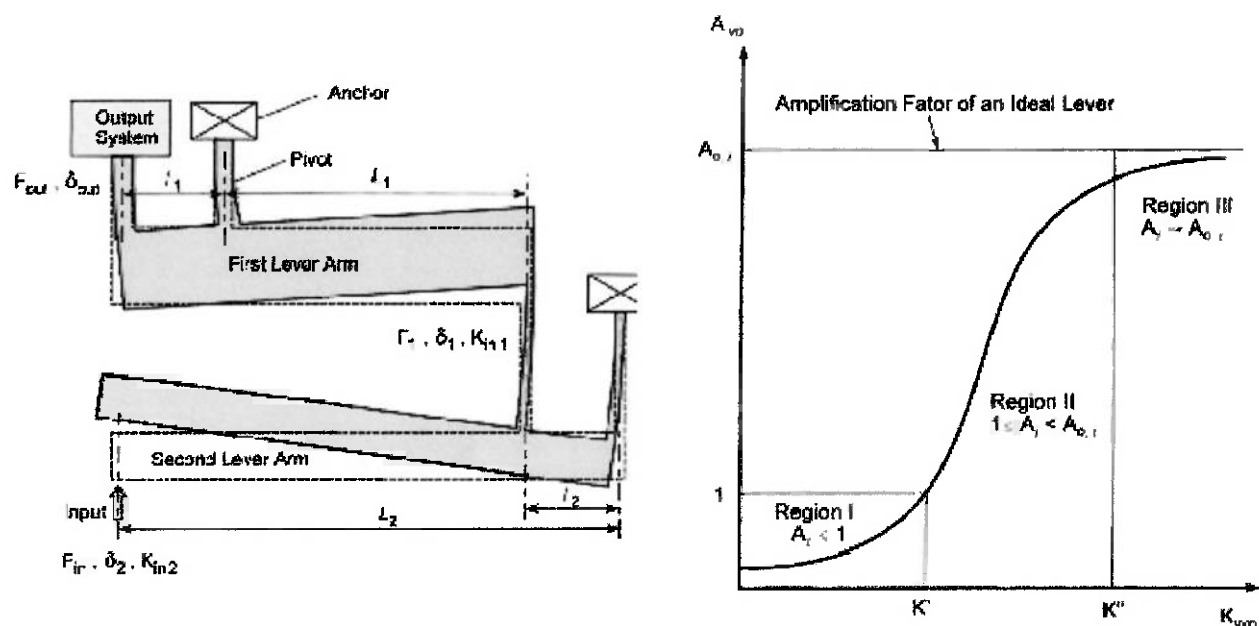


Fig. 9 Materiais Flexíveis

Uma das formas de calcular a geometria de um material flexível é através da técnica descrita abaixo. Esta técnica foi inicialmente desenvolvida na Alemanha, porém ela foi muito difundida e mais explorada na França.

Abaixo temos as simbologias utilizadas do método, um símbolo para as regiões flexíveis, e o outro símbolo para as regiões rígidas.

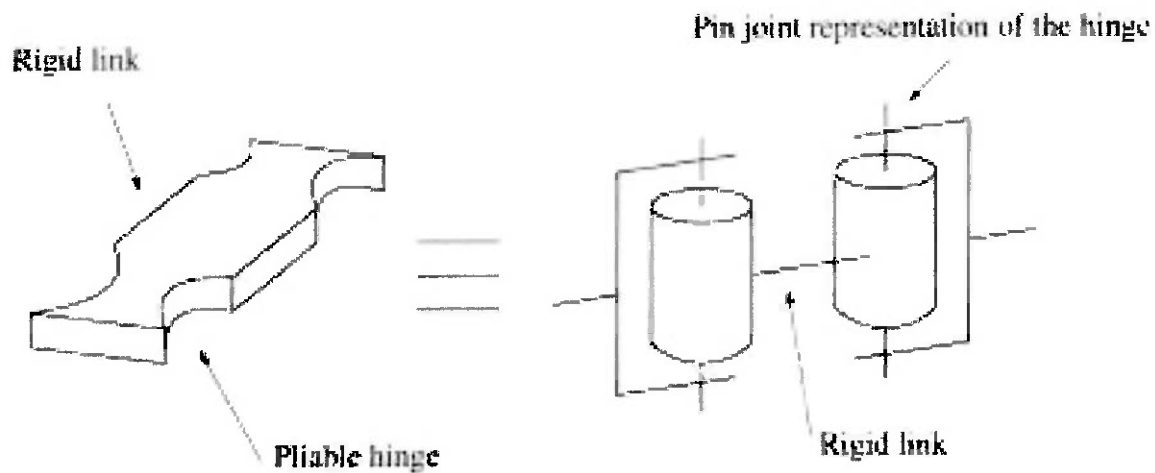


Fig.10 Simbologia no estudo de materiais flexíveis

Na figura abaixo temos o esquema cinético atuado, por exemplo, por um sistema Piezoelétrico.

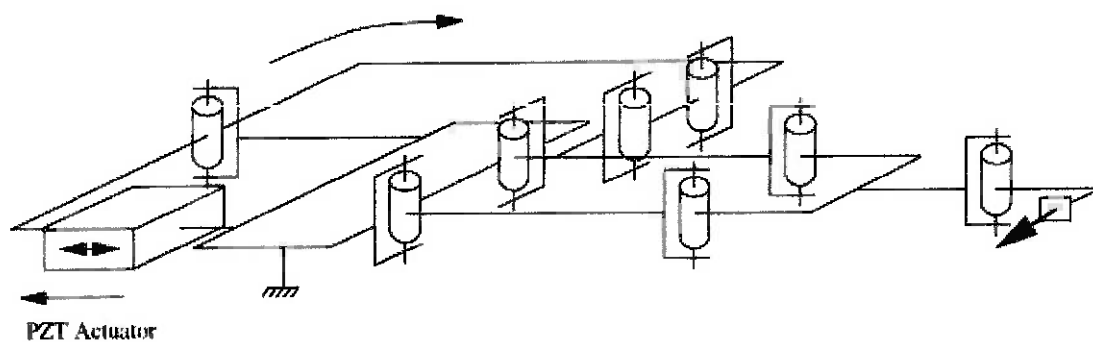


Fig. 11 Esquema para estudo de materiais flexíveis

Porém alguns preceitos devem ser seguidos para a utilização deste método:

- O cristal piezelétrico pode ser substituído por um SMA atuador, que provocaria o deslocamento necessário.
- Devem ser desenhados junto à pinça para uma melhor proteção das dobras e um fácil empacotamento no final da operação

- A superfície da pinça deve ser mantida em 2cm^2 mas sua espessura deve estar numa faixa de $100\text{ }\mu\text{m}$ - 1 mm para promover a atuação
- A abertura entre as garras da pinça deve estar próximo à $400\text{ }\mu\text{m}$

No assunto atuadores, além do cristal piezelétrico dito acima, podemos utilizar outras formas de atuação, como por exemplo o efeito de capacitância, onde coloca-se duas placas metálicas entre os extremos a serem atuados e colocando uma carga nessas placas, existe uma força de atração entre as mesmas deslocando o conjunto. Outra forma é utilizando o efeito de dilatação térmica, passando uma corrente por um material metálico, existe um aquecimento do mesmo e consequentemente uma dilatação. Esta dilatação pode ser utilizada na composição do movimento do nosso conjunto, esta técnica é conhecida como ETC (electro-thermal-compliant).

A técnica de ETC tem como vantagem:

- completa integração do mecanismo e a atuação.
- mínimo número de apoios e contatos para prover ddp.
- grande variedade de movimentos podem ser conseguidos com um mesmo desenho, apoios pontos de ddp, e ddp's.
- fácil fabricação em micro-, meso-, e macro- escalas e compatível com as técnicas normalmente utilizadas em micro máquinas.
- área para otimização e sistematização de design.

Na próxima figura podemos observar um desenho esquemático do funcionamento da técnica ETC descrita acima.

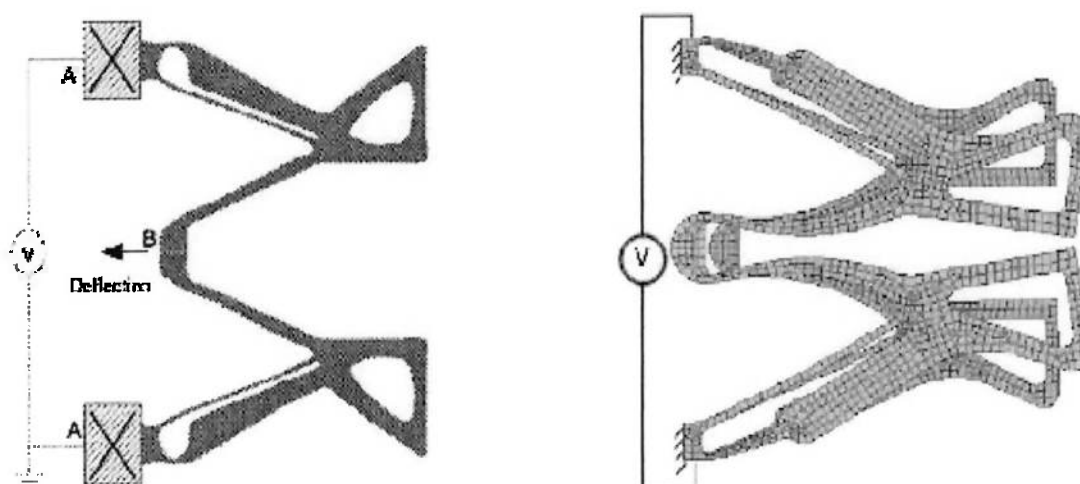


Fig. 12 Acionamentos por ETC

Abaixo temos uma foto de um MEMs que se utiliza dos acionamentos por ETC para sua movimentação

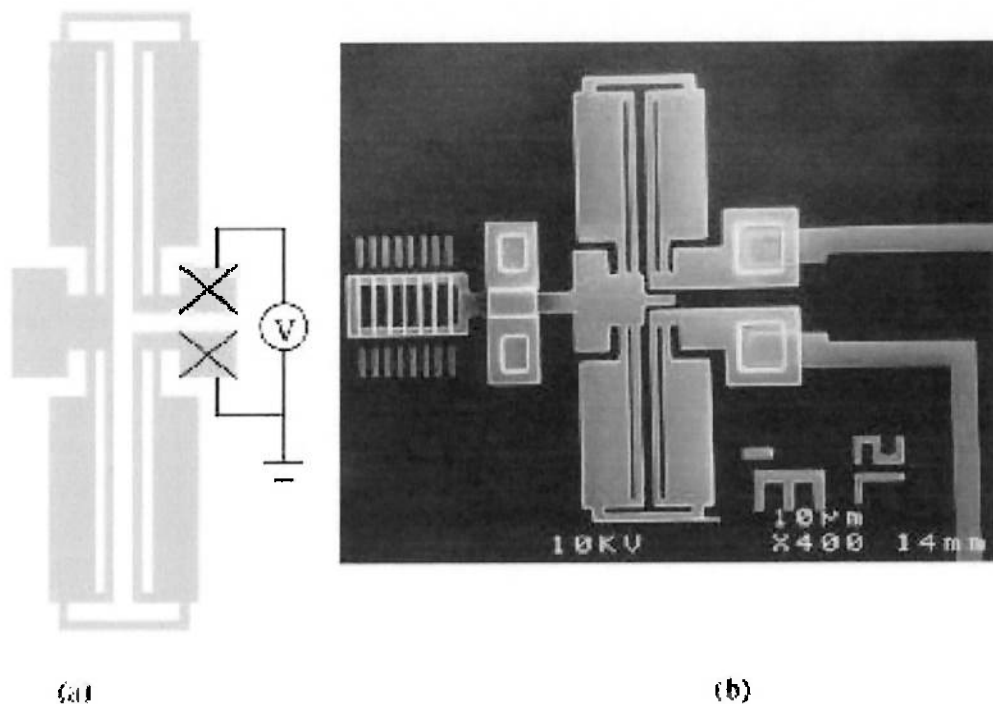


Fig. 13 MEM utilizando acionamentos por ETC

4.4 – Fabricação de micro pinças por LIGA

O projeto de uma micro pinça é igual ao projeto de um braço de robô do mundo macro, apenas esse pode ser visto com algumas diferenças, como por exemplo a cinética da pinça e as forças necessária para pegar firmemente os objetos.

Para minimizar o tamanho da pinça, a estrutura tem que ser fabricada em uma única peça de materiais flexíveis. A máxima rotação relativa entre dois segmentos é:

$$\Delta\theta = 2(L/h)(\sigma_{\max}/E)$$

onde:

L tamanho do segmento

σ tensão interna

E resistência do material

Assim para obter uma rotação efetiva, deve-se maximizar a relação L/h.

A seleção do princípio de atuação do micro atuador é muito importante e crítico isto porque também a aquisição desse micro atuadores é difícil.

As primeiras versões de micro atuadores foram desenvolvidos para permitirem alguns testes de conceito de design. Eles também permitiram a validação da aplicabilidade do princípio de atuação piezelétrico.

No nosso projeto, iremos utilizar o processo de fabricação LIGA, este processo já foi explorado em situações anteriores ao relatório assim vamos no deter a alguns pontos característicos.

O processo de fabricação por LIGA envolve alguns passos. Primeiramente um material polimérico que muda sua taxa de dissolução no solvente sob uma radiação de alta energia é exposto através de uma máscara de cromo à intensos raios paralelos de Raios X. Depois de desenvolvida, a resistente estrutura é utilizada como molde para o processo de electroforming onde o metal é depositado em um substrato condutor elétrico. Desta maneira uma estrutura metálica complementar é obtida e pode ser tanto utilizada como estrutura final, como uma micro ferramenta para reprodução em massa.

A atuação por piezelétrico foi selecionada pelo seu alto grau de precisão e confiabilidade na produção de dispositivos e também pela sua alta eficiência. O inconveniente da utilização de atuadores piezelétricos é o seu limitado poder de expansão. Para superar este problema, o mecanismo da micro pinças têm em seu projeto, um amplificador de movimentos, fazendo com que no total, o deslocamento da micro pinça, seja de 100-200 μm , o suficiente para agarrar pequenos objetos e objetos biológicos. Abaixo temos um exemplo do mecanismo de amplificação.

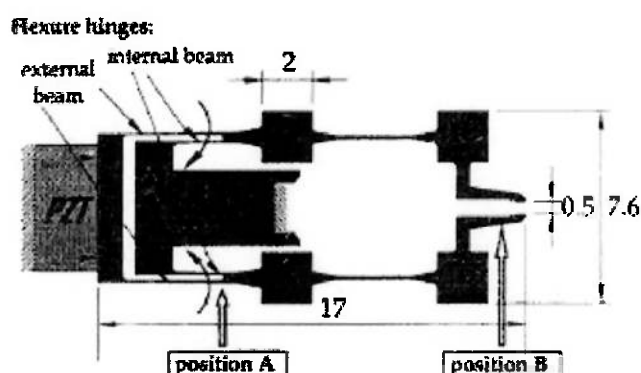


Fig. 14 Pinça acionado por material piezoelétrico.

O princípio de trabalho da micro pinça é o seguinte, quando o atuador piezoelétrico é acionado, os apoios da pinça na cerâmica atuam como dobradiças flexíveis, o efeito final é uma rotação e translação de cada pinça, fazendo-as se aproximarem. No exemplo da micro pinça acima, a largura do feixe está dentro de 25 e 100 μm , o comprimento é de 4mm.

Para reduzir os efeitos de adesão durante a execução dos movimentos, uma geometria em "V" foi utilizada nas partes internas das garras da micro pinça.

5 – MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

5.1 - Introdução ao Piezo

A palavra Piezo vem do Grego pressão e sua característica foi descoberta por Jacques e Pierre Curie que observaram que quando se aplicava uma pressão no cristal de quartzo, este produzia uma descarga elétrica. Eles chamaram este fenômeno de Piezo.

Desde então, os materiais piezos foram utilizados para transformar energia elétrica em mecânica, e mecânica em elétrica. Isto para deslocamentos em escala nanométrica.

Vantagens da utilização de materiais piezelétricos:

- *Resolução ilimitada:* Com um atuador piezelétrico pode-se produzir pequenos movimentos que podem chegar a uma precisão de nanômetros. Pequenas mudanças de voltagem criam suaves movimentos . Ele também não é vulnerável a fricções.
- *Gerador de grande força:* PZT podem gerar forças de até 10.000N. Algumas unidades piezelétricas podem suportar carregamentos de toneladas, e ainda movimentá-las até 100 μm com precisão de nanômetros.
- *Rápida resposta:* Os cristais piezelétricos tem a vantagem de ter uma resposta rápida ao sinal. Alguns têm uma taxa de aceleração de 10.000 g's.
- *Campos Magnéticos:* Os cristais Piezo são influenciados, por campos elétricos. Campos magnéticos não influenciam e também não são criados pelos PZTs. Sendo assim são ideais para utilização em locais que não se toleram campos magnéticos.

- *Baixo consumo de energia:* O efeito piezelétrico transforma a energia elétrica diretamente em movimento, apenas absorvendo energia durante o movimento. Em operação estática, mesmo sob carregamentos, não consumo de energia.
- *Vácuo e salas esterilizadas:* Os piezelétricos são cristais que não necessitam de lubrificação, ou mesmo trabalham com atritos. Sendo assim são materiais disponíveis para serem utilizados em salas esterilizadas e desprovidas de pó. Além de poderem trabalhar em regiões com grande vácuo.
- *Temperatura de Crionigação:* Os cristais podem trabalhar próximo a 0 Kelvin com pequenas mudanças de sua especificação.

5.2 - Aplicação de materiais piezelétricos:

- Ótica e Metrologia:
- Estabilização de imagem
- Interferômetros
- Alinhamento de fibras óticas
- Simulador de vibrações
- Direcionador de cabeçote de drives (HD)
- Cancelador de vibrações
- Microeletrônica
- Mecânica de precisão

Piezos de alta e baixa tensão.

Existem basicamente dois tipos de Piezos, os de baixa e alta tensão. E entre estes cristais, o material mais popular é o Lead Zirconate Titane (PZT). A maioria dos atuadores cerâmicos são de PZT.

Dentro desses cristais, o máximo que o cristal PZT pode suportar é aproximadamente 2KV/mm.

Os cristais de alta tensão são construídos de 0,5 a 1 mm de espessura enquanto os cristais de baixa tensão são construídos com um espessura de 20 a 200 μm .

Ambos os cristais podem ser utilizados em várias aplicações. Os de baixa tensão são normalmente utilizados em eletrônicos e os de alta tensão são utilizados em locais de alta temperatura. Durante a construção os cristais podem ser construídos para suportarem grandes carregamentos.

5.3 -Considerações Mecânicas

Em uma primeira aproximação, os materiais Piezos podem ser considerados como sistemas mola/massas. A constante elástica da cerâmica depende do módulo de Young, Aproximadamente 25% do aço.

As cerâmicas PZT podem suportar grandes carregamentos de várias toneladas, e mesmo com carregamento total, os PZTs não perdem a referência e não se danificam desde que o carregamento não ultrapasse o carregamento máximo.

O carregamento suportável e a geração de força devem ser distinguidos no PZT. A máxima força que um cristal pode suportar é determinado pelo produto de sua rigidez e seu curso total. Um atuador Piezo empurrando contra uma mola carregada, não irá alongar seu comprimento máximo. Com o aumento da constante de elasticidade da mola, o alongamento total do cristal irá também diminuir.

Porém, apesar da cerâmica suportar grandes carregamentos, os cristais são muitos sensíveis às forças de cisalhamento.

5.4 - Geração de Força

A Geração de força é a aplicação na maioria dos casos. Atuadores do piezo são usados para produzir o deslocamento. A geração da força é acoplada sempre com uma redução no deslocamento. A força máxima (força obstruída) que um atuador do piezo pode gerar depende de sua rigidez e de seu deslocamento máximo.

$$F_{\max} = k_T * kL_0$$

onde

kL_0 = deslocamento nominal max. sem força ou restraint externo [m]

k_T = rigidez do atuador de PZT [N/m]

Em aplicações reais, a constante da mola da carga pode ser maior ou menor do que a constante da mola de PZT. A $F_{\max \text{ eff}}$ gerada pelo PZT é:

$$F_{\max \text{ eff}} = k_T * kL_0 (1 - k_T / (k_T + k_S))$$

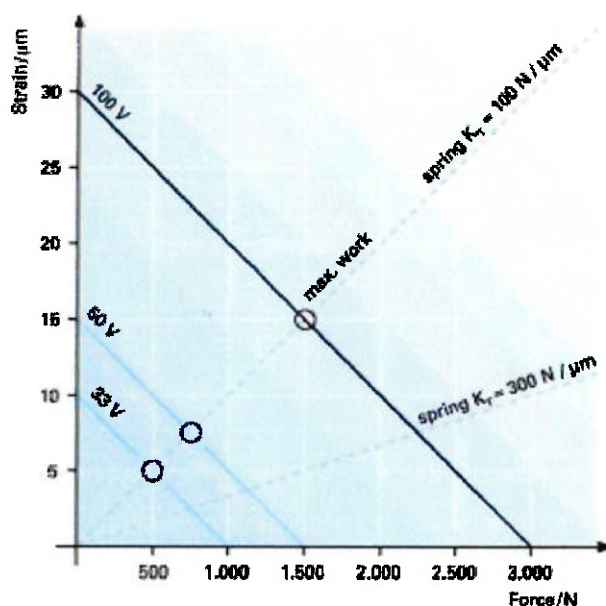
onde

kL_0 = deslocamento (sem força ou restraint externo) [m]

k_T = de atuador de PZT rigidez [N/m]

k_S = rigidez da mola [N/m].

Abaixo temos um gráfico demonstrando isto.



5.5 - Quesitos eléctricos para operação dos piezos

Quando operado muito abaixo da frequência de ressonância, um PZT comporta-se como um capacitor onde o deslocamento é proporcional à carga. Os atuadores de pilha de PZT são montados com finas camadas de material cerâmico electroativo conectados em paralelo. Projeto de um atuador da pilha de PZT pode ser estimado da seguinte forma:

$$C = n \cdot k_0 \cdot k_{33} \cdot A / d_s$$

Onde n = número das camadas

k_0 = constante dieléctrica no vácuo [As/Vm]

k_{33} = constante dieléctrica relativa [sem dimensões]

A = área de superfície do eletrodo [m²]

ds = distância entre os eletrodos individuais (camada-espessura) [m]

A equação acima mostra que para um comprimento dado l_0 e dada a capacidade do atuador, a espessura do disco d_0 é uma função quadrática da relação d_0/d_1 onde $d_1 < d_0$. Consequentemente, a capacidade de um atuador do piezo construído de 100 camadas grossas do μm é 100 vezes a capacidade de um atuador com camadas grossas de 1 milímetro se os dois atuadores estiverem ao mesmo comprimento.

A operação de estática, quando carregada eletricamente, a energia $E = 1/2 CU^2$ é armazenada em no atuador piezo. Cada mudança na carga (e conseqüentemente no deslocamento) do PZT requer uma corrente i :

$$i = dQ/dt = C * (dU/dt)$$

Relacionamento da corrente e da tensão para o atuador do piezo.

Onde:

i = corrente [A]

Q = carga [coulomb; Como]

C = capacidade [farad; As/V]

U = tensão [V]

t = tempo [s]

Para a operação estática somente a corrente de alongamento tem que ser fornecida. A resistência interna elevada reduz correntes da escala de microampères. Mesmo quando desconectado da fonte elétrica, o atuador carregado não fará um movimento repentino, o retorno a sua dimensão descarregado, no entanto, será muito lento (> 1 hora). Para mudanças lentas da posição a corrente requerida é muito baixa.

O exemplo seria um amplificador com uma corrente de saída de μA 20 expandiria inteiramente um atuador de 20 nF em um segundo.

Efeitos da temperatura nos Piezos

A estabilidade térmica linear para PZT é melhor do que a maioria outros de materiais (aço, alumínio etc.). Esta expansão é caracterizada pelo coeficiente da expansão térmica que especifica a mudança relativa pela variação de unidade na temperatura. Abaixo temos um gráfico representando esta pequena variação.

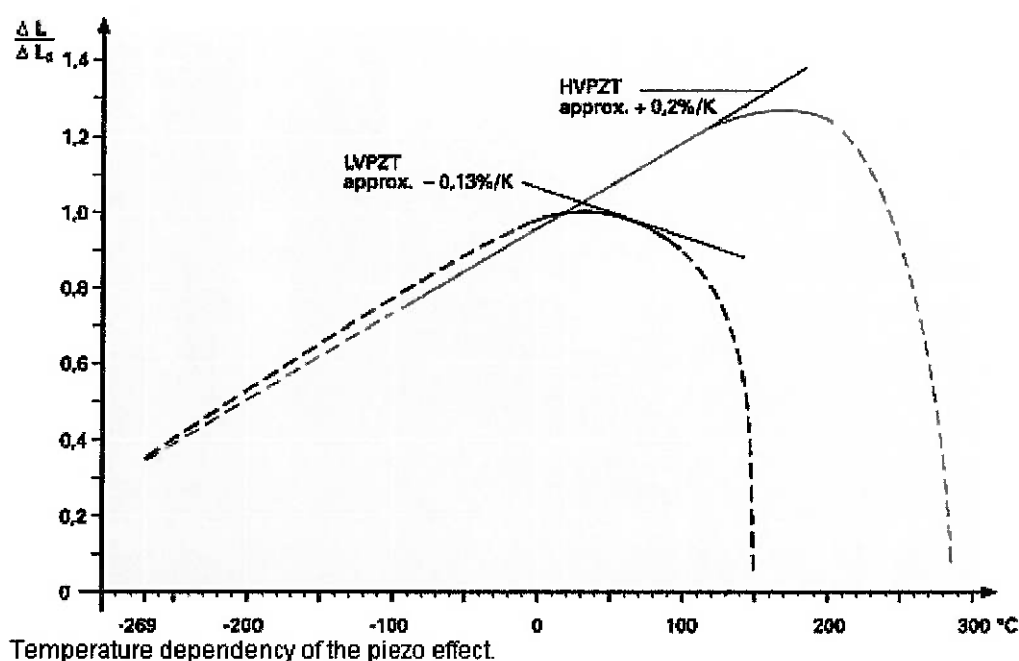


Fig. 6 - Para a nossa aplicação, a cerâmica estará sempre próxima à temperatura ambiente, podendo assim considerar desprezíveis as influências da variação por temperatura.

5.6 - Tempo de vida dos PZTs

O tempo de vida de um PZT não é limitado pelo desgaste ou pela frequência de utilização. Os testes mostraram que o PZTs podem executar bilhões de ciclos sem perda do desempenho se operado sob circunstâncias apropriadas.

Geralmente, como com capacitores, a vida de um PZT é uma função da tensão aplicada. A tensão média deve ser mantida tão baixa quanto possível. Para um bom e duradouro funcionamento do PZT, a cerâmica não deve ser calculada sempre para alongar o seu comprimento máximo. Isto é, quando se obtém o comprimento que se quer alongar, o cálculo do cristal deve ser de modo que este comprimento seja menor que o seu comprimento máximo de expansão.

6- OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A Otimização Topológica foi realizada no programa feito pelo mestrando Cícero da Escola Politécnica. Várias estruturas foram definidas de modo que houvesse um maior deslocamento final a partir do deslocamento inicial. No programa é aceito como entradas desde as forças (atuação), o tipo do material (material em que será fabricado as estruturas, importante para simulação da deformação do material), locais onde serão colocados as ancoras, estes são os pontos de fixação da estrutura, além do volume que deverá ser empregado na peça, esta parte defini a espessura das paredes da estrutura. Toda a parte de programação e otimização das estruturas foi realizado no Trabalho de Formatura da aluna de graduação Thaís Felipelli, formada na mesma turma que a minha.

7- FABRICAÇÃO DAS MICRO PINÇAS

A fabricação dos protótipos foi realizada pelo processo de litografia. Relacionado abaixo estão os passos de fabricação.

- Fotolito
- Preparação da placa de cobre
- Aplicação do primer
- Aplicação do Foto resiste;
- Banho de UV;
- Banho na solução reveladora
- Corrosão
- Preparação para os testes

7.1 – Fotolito.

Após a simulação dos modelos ocorrido no Trabalho de Formatura da Thais Fellipelli (2002) os desenhos foram importados para o Mechanical Desktop para preparação para a montagem do fotolito. Alguns abas e os apoios das pinças foram inseridas neste programa, alguns arredondamentos também foram editados e as ancoras das cerâmicas piezoelétricas e das manuais foram inseridas também.

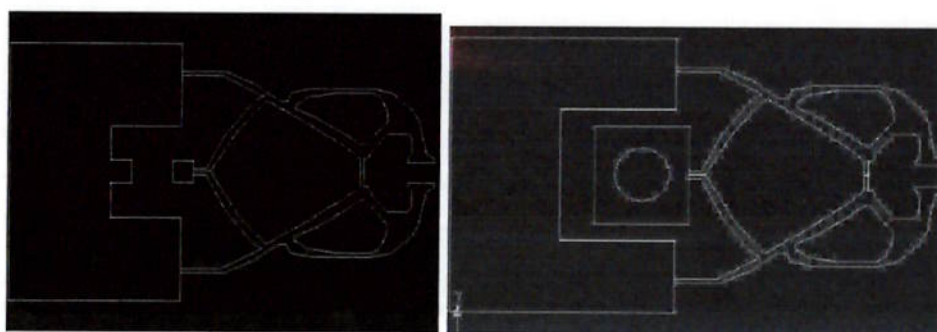


Fig. 15 - Pinças após a edição no Mechanical Desktop

Após esta edição, os desenhos foram exportados para o Corel Draw, onde algumas definições de cores foram empregadas para garantir um fotolito em bom estado. Entre estas modificações, a principal é a formação do preto, que deve ser formado pelo padrão CMYK e não pelo RGB, padrão da maioria das formações de cores. No arquivo do Corel foi unido todas as pinças em uma folha A4 e só então enviado para a confecção do fotolito.

O sulco a ser corroído deve ter no mínimo 0,1mm. Restrição devido ao processo de corrosão ser isotrópico. Depende da espessura da chapa de cobre. Atenção deve ser dada também à área a ser corroída pois grandes áreas demandam grande tempo dentro da solução, porém as pequenas paredes das pinças serão corroídas por baixo do fotoresiste se elas permanecerem muito tempo dentro da solução. A resposta para este problema é restringir a área de corrosão apenas próxima à pinça e longos trechos sejam preenchidos com foto resiste mas que fiquem de uma forma que após a corrosão estes se soltem da pinça.

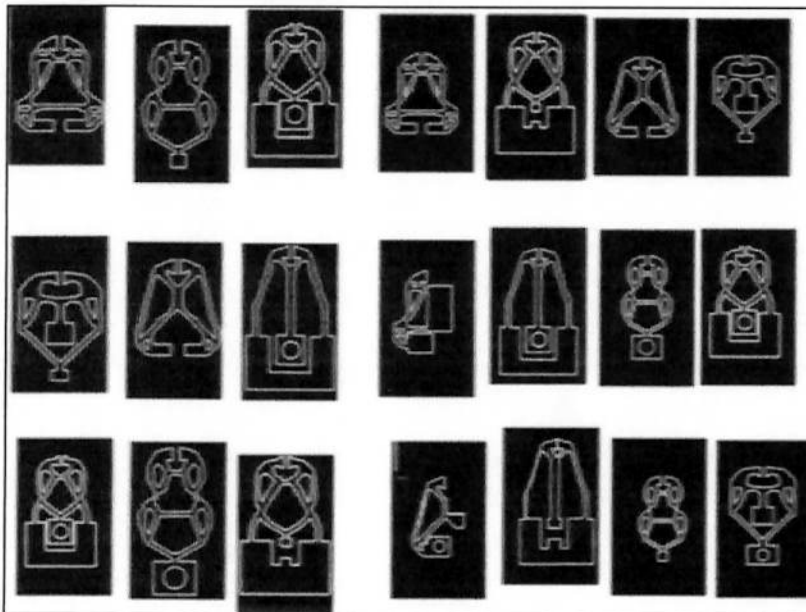


Fig. 16 - Arquivo final para a confecção do fotolito

7.2 – Preparação da Placa de Cobre.

Para a total aderência do Foto resiste a placa de cobre deve estar limpa e desprovida de sujair, gosrdura ou oxido. Antes a placa é cortada no tamanho adequado, no caso, peças de 50x30 mm.

Para esta limpeza é primeiramente feita com detergente neutro e logo em seguida é utilizado uma solução ácida que remove a gordura e o óxido.

Neste momento as placas estão prontas para a litografia.

7.3 – Aplicação do primer.

O primer tem a função de aumentar a adesão do fotoresiste ao cobre, sem ele o foto resiste não ficaria aderido no cobre. Deve-se utilizar o spin para uma homogenização do primer com uma espessura de 1 micra.

7.4 – Aplicação do fotoresiste.

Da mesma maneira que foi adicionado o primer, o foto resiste deverá ser adicionado na superfície do cobre. O foto resiste deverá ter também uma espessura de 1 micra.

Foi utilizado um foto resiste positivo, assim nos locais onde estão claros no fotolito, serão os locais a serem atacados. A utilização de um foto resiste negativo traria como consequência a mudança de cor nos fotolitos apenas.

7.5 – Banho de UV:

Após a aplicação do foto resiste a placa de cobre está pronta para a aplicação a aplicação do banho de ultra violeta. Todas estas operações são feitas dentro de uma sala limpa e com iluminação especial para não revelar o foto resiste. Todo cuidado deve ser tomado com a placa de cobre para que o foto resiste não saia através de algum risco ou pelo dobramento da placa pois o foto resiste é muito quebradiço.

Após corta cada pinça do fotolito, um desenho de pinça é colocado sobre uma placa de cobre e é aplicado uma banho de UV. Desta maneira, apenas os locais onde o fotolito está transparente são atingidos pelos raios UV. Este procedimento é realizado com todos os desenhos do fotolito.

7.6 - Banho na solução reveladora:

Nesta etapa as placas de cobre já exposta ao UV são mergulhadas em uma solução reveladora. Quando elas saem no banho já é possível perceber o desenho da pinça no cobre e algum possível erro. Abaixo temos uma foto desta etapa.



Fig. 17 – Placa de cobre após o banho em solução reveladora

Esta etapa deve ser feito com todas as pinças.

7.7 – Corrosão das placas de cobre:

As pinças ainda não estão prontas para corrosão pois a parte posterior e as laterais das placas estão desprotegidas do ataque corrosivo, o que poderia destruir as amostras. No caso foi utilizado esmalte comum de unha para proteger a traseira das pinças e ainda colado uma fita adesiva para que a pinça não se solte do substrato e se perca na solução.

Abaixo temos uma foto da parte posterior da pinça preparada para a corrosão.



Fig.18 - Pinça preparada para a corrosão

Após todas as pinças estarem preparadas, elas são inseridas em uma solução de percloroeto de ferro, um sal com característica ácida. Este sal vai corroer as partes onde não existe o fotoresiste que foi retirado pelos raios UV e a solução reveladora.

As placas devem ficar em uma solução em movimento e temperatura de aproximadamente 40°C. A permanência dentro da solução varia muito da quantidade e espessura a ser corroída. No caso as pinças ficaram no banho de 10 à 20 minutos na solução.

Abaixo temos uma foto da placa após a corrosão.

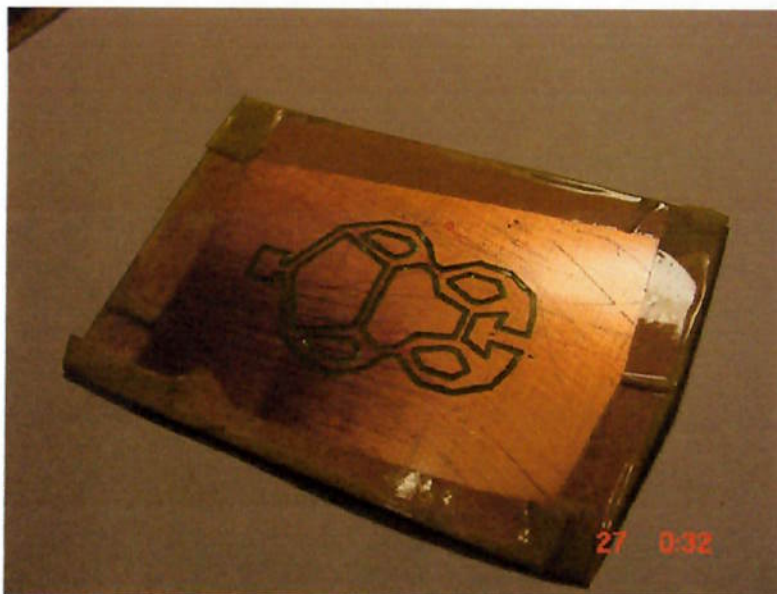


Fig. 19 – Placa de cobre após corrosão.

Podemos observar na foto acima os sulcos criados pela corrosão. Os sulcos estão verdes porque o esmalte utilizado era verde, é recomendável utilizar um esmalte colorido para observar quando a corrosão está terminando, mas para verificar o final da corrosão, deve ser verificado no microscópio se a corrosão foi completa.

Para livrar a estrutura da fita adesiva e do esmalte é necessário um banho de acetona. Neste momento a estrutura está livre da fita e esmalte como na figura abaixo.



Fig.20 – Peça solta do adesivo

Neste ponto do projeto são ocorrem as maiores perdas de estruturas, algumas por um excesso de corrosão, perdendo-se algumas partes importantes e inutilizando-as ou ainda mesmo na retirada da fita adesiva.

7.8 – Preparação para testes:

Para que pudéssemos realizar os testes, foi necessário fixar as pinças em um substrato. No caso utilizamos pedaços de acrílico transparente para ter total visualização da estrutura. Abaixo temos uma referência.



Fig.20 - Pinça em seu substrato

A fixação da pinça obedeceu a simulação feita, sendo apenas em algumas partes, permitindo assim a total movimentação da parte flexível da pinça.

As estruturas foram fixadas com uma mistura de 20% de breu e 80% de cera de abelha. A cera de abelha tem a propriedade de ser uma cola extremamente rígida, porém a cera de abelha tem o problema do seu ponto de fusão ser baixo, perto de 50°C.

Assim para elevar o seu ponto de fusão adicionamos o breu. Na proporção feita, a mistura fica com um ponto de fusão de aproximadamente 80°C.

Abaixo temos uma figura com a utilização da mistura.



Fig. 21 – Utilização da cola nas estruturas.

As estruturas manuais estão prontas, porém as acionadas pelo material piezoelétrico ainda precisam ter instalado a cerâmica.

Na cerâmica, um dos pólos foi conectado por um fio soldado diretamente, porém o outro contato é feito pela estrutura ou por uma anexo na pinça. É utilizado tinta com solução de prata para efetuar a ligação com sucesso de condutividade elétrica. Abaixo temos um exemplo da utilização da solução de prata.

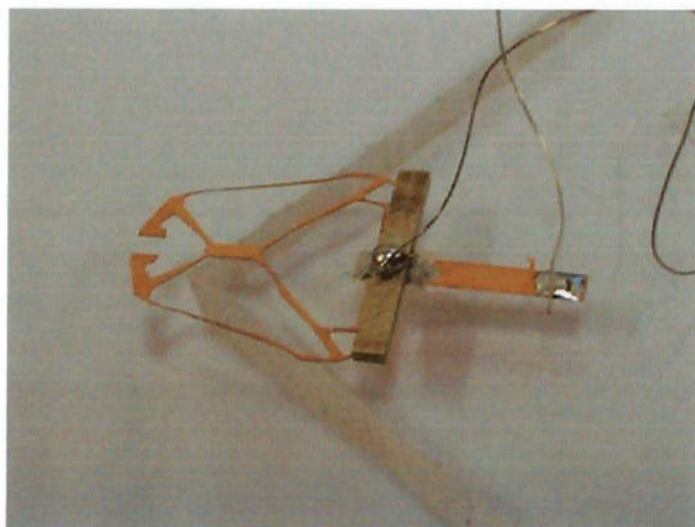


Fig. 22 – Pinça com piezoeletrico

Neste momento as pinças estão prontas para os testes.

8 – TESTES

As pinças tiveram uma deformação que ilustraremos abaixo junto com as fotos das devidas pinças.

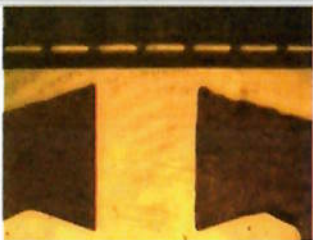


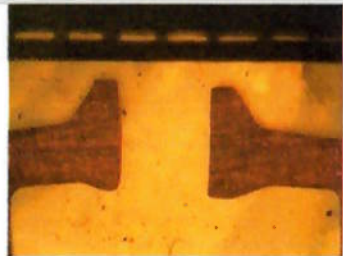







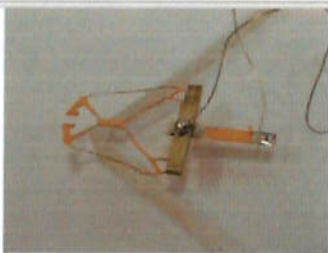
ANTES	DEPOIS	PINÇA	DEFORMAÇÃO
			1 mm
			1 mm
			

Fig. 24 – Pinças manuais

As pinças atuadas por cerâmicas piezoelétricos tiveram uma deformação pequena. Esta deformação foi observada através do microscópio do Laboratório de Micro Circuitos com um aumento de 60X, porém esta deformação não foi possível de ser medida. Abaixo estão as fotos com o piezoelétrico acionado, foi utilizado uma tensão de 800V. Observamos que existe uma diferença no foco das duas fotos, isto ocorre porque além do movimento esperado da pinça, houve uma movimentação da estrutura para fora do plano, este foi o motivo da diferença de foco.

ANTES	DEPOIS	PINÇA	VOLTAGEM
			800V

Abaixo temos um gráfico comparando a voltagem aplicada com o deslocamento na parte de deslocamento máximo da pinça.

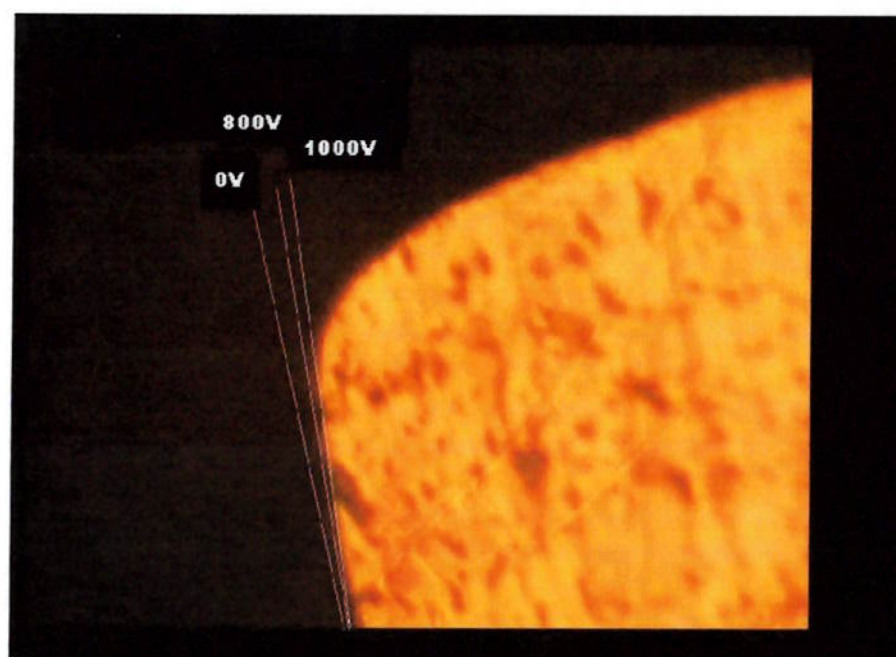


Fig 25 – Gráfico de deformação para cada voltagem aplicada

9 – LISTA DE REFERÊNCIAS

GREGER THORNELL, MATS BEXELL, JAN-AKE SCHWEITZ, STEFAN JOHANSSON. Design and fabrication of a gripping tool for micromanipulation, Uppsala University, Materials Science, Box 534, S-751 21 Uppsala, Sweden

THOMAS SCHNELLE, TORSTEN MULLER, ROLF HAGEDORN, ANDREAS VOIGT, GUNTER FURH, Single micro electrode dielectrophoretic tweezers for manipulation of suspended cells and particles. Humboldt-University zu Berlin, Institut für Biologie, D – 10115 Berlin, Germany. Received 19 November 1998; received in revised 13 January 1999; accepted 13 April 1999

MATERIALS AND PROCESSES FOR MICROSYSTEMS; D.J. Nagel. Naval Research Laboratory. Code 6600, 4555 Overlook Avenue S.W. Washington DC 20375-5345 USA

ABRAHAM P.LEE, DINO R. CIARLO, PETER A KRULEVITCH, STACY LEHEW, JIMMY TREVINO, M. ALLEN NORTHRUP. A practical microgripper by fine alignment, eutectic bonding and SMA actuation, Lawrence Livermore National (LLNL), Microtechnology Center, PO Box L-222 Livermore CA 94551 USA

S.BALLANDRAS, S.BASROUR, L.ROBERT, S.MEGTERT, P.BLIND M.ROUILLAY, P.BERNEDE, W.DANIAU; Microgrippers fabricated by LIGA technique, Institut des Microtechniques de France – Comté (IMFC) 32 avenue de l'Observatoire f – 25044 Besançon Cedex, France; LURE Univ. Paris XI, bat 209D f – 91405 Orsay Cedex France, CETEHOR, 39 Avenue de l'Observatoire F – 25000 Besançon, France

J.L. LECLERCQ, R.P. RIBAS, J.M. KARAM, P. VIKTOROVITCH, III-V micromachined devices for microsystems, LEAME Ecole Centrale de Lyon, UMR CNRS 5512, BP 163 F 69131, Ecully Cedex, France . TIMA CMP. 46 Avenue Félix Viallet, f38031 Grenoble Cedex, France

TIMOTHY MOULTON, G.K. ANANTHASURESH, Micromechanical devices with embedded electro-thermal-compliant actuation. Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Pennsylvania, 297 Towne Building 220 S. 33 Street, Philadelphia PA 19104-6315 USA

ROBERT M. HOCHMUTH, Micropipette aspiration of living cells. . Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Duke University, Durham NC 27708-0300 USA

PAUL E. KLADITIS, VICTOR M. BRIGHT Prototype microrobots for micro-positioning and micro-unmanned vehicles, . Department of Mechanical Engineering University of Colorado at Boulder, Boulder, CO 80309-0427 USA

WATER LANG Silicon microstructuring technology, IMIT, Institute for Micro and Information – Technology, Wilhen-Schikard Str 10 , 78052 Villingen-Schwenningen, Germany

PROF E. PARENTE RIBEIRO, J. A. SHEID BUDZINSHI, Acelerômetros, <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/ie99/trab2/joao/index.htm>, data: 24/04/2002-04-28

CHRIS KELLER Ph D MEMs Precisions Instruments <http://www.memspi.com/index.html> data: 22/04/2002

SANDIA NATIONAL LABORATORIES ,About MEMs, <http://mems.sandia.gov/scripts/index.asp> data 25/04/2002

MEMs EXCHANGE

<http://www.mems-exchange.org> data: 10/06/2002

VENTURE DEVELOPMENT CORPORATION

<http://www.vdc-copr.com> data: 11/06/2002

SEMI CONDUCTOR MAGAZINE




<http://www.semi.org> data 11/06/2002

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA,

<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/010170020909.html> data 18/10/2002

DARPA,

<http://www.darpa.mil/> data 18/10/2002

ANTES	DEPOIS	PINÇA	VOLTAGEM
			800V

Abaixo temos um gráfico comparando a voltagem aplicada com o deslocamento na parte de deslocamento máximo da pinça.

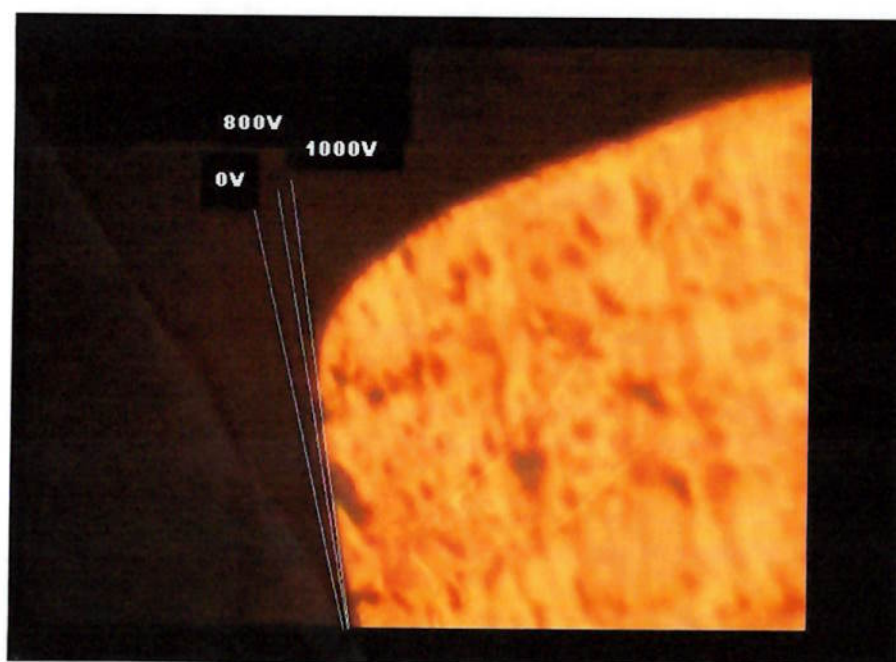


Fig 25 – Gráfico de deformação para cada voltagem aplicada