

CAIO VIRGÍLIO BUENO MAGANO

FABRÍCIO MIGUEL CUNHA

Nota final
9,3 (nove e tres)

Am

22/01/04

PROJETO DE UM ATUADOR PIEZELÉTRICO
FLEXTENSIONAL PARA A
MICROMANIPULAÇÃO DE OBJETOS

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como Projeto de Conclusão de Curso.

São Paulo

2003

CAIO VIRGÍLIO BUENO MAGANO
FABRÍCIO MIGUEL CUNHA

PROJETO DE UM ATUADOR PIEZELÉTRICO
FLEXTENSIONAL PARA A
MICROMANIPULAÇÃO DE OBJETOS

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como Projeto de Conclusão de Curso.

Área de Concentração:

Engenharia Mecatrônica e Sistemas
Mecânicos

Orientador:

Prof. Doutor Emílio Carlos Nelli Silva

São Paulo

2003

AGRADECIMENTOS

Existem muitas pessoas que tornaram esse trabalho possível. Em primeiro lugar gostaríamos de agradecer ao Prof. Dr. Emílio C. N. Silva pela sua orientação precisa, estimulante, que nos guiou neste projeto.

Agradecimento aos nossos companheiros da pós-graduação Ronny Calixto, por ter nos integrado a arte de realizar simulações em elementos finitos com piezelétricos e também pela otimização topológica; e Gilder Nader, por ter nos auxiliado de forma muito importante na fase de montagem do sistema.

Outro agradecimento muito importante ao colega Dr. Paulo Godoy pelo seu grande esforço em nos ajudar com a fase de testes do sistema e ao Prof. Dr. Francisco Javier Ramirez Fernandez pela concessão do Laboratório de Microeletrônica (LME) para realização de experimentos.

Agradecimentos também aos técnicos do laboratório de máquinas da eng. metalúrgica e aos técnicos do laboratório de máquinas da mecânica.

RESUMO

O presente trabalho descreve o projeto de um atuador piezelétrico flexensional para desempenhar atividades de micromanipulação de objetos. Utilizando o software de análise por elementos finitos Ansys™ e também algoritmos de otimização topológica concebeu-se uma estrutura flexensional que realiza essa tarefa. Configurações de montagem foram avaliadas para a obtenção de um desenho de fabricação dos componentes do projeto. Um protótipo foi então fabricado através da técnica de *Electro Discharge Machining* (EDM), testado e os resultados foram comparados com aqueles teóricos oriundos das simulações.

ABSTRACT

The present work describes the design of a flextensional piezoelectric actuator that should perform micromanipulation tasks. Using the software of finite-elements analysis Ansys™ and also algorithms of topology optimization, a flextensional structure was designed to fit this micromanipulation goal. Assembly configuration was evaluated for the attainment of a manufacture drawing of all parts of the system. A prototype was manufactured using Electro Discharge Machining technique (EDM), tested and both theoretical and real results were compared.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	I
LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	IV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MICROMANIPULAÇÃO DE OBJETOS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA	5
2. CONTEXTUALIZAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
3.1. MATERIAL PIEZELÉTRICO.....	11
3.2. EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DO PIEZELÉTRICO	13
3.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	15
4. ESPECIFICAÇÕES, SIMULAÇÕES E PROJETO	23
4.1. ESPECIFICAÇÕES.....	23
4.2. PROCEDIMENTOS PARA A MODELAGEM DO ATUADOR.....	23
4.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	26
4.4. PROCESSO DE FABRICAÇÃO EDM.....	34
5. FABRICAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO	37
5.1 PROJETO DE SISTEMAS AUXILIARES.....	37
5.2 FABRICAÇÃO DA MICRO-PINÇA.....	38
5.3 MONTAGEM DOS COMPONENTES	40
5.4 SISTEMA MONTADO.....	42
6. RESULTADOS	44
6.1. REALIZAÇÃO DO TESTES.....	44
6.2. DESLOCAMENTO MEDIDO.....	45
6.3. ANÁLISE.....	47
7. CONCLUSÃO	49
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Propriedades dos Materiais Definidos para a Simulação em Ansys.....	25
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de Micromanipulação Manual.	2
Figura 1.2 – Exemplo de Micromanipulação Semi-Automático.....	2
Figura 1.3 – Exemplo Esquemático de um Sistema de Micromanipulação Automático.	3
Figura 2.1 – Mecanismo Baseado na Teoria de Juntas e Molas (ANDO,1992).	7
Figura 2.2 – Sistema de Micromanipulação montado com microscópio.....	8
Figura 2.3 – Micro-pinça e Micro-pipeta em Operação.	8
Figura 3.1 – Exemplo de <i>Stack</i> Piezelétrico.....	9
Figura 3.2 – Exemplo de Atuador Bimorfo.	10
Figura 3.3 – Exemplo de Mecanismo Flexível.....	10
Figura 3.4 – Efeito Piezelétrico (longitudinal e transversal).....	11
Figura 3.5 – Cristal PZT (1) Antes da polarização; (2) Polarizado.....	12
Figura 3.6 – Stack Piezelétrico.....	13
Figura 3.7 – Projeto Estrutural Utilizando Otimização Topológica (SILVA [6]).....	16
Figura 3.8 – Estrutura com Certa Energia Potencial Submetida a um Carregamento t_1	17
Figura 3.9 – Estrutura com Certa Energia Potencial Submetida a um Carregamento t_2 após o t_1	19
Figura 3.10 – Fluxograma do Algoritmo de OT.	22
Figura 4.1 – Dimensões das alavancas 10 mm x 2 mm. O Deslocamento de entrada é aplicado na região da seta e possui 1 micron. Fator de amplificação 7.	26
Figura 4.2 – Melhor resultado obtido por associação de alavancas. O deslocamento na seta é também de 1 micron. Fator de amplificação 15. Comprimento da estrutura 50 mm.	27
Figura 4.3 – Alavanca simples fator de amplificação 30. Comprimento da estrutura 30 mm.	27
Figura 4.4 – Alavanca simples.	28
Figura 4.5 – Micro garra com estrutura adicional flexível (indicada pela seta).....	29

Figura 4.6 – Domínio Viável utilizado sendo que as restrições estão indicadas por triângulos, o <i>stack</i> está indicado pela região sombreada e o deslocamento desejado, pela flecha.	30
Figura 4.7 – Dois bons resultados da otimização topológica. Nessas figuras o <i>stack</i> é representado pela região retangular e fixados nos pontos indicados pelos triângulos (Solução adotada é a estrutura da esquerda).	30
Figura 4.8 – Verificação do Deslocamento Vertical do <i>Stack</i> Piezelétrico cerâmica a 17 MV. (deslocamento de 5 μ m similar ao observado por NADER(2002) no stack a 30V).....	31
Figura 4.9 – Simulação da Estrutura com Novo Contato entre Garra e Piezo.....	32
Figura 4.10 – Tensões Equivalentes de von Mises para a nova Estrutura.....	32
Figura 4.11 – Ponto de Ação do Parafuso Regulador.....	33
Figura 4.12 – Deslocamentos para a nova Estrutura. Sob Ação do Parafuso Regulador.	33
Figura 4.13 – Tensões Equivalentes de von Mises para a nova Estrutura sob Ação do Parafuso Regulador.	34
Figura 4.14 – Esquema simplificado de usinagem por EDM.	35
Figura 5.1 – Desenho do Dispositivo de Fixação da Micro-Pinça.	38
Figura 5.2 – Desenho da Estrutura a Ser Fabricada.....	39
Figura 5.3 – Desenho de Furação da Chapa Inicial de Alumínio.....	40
Figura 5.4 – Nova Simulação com <i>Stack</i> Menor (deslocamento 2 μ m)	41
Figura 5.5 – Layout de Colagem dos Componentes.....	41
Figura 5.6 – Foto do Sistema Montado.....	42
Figura 5.7 – Foto do Sistema Preso a um Posicionador XY.....	43
Figura 6.1 – <i>Probe Station</i> utilizada para a realização dos testes.	44
Figura 6.2 – Imagem de um Braço da Garra de 0,5mm de largura.	45
Figura 6.3 – Deslocamento Medido (Esquerda: Antes; Direita: Depois)	46
Figura 6.4 – Comparação entre as posições inicial e final.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EDM – Electro Discharge Machining

MINIMAN – Projeto intitulado “Minuaurized Robot for Micro Manipulation”

LIGA - Litografia por raios-X

PZT - Titanato Zirconato de Chumbo (Cerâmica Piezelétrica)

OT – Otimização Topológica

MEF – Método de Elementos Finitos

EPT – Estado Plano de Tensões

EPD – Estado Plano de Deformação

APLFLEX – Software de Otimização Topológica

ANSYS – Software de Simulação que Utiliza Método de Elementos Finitos

SIMP – Simple Isotropic Material with Penalization

SEM – Scanning Electro Microscopy

PLANE13 – Elemento do Ansys para representar o material piezelétrico.

DC – Corrente Contínua.

M3 – Rosca de Diâmetro 3 mm.

M6 – Rosca de Diâmetro 6 mm.

CAD – Computer Aided Design.

1. INTRODUÇÃO

Todo o avanço da humanidade, desde a época em que o homem conseguiu pela primeira vez lapidar uma pedra para fazer dela seu instrumento, se deve em grande parte a sua excelente capacidade de manipulação provida pelas suas mãos e pelos sentidos de tato e visão. No final do século XX, com a crescente necessidade de manipular objetos cada vez menores, a habilidade motora do homem foi se tornando cada vez menos eficaz para atingir tal objetivo. Nesse contexto é que começaram a surgir as ferramentas de micromanipulação. Assim, a habilidade motora humana começou a ser transferida do macromundo para o micromundo, onde uma atuação direta do homem jamais seria concebida sem tais ferramentas.

Assim, foram criados diversos dispositivos que auxiliam o ser humano nessa tarefa. Desde simples objetos de manipulação ou simples objetos de sensoriamento até complexos sistemas de micromanipulação controlados por sensores óticos e de contato (força).

Em tarefas de micromanipulação de objetos. Os sentidos humanos não são suficientes para a monitoração e controle do processo e existe a necessidade de transformar as respostas do sistema em sinais perceptíveis para o operador humano. Isto faz com que em micromanipulação o esforço seja dirigido não somente na criação de um micromanipulador com sensores, mas também em um sistema de monitoramento para toda tarefa de micromanipulação.

1.1. MICROMANIPULAÇÃO DE OBJETOS

1.1.1. TIPOS DE SISTEMA

Há três tipos de sistemas de micromanipulação de objetos:

1. Manual - Em que a precisão de movimentação é ditada pela capacidade manual do operador. Em medicina, pesquisas biológicas e micro-cirurgia esta

é a prática comum (figura 1.1). Este sistema exige operadores treinados que através de pequenos instrumentos e microscópio realizam a micromanipulação.

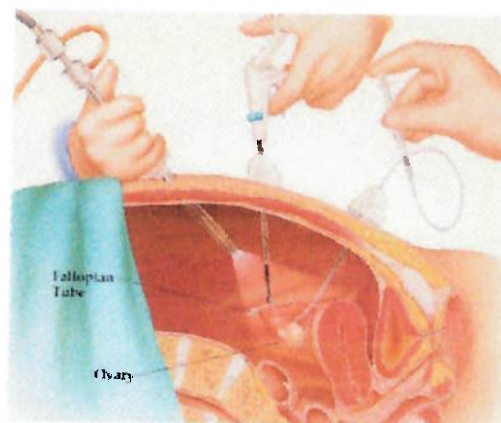


Figura 1.1 – Exemplo de Micromanipulação Manual.

2. Semi-Automático ou Teleoperado - Em que o movimento manual do operador é transformado eletronicamente em um movimento mais preciso através do uso de um atuador controlado por *joystick*. Este sistema possui, também, subsistemas adicionais para transmissão de imagens, forças e ruído do mundo micro para o operador.



Figura 1.2 – Exemplo de Micromanipulação Semi-Automático.

3. Automático através de uma estação de trabalho de micromanipulação - O movimento de um atuador é controlado pelos sinais enviados de um computador não existindo influência alguma da precisão das mãos humanas.

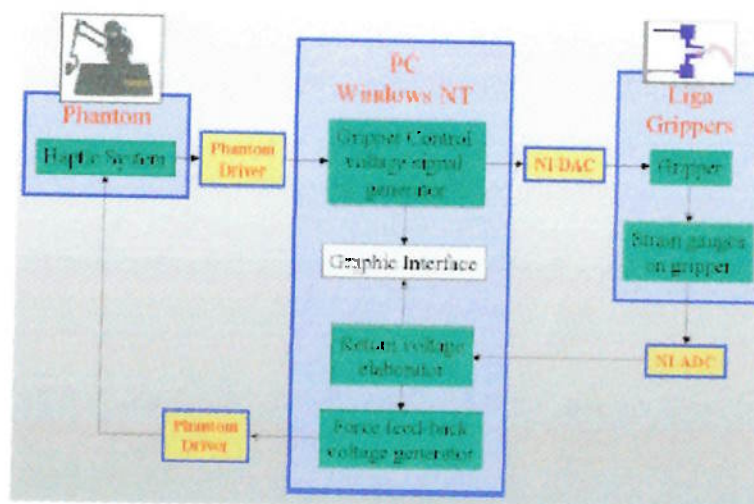


Figura 1.3 – Exemplo Esquemático de um Sistema de Micromanipulação Automático.

1.1.2. TÉCNICAS DE MICROMANIPULAÇÃO

Uma diferença evidente entre o mundo microscópico e o mundo macroscópico é o aumento da importância das forças de adesão (forças de Van Der Waal's, forças eletrostáticas e forças de tensão superficial). Isto ocorre porque enquanto as forças gravitacionais são proporcionais ao volume do objeto, as forças de adesão são proporcionais à superfície do objeto.

Pode-se dividir as técnicas de micromanipulação em dois grupos: técnicas com contato entre o manipulador e o objeto (onde as forças de adesão estarão presentes) e técnicas sem contato (onde não estarão presentes as forças de adesão). Abaixo algumas técnicas de micromanipulação são brevemente explicadas.

Técnicas sem contato:

1. **Micromanipulação por campos elétricos** - Quando uma partícula dielétrica é imersa em um campo elétrico alternante, carga induzida é gerada com um certo atraso. A não ser que o atraso entre o campo e a carga seja de noventa graus, a força resultante não será em média zero. Assim, a partícula responderá a esta força se movimentando o que possibilita a micromanipulação.

2. **Micromanipulação por forças ópticas** - Quando um material transparente com um índice de refração maior do que o meio que o envolve é colocado sob um gradiente de luz uma força gradiente aparece. Quando a luz passa através de materiais polarizantes ela induz dipolos flutuantes. Estes dipolos interagem com o gradiente do campo eletro-magnético resultando em uma força que age em direção a região com mais brilho da luz. Sendo assim o material polarizável se movimenta em direção á luz possibilitando assim sua micromanipulação.

Técnicas com contato:

1. **Microatuador piezelétrico** - Neste tipo de microatuador um objeto é movimentado utilizando-se da deformação de um piezelétrico, material com a propriedade de converter tensão elétrica em deformação mecânica.
2. **Microatuador eletrostático** - Neste tipo de microatuador o objeto é movimentado utilizando-se de força eletrostática induzida através de uma diferença de potencial entre duas superfícies obtendo um movimento relativo entre as partes.
3. **Microatuador bimorfo** - Estruturas bimorfas possuem camadas de material com coeficientes térmicos de expansão diferentes. Sendo assim ao se aplicar tensão nesta estrutura provocando calor por efeito Joule a superfície se deforma. Esta deformação é utilizada de forma ordenada para manipular objetos.
4. **Microatuador térmico** - Utilizando-se de atuação térmica em uma estrutura assimétrica há ocorrência de deformação e assim um objeto pode ser agarrado. Aqui, diferente do que ocorre em um microatuador bimorfo somente um material é utilizado. A expansão térmica assimétrica é gerada pela resistência não homogênea ao calor devido à forma da estrutura.

1.2 JUSTIFICATIVA

Esta monografia descreve o projeto e a fabricação de um “Microatuador Piezelétrico Flexensional”. Dessa forma, este trabalho de graduação procura realizar a construção, na Escola Politécnica, de um sistema de micromanipulação de objetos. Espera-se com isto que a eficácia do uso de atuadores piezelétricos seja analisada e também, no uso de mecanismos flexensionais, as simulações empregadas por ferramentas de elementos finitos se comprovem eficazes para modelar tais sistemas. Esse trabalho será referência para trabalhos futuros na utilização de tais tecnologias, que correspondem a um campo de pesquisa de potencial pouco explorado no Brasil.

Com a preocupação de construir um microatuador versátil, procurando diminuir o esforço de aprendizado do operador optou-se pela construção de uma micro-garra.

Nos próximos capítulos o projeto é descrito em sua totalidade. O capítulo 2 contextualiza uma revisão da literatura que aborda o assunto. O capítulo 3 discute os métodos que são utilizados no presente trabalho, o método de elementos finitos, otimização topológica, a metodologia empregada na execução das simulações e o processo de fabricação EDM. No capítulo 4 são descritas as simulações realizadas, o resultado da otimização topológica e a escolha da estrutura a ser fabricada. O capítulo 5 contém as etapas de projeto e fabricação da micro-pinça e de dispositivos auxiliares; também nesse capítulo encontram-se os passos realizados na montagem dos componentes. O capítulo 6 encontra-se toda a fase de testes do protótipo e os resultados obtidos. Finalmente, no capítulo 7 apresenta-se a conclusão sobre o projeto realizado.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo busca contextualizar o trabalho fazendo um resumo das pesquisas realizadas nesse campo, focando nas características e problemas dos mecanismos encontrados.

Foi escolhida, como ferramenta manipuladora, uma **pinça**, por sua vasta aplicabilidade em um universo grande de objetos. Com isso, puderam ser encontrados diversos trabalhos que ilustram vários mecanismos e elementos atuadores diferentes. Esses trabalhos possuem resultados teóricos (simulados por software) e resultados práticos gerados através de testes.

Abaixo são descritos alguns trabalhos de mecanismos de micromanipulação baseados em pinças. São citados também as expectativas teóricas e os respectivos resultados práticos.

Para iniciar essa análise, é interessante observar o trabalho de ANDO (1992), que, com um mecanismo baseado na teoria de juntas e molas foi capaz de obter um fator de amplificação¹ em torno de 50 em sua estrutura para o movimento gerado por um material piezelétrico². Obteve também uma abertura na garra de 0.2 mm e capacidade de aplicação de força na ponta de seu atuador de 1 mN. Ele utiliza um único atuador para atuar simetricamente nos dois braços da sua micro-pinça. Esse atuador utilizado denomina-se *stack* piezelétrico e será descrito no capítulo 3.

¹ Fator de Amplificação é a razão entre o deslocamento na ponta da garra e aquele provocado pelo atuador piezelétrico.

² Esse tipo de material será descrito no capítulo 3 item 3.1

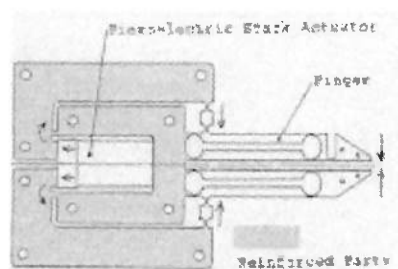


Figura 2.1 – Mecanismo Baseado na Teoria de Juntas e Molas (ANDO,1992).

BALLANDRAS (1997) se utiliza de técnicas de fabricação LIGA e de métodos de elementos finitos para modelar sua estrutura. Em análises teóricas obteve um fator de amplificação de 28. Nos testes práticos este valor caiu para 3. A justificativa para isto é que as características do níquel utilizado na análise são diferentes daquele utilizado na eletrodeposição.

Na Universidade de Uppsala, THORNELL (1996) fabricou uma pinça utilizando como material de projeto titânio e processo de fabricação EDM e *Etching*. Seu atuador era um tubo piezelétrico que possuía 80 mm de comprimento. Esta pinça era capaz de manipular objetos de 50 μm a 1 mm.

MENCIASSI (1999) construiu um atuador de aço utilizando-se do processo LIGA de fabricação. Em suas simulações com elementos finitos o fator de amplificação da estrutura ficava entre 30 e 40 e, na prática, reduzia-se para algo ao redor de 15. Também foi observada uma certa dificuldade da pinça em soltar os objetos. No projeto MINIMAN (Ref. [5]) do qual MENCIASSI faz parte, inicialmente era utilizado o processo de fabricação LIGA, a técnica foi substituída para EDM. Um material com características mais satisfatórias pôde ser escolhido: A liga Ni50.8Ti49.2. Foram obtidas assim melhorias no resultado.

Por fim, na figura 2.2 um sistema de micromanipulação de objetos comercial pode ser observado. Na figura 2.3 uma micro-pinça segura uma célula para ser penetrada por uma micro-pipeta.

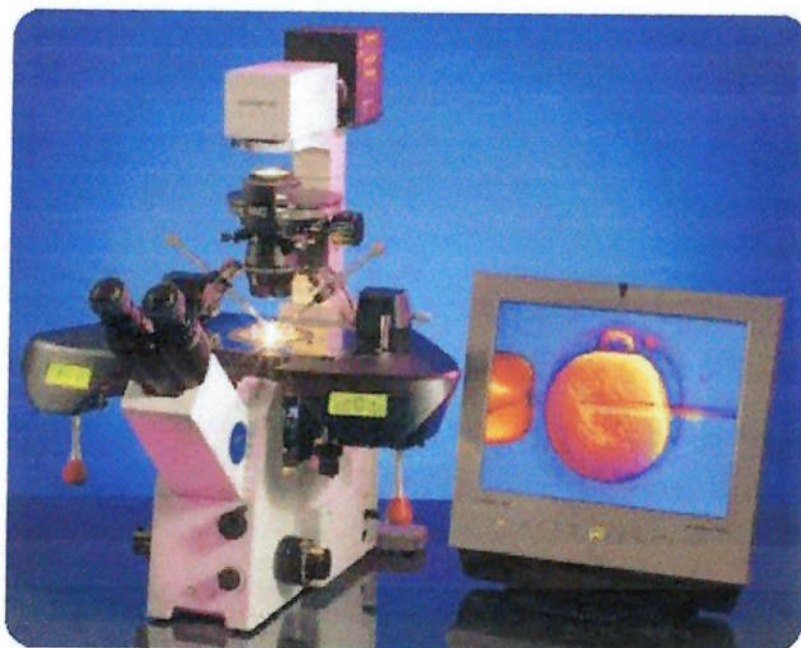


Figura 2.2 – Sistema de Micromanipulação montado com microscópio



Figura 2.3 – Micro-pinça e Micro-pipeta em Operação.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Como já mencionado, um material piezelétrico tem a propriedade de converter tensão elétrica em deformação mecânica. Porém, a utilização de piezelétricos como atuadores tem um grande limitante, a deformação mecânica relativa gerada pela aplicação de tensão elétrica é extremamente pequena. Existem diversas formas de se contornar este problema:

1. Utilizando-se de uma **pilha ("stack")** de diversos piezelétricos. Onde o deslocamento de cada camada se soma amplificando o deslocamento total (figura 3.1).



Figura 3.1 – Exemplo de *Stack* Piezelétrico.

2. Utilizando-se de um atuador **bimorfo** (figura 3.2). Atuadores desse tipo utilizam-se da flexão da estrutura frente a deformações desiguais de materiais com propriedades diferentes posicionados fixos longitudinalmente. A envergadura do material produz um deslocamento maior do que se o mesmo deslocasse somente longitudinalmente. Exemplo: Atuador composto por materiais de coeficiente de dilatação térmica diferentes quando impostos a uma variação de temperatura.

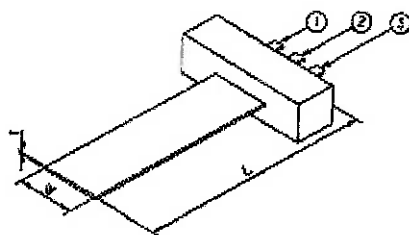


Figura 3.2 – Exemplo de Atuador Bimorfo.

3. Através da associação ao piezelétrico de um **mecanismo flexível** para direcionar e amplificar o seu deslocamento (figura 3.3). Mecanismos flexíveis são, geralmente, construídos como uma única peça, tendo desta forma sua montagem simplificada. Isto possibilita sua construção em tamanho reduzido. Estes mecanismos possuem alta precisão, neles o movimento da estrutura ocorre por deformação.



Figura 3.3 – Exemplo de Mecanismo Flexível

Um atuador piezelétrico flexensional é a associação de um piezelétrico com um mecanismo flexível.

Para que o deslocamento do atuador piezelétrico flexensional seja amplificado ao máximo sem comprometer sua rigidez, convém realizar uma otimização na estrutura do mecanismo flexível.

Denomina-se Otimização Topológica (OT) a técnica que busca a melhor configuração estrutural possível de maneira a atender a um critério de custo (no caso em questão, visa-se obter a maior flexibilidade do mecanismo juntamente com a maior rigidez da estrutura). Em seu processamento, a OT combina métodos de otimização com métodos numéricos de análise como o MEF (Método de Elementos Finitos).

As páginas seguintes abordam as teorias que fundamentam a otimização topológica, as características e o comportamento piezelétrico modelado para sua utilização no MEF bem como a metodologia de simulação utilizada.

3.1. MATERIAL PIEZELÉTRICO.

Materiais piezelétricos são materiais em que uma polarização pode ser induzida e um campo elétrico estabelecido pela aplicação de forças externas no piezelétrico. Este efeito pode ser invertido e uma tensão elétrica pode produzir como resultado, deformação. Este fenômeno ocorre tanto transversalmente como longitudinalmente, como mostra a figura abaixo (3.4).

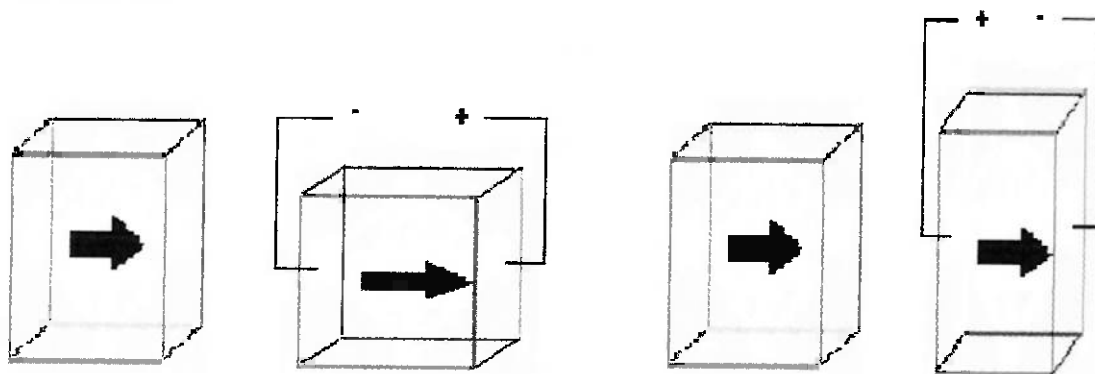


Figura 3.4 – Efeito Piezelétrico (longitudinal e transversal).

O efeito piezelétrico pode ser observado em cristais como o quartzo, porém nele o efeito é muito fraco. As cerâmicas ferro cristalinas como o titânio de bário (BaTiO_3) e o titanato zirconato de chumbo (PZT) foram desenvolvidas para amplificar este efeito recebendo um tratamento de polarização. Numa polarização a amostra é aquecida acima de sua temperatura de *Curie* com posterior queda para a temperatura ambiente submetendo-se, longo de todo o processo, a um forte campo elétrico ($>2000 \text{ V/mm}$) [2]. O tratamento térmico altera a micro-estrutura da amostra e o forte campo elétrico orienta os domínios de *Weiss* paralelamente. O material se

expande na direção axial ao campo e se contrai na direção perpendicular ao campo. Quando a temperatura no material cai à temperatura ambiente, a estrutura não se altera mais. Quando o forte campo de tensão deixa então de ser aplicado os dipolos ficam, mais uma vez, desalinhados, e a estrutura volta a sua forma original. Quando uma tensão é aplicada novamente no piezelétrico, o domínio de *Weiss* aumenta seu alinhamento proporcionalmente à tensão e ocorre mudança nas dimensões do material.

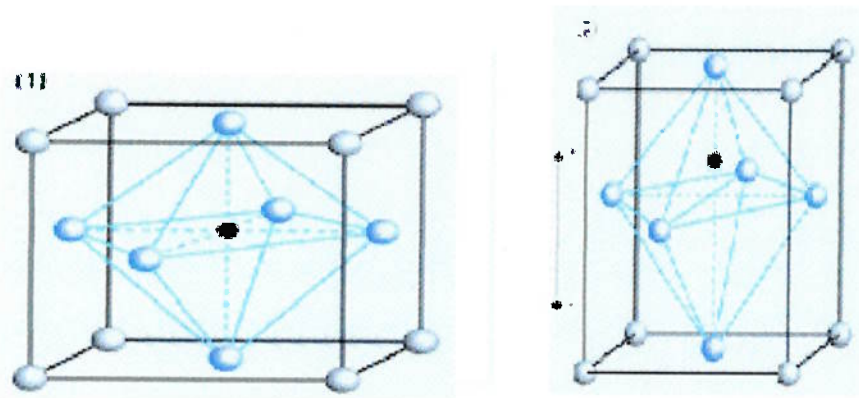


Figura 3.5 – Cristal PZT (1) Antes da polarização; (2) Polarizado.

Nesse trabalho será utilizado o arranjo denominado *stack* piezelétrico por prover maiores deslocamentos para uma mesma tensão. Esse dispositivo, como já citado anteriormente, consiste em diversas camadas de material piezelétrico sobrepostas de modo a somar seus deslocamentos. A tensão é aplicada a elas de forma paralela (figura 3.6).

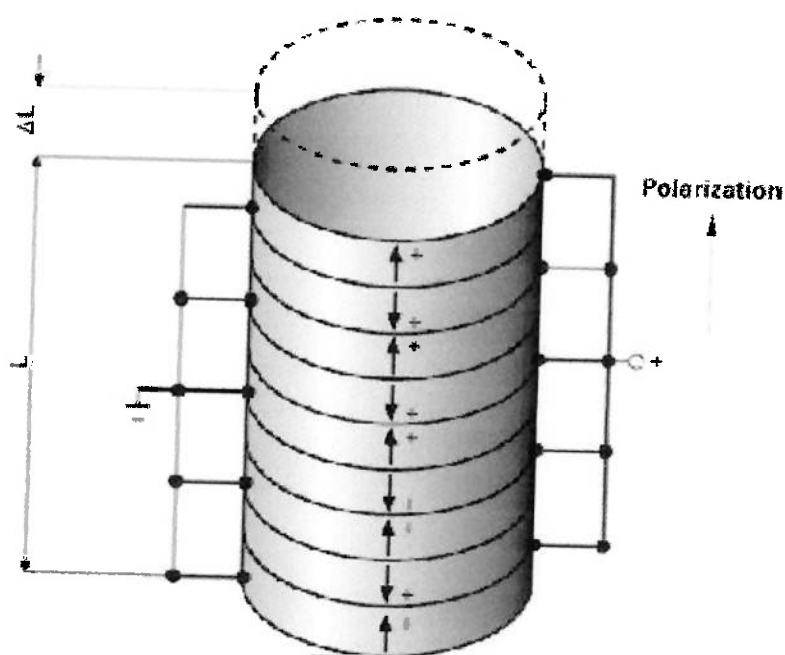


Figura 3.6 – Stack Piezelétrico

Um stack pode ser de alta tensão ou de baixa tensão dependendo da espessura das camadas. Para um stack de alta tensão ($\sim 1000\text{V}$) a espessura varia de 0,5 a 1 mm e para o de baixa tensão ($\sim 100\text{V}$) a espessura varia de 20 a 100 μm .

3.2. EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DO PIEZELÉTRICO

Os materiais piezelétricos relacionam as variáveis de deslocamento elétrico D e campo elétrico E com as variáveis mecânicas deformação ε e tensão T . Modelando este comportamento teríamos:

$$\begin{aligned} T &= T(\varepsilon, E) \\ D &= D(\varepsilon, E) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Aplicando *Taylor*, e desprezando efeitos magnéticos, térmicos e termos não lineares, as equações (3.1) ficam:

$$T = \left(\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right)_E \varepsilon + \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_\varepsilon E \quad (3.2)$$

$$\mathbf{D} = \left(\frac{\partial D}{\partial \varepsilon} \right)_E \boldsymbol{\varepsilon} + \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_S \mathbf{E}$$

Definindo-se a seguir c , e e ε respectivamente como constante elástica, piezelétrica e dielétrica:

$$\begin{aligned} c^E &= \left(\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} \right)_E ; \quad e^E = \left(\frac{\partial D}{\partial \varepsilon} \right)_E \\ e^S &= \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S ; \quad \varepsilon_D^S = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_S \end{aligned} \quad (3.3)$$

Onde os sobrescritos E indicam que a grandeza referenciada deve ser obtida sob um campo elétrico constante e os sobrescritos S indicam que devem ser obtidos sob deformação nula. Assim de (3.2):

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & e^S \\ e^E & \varepsilon_D^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ E \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

Um problema na modelagem é que a medição das propriedades elétricas do meio piezelétrico é dependente das restrições mecânicas, devido ao acoplamento piezelétrico. Mas, seguindo considerações termodinâmicas, mostra-se que o efeito piezelétrico inverso e^S é uma consequência do efeito piezelétrico direto e^E . Assim temos que para (3.4):

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & e^t \\ e & \varepsilon_D^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ E \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

A matriz em (3.5) pode ser definida como uma matriz elasto-pieze-dielétrica. Sejam a matriz elástica de dimensões 6×6 , com 9 constantes elásticas; a matriz

piezelétrica de dimensões 6×3 e 3×6 , com 5 constantes piezelétricas; e a matriz dielétrica de dimensões 3×3 , com 3 constantes dielétricas, como mostrado abaixo:

$$\begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 & 0 & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & -e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \\ -E_1 \\ -E_2 \\ -E_3 \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

Os valores das constantes elásticas, piezelétricas e dielétricas podem ser obtidos de trabalhos, livros e artigos. A matriz acima é chamada matriz piezelétrica e é de fundamental importância para simular o comportamento do piezelétrico tanto no software de elementos finitos Ansys™, como nos algoritmos de otimização topológica.

3.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Dá-se o nome de otimização topológica (OT) ao método computacional de busca da melhor configuração estrutural possível de maneira a atender a um critério de custo (função objetivo). Em seu processamento, a OT combina métodos de otimização com métodos numéricos de análise como o MEF.

O procedimento para implementação da OT é constituído de várias etapas:

- A primeira consiste na definição do domínio estendido do projeto no qual a estrutura possa existir. Este domínio é limitado pelos pontos de aplicação de carga e pelas condições de contorno da estrutura, ou seja, aqueles pontos onde o deslocamento é restringido.

- Na segunda etapa o domínio é discretizado em elementos finitos e também é feita a aplicação das condições de contorno.
- Na terceira etapa os dados do domínio são inseridos no algoritmo de otimização topológica que, num processo iterativo, distribui material no domínio de forma a minimizar a função objetivo especificada.
- Posteriormente, o resultado é interpretado, a estrutura é verificada em um software de elementos finitos e para então poder ser fabricada.

A figura abaixo (3.7) mostra um exemplo de um processo que utiliza otimização topológica.

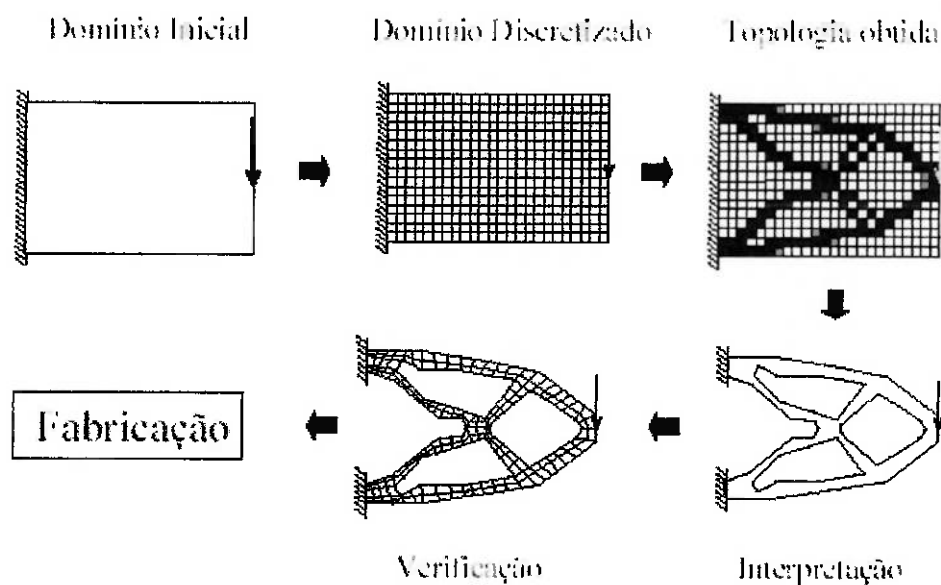


Figura 3.7 – Projeto Estrutural Utilizando Otimização Topológica (SILVA [6]).

3.3.1. ALGUNS CONCEITOS EM OT

- Domínio Estendido Fixo de Projeto:

O domínio estendido fixo de projeto é o espaço no qual o algoritmo de OT pode construir a estrutura. O objetivo da OT é determinar os espaços sem material ou vazio e a conectividade da estrutura através da remoção e adição de material neste domínio de forma a otimizar uma função objetivo.

- Método das Densidades:

O SIMP ou método das densidades consiste em uma equação matemática que define o valor em cada ponto do domínio em função da propriedade efetiva do material-base usado no projeto. Esta equação é dada por:

$$C(x) = \chi(x) C_0 \quad (3.7)$$

Onde:

$\chi(x)$ - Função discreta.

C_0 - Tensor constitutivo do material base

Para evitar, porém, a ocorrência do excesso de densidades intermediárias, o que não teria sentido físico, penaliza-se os valores intermediários de através de:

$$C(x) = \rho(x)^p C_0 \quad (3.8)$$

Onde:

$\rho(x)$ - Função de distribuição contínua de densidades com $0 \leq \rho(x) \leq 1$ e $x \in \Omega$

C_0 - Tensor constitutivo do material base

p - de fator penalização para redução de densidades intermediárias.

- Flexibilidade Média e Energia Mútua

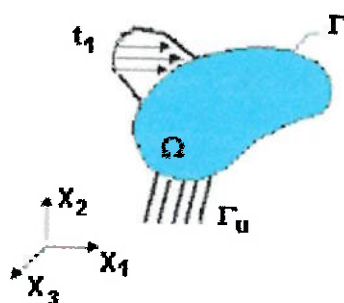


Figura 3.8 – Estrutura com Certa Energia Potencial Submetida a um Carregamento t_1 .

Suponha uma estrutura em equilíbrio estático submetido a um carregamento t_1 (figura 3.8). A energia potencial total é dada pela seguinte expressão:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon(u)^T C \varepsilon(u) d\Omega - \int_{\Omega} t u d\Omega \quad (3.9)$$

Onde:

Γ_u - região onde não ocorre deslocamento;

Π - Energia potencial total;

$\varepsilon(u)$ - Elasticidade dada por: $\varepsilon_{ij}(u) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$;

C - é a matriz de propriedades elásticas;

t - é dado por $t = T \cdot n$; T é o tensor das tensões e n é o vetor normal à superfície.

u - campo de deslocamentos.

O primeiro termo da equação acima se refere à energia elástica de deformação e o segundo termo ao trabalho realizado pelas forças externas. Define-se flexibilidade média por:

$$L_k(u_l) = \int_{\Omega} t_k u_l d\Omega \quad \text{para } u_l \in V \quad (3.10)$$

Onde

V - é o espaço linear admissível, tal que $V = \{u = u_i x e_i : u_i \in H_1(\Omega) \text{ com } u = 0 \text{ em } \Gamma_u, i=1,2,3\}$

Γ_u - região onde não ocorre deslocamento

t - é dado por $t = T \cdot n$, e, como na equação anterior, T é o tensor das tensões e n é o vetor normal à superfície.

u_l - campo de deslocamentos

Como mostra a equação (3.9) o termo correspondente à flexibilidade média pode ser interpretado como a energia de deformação armazenada pelo sistema mensurada a partir de forças externas. Note que a máxima rigidez de uma estrutura em um certo ponto é dada pela minimização da flexibilidade média neste ponto.

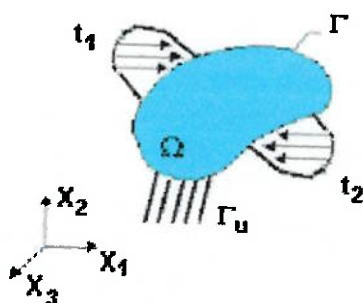


Figura 3.9 – Estrutura com Certa Energia Potencial Submetida a um Carregamento t_2 após o t_1 .

Considere agora a seguinte situação: um carregamento t_2 é aplicado gradualmente em uma região de um volume já sujeito a um carregamento t_1 . Nesta situação o trabalho total é dado por:

$$\Pi_1 = \frac{1}{2} \int_{\Gamma_{t1}} t_1 u_1 d\Omega + \frac{1}{2} \int_{\Gamma_{t2}} t_2 u_2 d\Omega + \int_{\Gamma_{t1}} t_1 u_2 d\Omega \quad (3.11)$$

Onde

Γ_{t1} - região onde está aplicado t_1 ;

Γ_{t2} - região onde está aplicado t_2 .

Um carregamento t_1 é aplicado gradualmente em uma região de um volume já sujeito a um carregamento t_2 . Nesta situação o trabalho total é dado por:

$$\Pi_2 = \frac{1}{2} \int_{\Gamma_{t2}} t_2 u_2 d\Omega + \frac{1}{2} \int_{\Gamma_{t1}} t_1 u_1 d\Omega + \int_{\Gamma_{t2}} t_2 u_1 d\Omega \quad (3.12)$$

Onde

Γ_{t1} - região onde está aplicado t_1 ;

Γ_{t2} - região onde está aplicado t_2 .

Como o trabalho realizado não depende da ordem de carregamento:

$$\int_{\Gamma_{t1}} t_1 u_2 d\Omega = \int_{\Gamma_{t2}} t_2 u_1 d\Omega \quad (3.13)$$

Esta equação foi demonstrada por E.Betti, em 1872. Ela é o caso mais geral da lei de Maxwell das deflexões recíprocas. Também é a expressão da energia mútua no corpo tridimensional. Se um valor unitário for assumido para t_2 , a equação da energia mútua do volume representará o quanto se desloca a região Γ_{t2} devido à ação do carregamento t_1 aplicado na região Γ_{t1} . Portanto, se quisermos a maximização da deflexão em determinado ponto e direção da estrutura, a energia mútua para este ponto, dada a aplicação de uma força em outro ponto, deve ser maximizada.

- Transdução Média

A flexibilidade média e a energia mútua são as bases para a definição de uma função multi-objetivo. Estes conceitos devem, porém, ser estendidos para o meio piezelétrico. Expandindo o raciocínio utilizado anteriormente, o teorema da reciprocidade pode ser estendido para o meio piezelétrico.

Considere um corpo piezelétrico sujeito a carga d_1 e d_2 aplicadas em Γ_{d1} e Γ_{d2} e as trações t_1 e t_2 aplicadas em Γ_{t1} e Γ_{t2} . Calculando a energia potencial do sistema aplicando-se primeiro t_1 e d_1 obtém-se Π_1 . Depois, aplicando-se primeiro t_2 e d_2 obtém-se Π_2 . Como o trabalho realizado não depende da ordem de carregamento:

$$\int_{\Gamma_n} t_1 u_2 d\Omega + \int_{\Gamma_{d1}} d_1 \phi_2 d\Omega = \int_{\Gamma_{r2}} t_2 u_1 d\Omega + \int_{\Gamma_{d2}} d_2 \phi_1 d\Omega \quad (3.14)$$

Onde

Γ_{d1} - região onde está aplicado d_1 ;

Γ_{d2} - região onde está aplicado d_2 ;

d - é dado por $D \cdot n$, onde D é o vetor cargas elétricas e n é normal a superfície.

Define-se assim transdução média, conceito análogo ao utilizado pela energia mútua. Dadas as equações de equilíbrio de um material piezelétrico, obtidas pela minimização ($\delta\Pi = 0$) da energia potencial do sistema (submetido a tensões e carga elétricas), e a equação da reciprocidade estendida ao meio piezelétrico, é possível aplicar ao problema de cálculo da transdução média o método de elementos finitos. Esta é uma abordagem interessante, pois possibilita a solução numérica do problema em um software. Abaixo é dado o equacionamento final do problema, maiores detalhes podem ser encontrados em [2].

$$L_1(U_2, \phi_2) = \begin{Bmatrix} U_2^t \\ \phi_2^t \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{u\phi} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ \phi_1 \end{Bmatrix} = L_2(U_1, \phi_1) \quad (3.15)$$

Onde:

$K_{uu}, K_{u\phi}, K_{\phi\phi}$ - Matrizes de Rigidez definidas em [2].

U_1, U_2, ϕ_1, ϕ_2 - correspondem aos deslocamentos mecânico nodais

Mostrada a maneira pela qual a flexibilidade média e a transdução média podem ser obtidas numericamente, o problema passa a ser agora a definição de uma função multi-objetivo.

3.3.1. FUNÇÃO MULTI-OBJETIVO

No projeto da micro-garra, procura-se a estrutura com maior deslocamento possível em um determinado ponto e direção. Conforme detalhado neste capítulo, a deformação em um ponto quando tensões e cargas elétricas são aplicadas em um outro ponto da estrutura pode ser obtida numericamente através do conceito de transdução média. Quer-se então maximizar esse valor. A estrutura, porém deve suportar a transmissão de deslocamento e forças para que o dispositivo não perca sua finalidade. Isso pode ser implementado através da minimização da flexibilidade média no ponto que necessita rigidez. Defini-se assim uma função multi-objetivo.

Com o domínio viável definido e discretizado, através do MEF, o comportamento do piezelétrico é caracterizado. O software que implementa o método de OT pode, então, quantificar a função multi-objetivo. A figura 3.10 mostra um fluxograma das etapas de projeto, análise por MEF e otimização topológica na obtenção da estrutura final a ser fabricada.

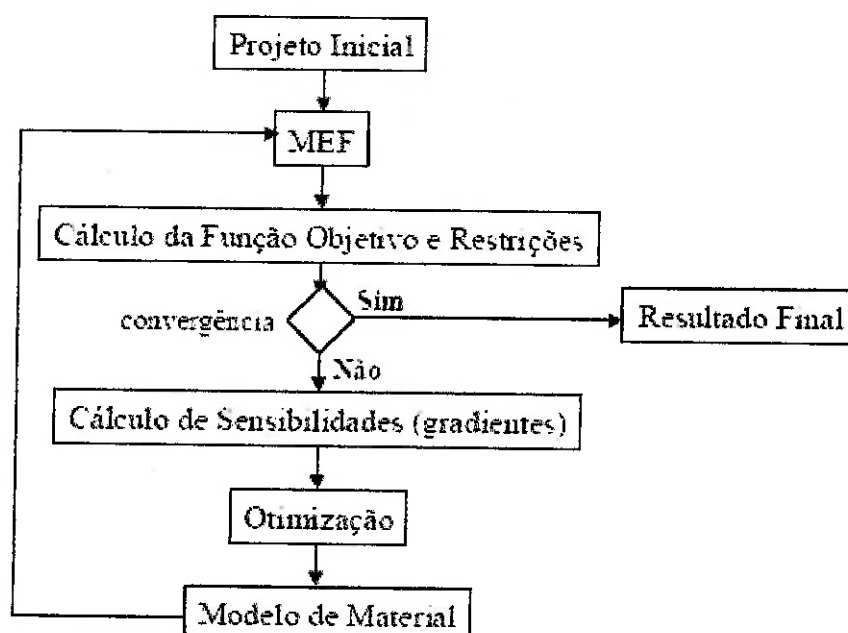


Figura 3.10 – Fluxograma do Algoritmo de OT.

4. ESPECIFICAÇÕES, SIMULAÇÕES E PROJETO

Neste capítulo será descrito todo o processo de projeto e construção do atuador definido no escopo desse projeto.

4.1. ESPECIFICAÇÕES

O objetivo deste trabalho, como mencionado anteriormente, é a construção de uma micro-garra para viabilizar projetos que exijam um sistema de manipulação e montagem preciso. Para que o protótipo a ser construído seja versátil em suas tarefas é interessante que ele seja capaz de atuar sobre objetos de tamanhos que variem de 1 *micron* a 1 mm, cobrindo assim, todo o mundo micro. Isto, porém se torna um problema devido ao movimento limitado gerado por um piezelétrico.

Procurando definir melhor o produto deste trabalho as especificações e características estruturais de outros projetos de micro atuadores foram estudadas. Aqui, elas serão brevemente expostas, mais informações sobre estes projetos podem ser encontradas em [1] e [5].

Tendo em vista este estudo, o projeto pode ser assim caracterizado:

- Processo de Fabricação: **EDM**
- Material: **Alumínio**
- Características do Atuador: *Stack* Piezelétrico de **20 mm x 4 mm x 4 mm**
- Dimensões Máximas da Estrutura (Domínio Viável): **35 mm x 15 mm x 1 mm**.
- Força de Atuação Mínima: **1 mN**
- Faixa de Atuação: **de 1 mm a 1 micron**.

4.2. PROCEDIMENTOS PARA A MODELAGEM DO ATUADOR

As simulações em elementos finitos aqui realizadas utilizaram-se da

ferramenta Ansys de análise. Neste programa assume-se o eixo y como sendo a direção de polarização do piezelétrico, nesse caso há necessidade de uma inversão de bases nas matrizes a serem inseridas. Abaixo são descritos os passos da simulação

- Definição dos Elementos:

 PLANE13 (Piezo);

 PLANE42 (Estrutura em alumínio).

- Definição dos Materiais:

Material 1 : Piezo	Material 2 : Alumino
Density Densidade = $7,591 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$	Density Densidade = $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Permittivity (ortho) Permissividade Elétrica Relativa * $\epsilon_{811} / \epsilon_0 = 916$ $\epsilon_{822} / \epsilon_0 = 916$ $\epsilon_{833} / \epsilon_0 = 830$ * ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F.m-1}$)	Linear Isotropic Módulo de elasticidade E = $71 \text{ GPa} = 71000 \text{ N/mm}^2$ Módulo de Young $\nu = 0,334$.
Anisotropic Elastic Constantes Elásticas: $C_{11}^E = 12.10 \times 10^4 \text{ N.mm}^2$ $C_{12}^E = 7.52 \times 10^4 \text{ N.mm}^2$ $C_{13}^E = 7.51 \times 10^4 \text{ N.mm}^2$ $C_{33}^E = 11.10 \times 10^4 \text{ N.mm}^2$ $C_{44}^E = 2.105 \times 10^4 \text{ N.mm}^2$ $C_{66}^E = 2.24 \times 10^4 \text{ N.mm}^2$	
Piezoelectric Matrix Matriz piezoeétrica: $[e]^T = \begin{bmatrix} 0 & 5,35 & 0 \\ 0 & -15,8 & 0 \\ 0 & 5,35 & 0 \\ -12,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -12,3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $10^{-6} \text{ C.mm}^{-2}$	

Tabela 4.1 – Propriedades dos Materiais Definidos para a Simulação em Ansys.

Para se simular o comportamento do *stack* como uma cerâmica piezoeétrica usou-se como valor de referência o deslocamento de 5 *microns* quando da aplicação de 30 Volts no *stack*, conforme visto em caracterização de NADER (2002). Assim, com a estrutura definida, pode-se estimar a tensão a ser aplicada na cerâmica do modelo para produzir tal deslocamento.

porém, continuaram baixos, abaixo daqueles observados pela simples utilização de uma alavanca (figura 4.2).

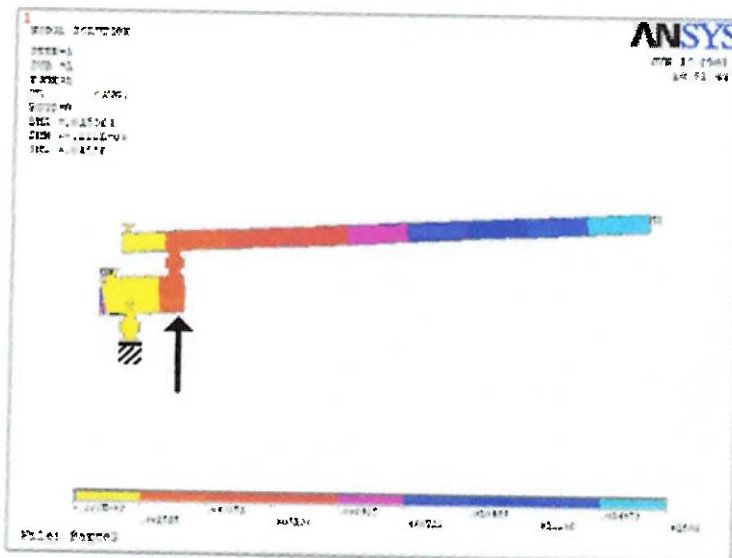


Figura 4.2 – Melhor resultado obtido por associação de alavancas. O deslocamento na seta é também de 1 micron. Fator de amplificação 15. Comprimento da estrutura 50 mm.

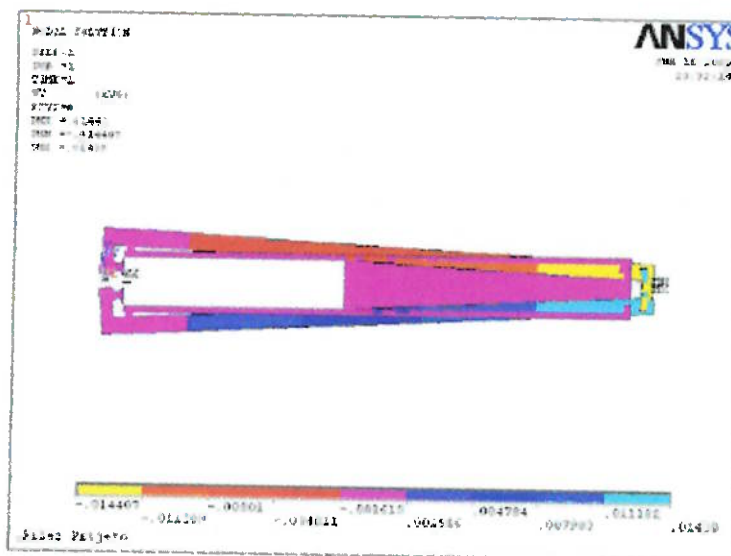


Figura 4.3 – Alavanca simples fator de amplificação 30. Comprimento da estrutura 30 mm.

Os resultados positivos do uso de uma única alavanca mudaram a direção do projeto e estruturas deste tipo passaram a ser simuladas. Aparentemente a associação de alavancas para dar certo necessitaria de uma maior relação entre a rigidez das

seções, o que possivelmente implicaria em estruturas com espessura variável ou com uma composição de mais de um material que tornariam a análise bem mais difícil e inviabilizaria a utilização do software de OT disponível. Pesquisando estruturas com alavanca simples um layout foi definido com base em bons resultados (figura 4.4).

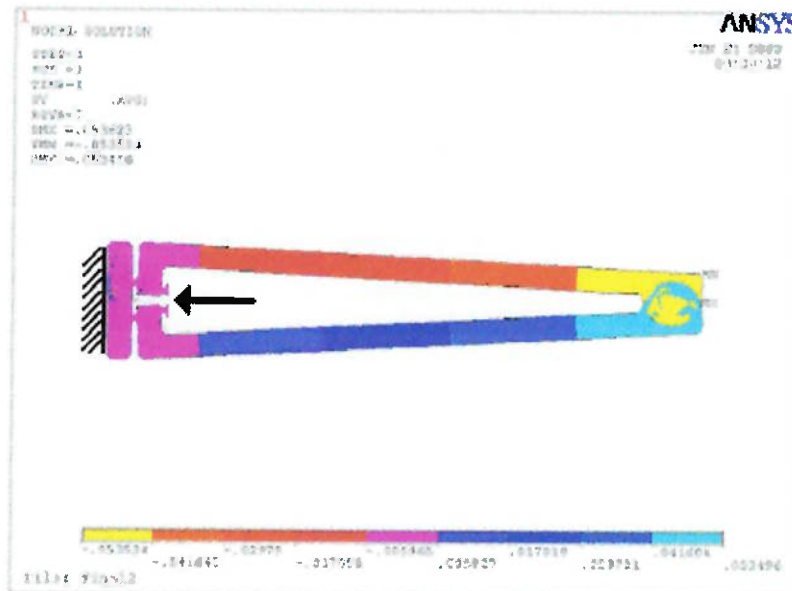


Figura 4.4 – Alavanca simples.

Incluiu-se então o *stack* piezelétrico nas simulações e, com isso, a amplificação gerada anteriormente caiu drasticamente, aparentemente por duas razões:

- O *stack* piezelétrico é capaz de ter um deslocamento na ordem de 5 μm quando a tensão é de 30 V e ele está sem carga. Carregado, porém, seu deslocamento cai.
- O fato de o *stack* estar colado na estrutura impunha nas simulações uma restrição na direção “y” que não era considerada ainda.

Visando diminuir estes problemas, uma estrutura adicional foi colocada no mecanismo (figura 4.5). Os resultados tiveram uma melhora significativa.



Figura 4.6 – Domínio Viável utilizado sendo que as restrições estão indicadas por triângulos, o *stack* está indicado pela região sombreada e o deslocamento desejado, pela flecha.

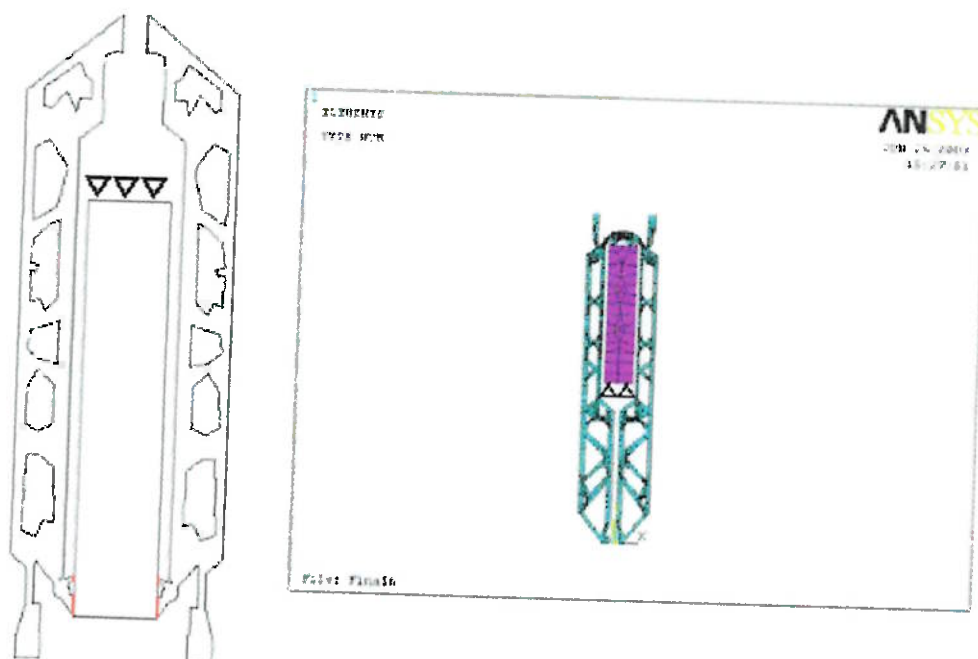


Figura 4.7 – Dois bons resultados da otimização topológica. Nessas figuras o *stack* é representado pela região retangular e fixados nos pontos indicados pelos triângulos (Solução adotada é a estrutura da esquerda).

Através da otimização topológica a micro-garra atingiu um fator de amplificação em torno de 40. Apesar dos bons resultados verificados, o resultado da

OT escolhido (ver desenho esquerdo acima) tinha a desvantagem de colocar em cisalhamento a cera de abelha que realiza a conexão entre o stack e a estrutura. A solução foi então interpretada levando este fato em consideração e as restrições impostas pelo método de fabricação³. Com a interpretação observou-se uma pequena queda no fator de amplificação novamente para 30.

Com a definição da estrutura, pôde-se estimar qual tensão deveria ser aplicada à cerâmica do ANSYS para que a mesma deslocasse $5\mu\text{m}$. Para uma tensão teórica de 17 MV na cerâmica do modelo em Ansys obteve-se esse deslocamento esperado (figura 4.8), que corresponde ao valor do stack definido por NADER(2002).

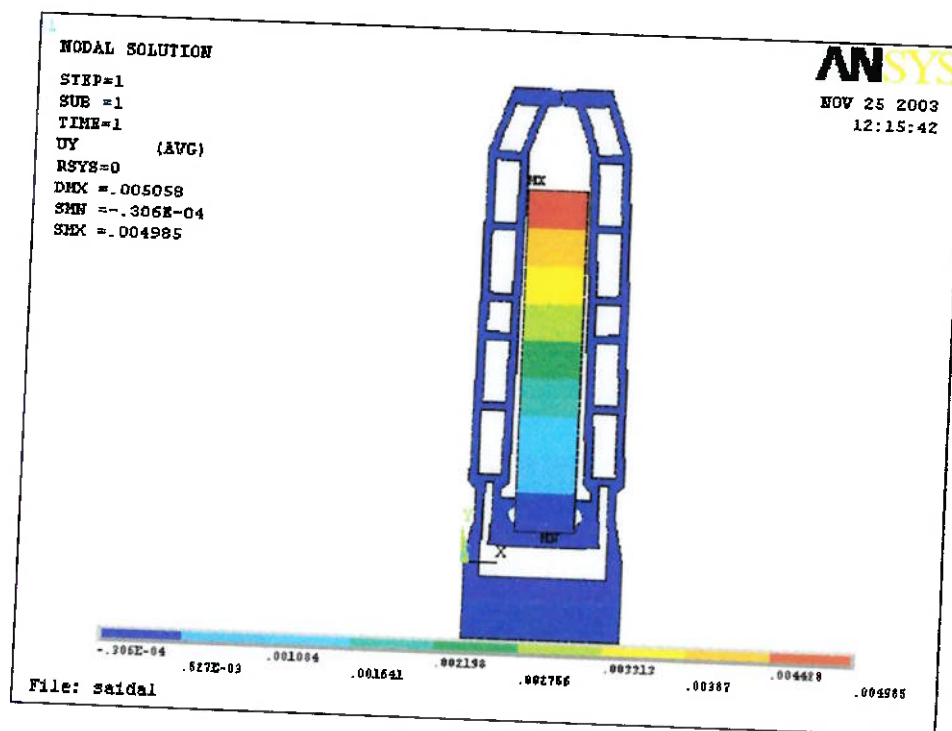


Figura 4.8 – Verificação do Deslocamento Vertical do Stack Piezelétrico cerâmica a 17 MV. (deslocamento de $5\mu\text{m}$ similar ao observado por NADER(2002) no stack a 30V)

Abaixo a figura 4.9 mostra o resultado da simulação de deslocamento em “x” para a estrutura interpretada. A figura 4.10 mostra as tensões equivalentes de von Mises para o mesmo caso.

³ O Método EDM de fabricação possui resolução mínima de 0,5 mm

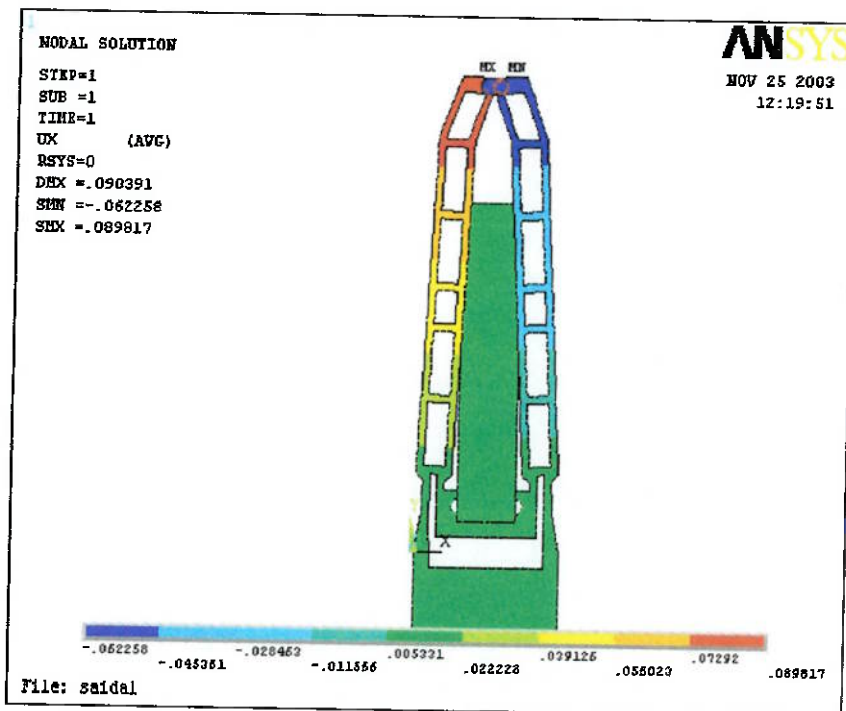


Figura 4.9 – Simulação da Estrutura com Novo Contato entre Garra e Piezo.

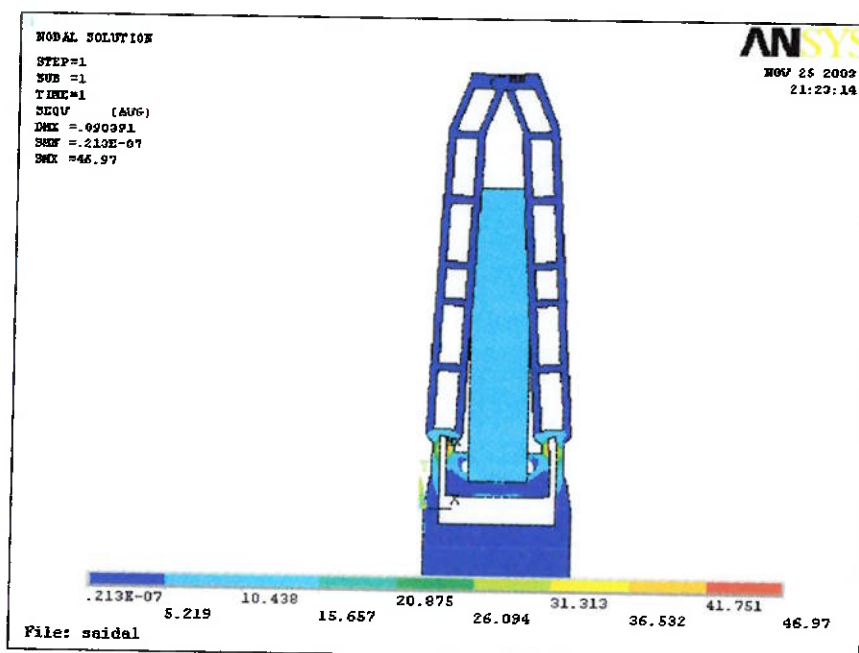


Figura 4.10 – Tensões Equivalentes de von Mises para a nova Estrutura.

Além disso, foi definida a ação de um parafuso regulador que poderia aumentar o universo de operação da micro-garra para manipulação de objetos ainda menores. A figura 4.11 ilustra o ponto da estrutura em que foi idealizada a ação do

parafuso. Essa ação é modelada no Ansys como um deslocamento de $35\mu\text{m}$. A figura 4.12 mostra os deslocamentos em “x” obtidos com o uso do parafuso e a figura 4.13 mostra as tensões equivalentes de von Mises para esse caso.

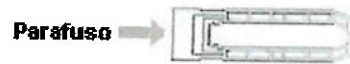


Figura 4.11 – Ponto de Ação do Parafuso Regulador

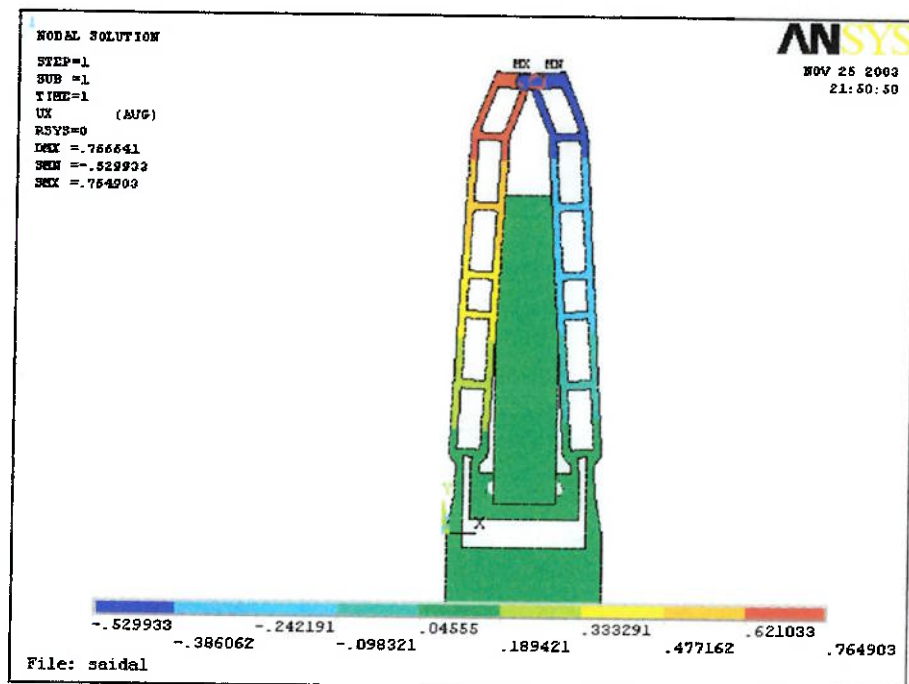


Figura 4.12 – Deslocamentos para a nova Estrutura. Sob Ação do Parafuso Regulador.

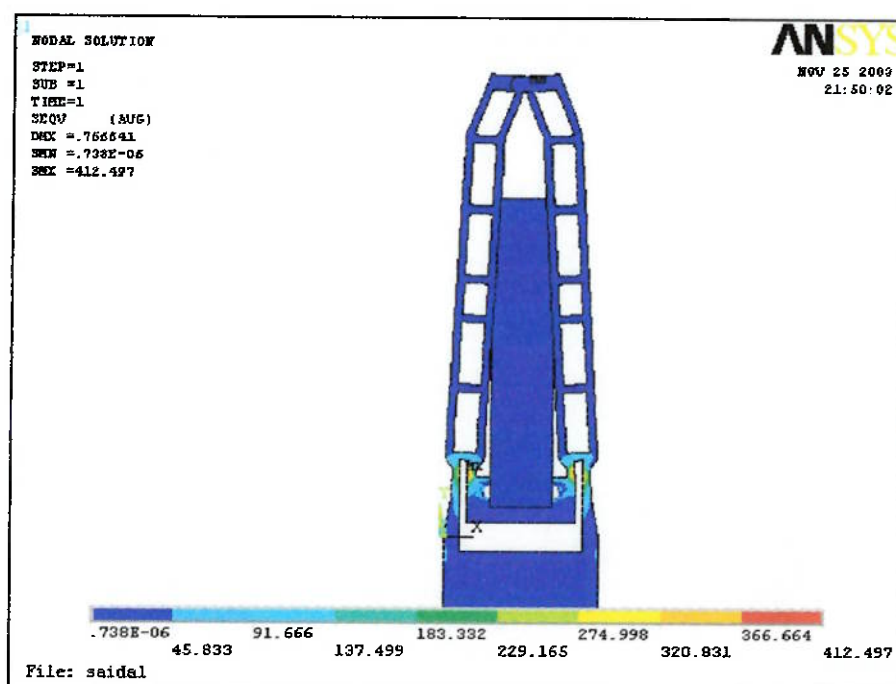


Figura 4.13 – Tensões Equivalentes de von Mises para a nova Estrutura sob Ação do Parafuso Regulador.

Como visto na figura, a tensão equivalente pode atingir algo em torno de 400MPa em um ponto crítico da estrutura. Assim, o uso do parafuso regulador deve ser feito com muita cautela, para não causar escoamento de algum ponto da estrutura.

4.4. PROCESSO DE FABRICAÇÃO EDM

A usinagem por descargas elétricas (EDM – Electro Discharge Machining) foi inicialmente desenvolvida por B.R. e N.I. Lazarenko na Rússia em 1943 e consiste num processo onde dois eletrodos são utilizados para produzir uma faísca. O anodo (eletrodo positivo) é a própria peça e o catodo é a ferramenta, com molde negativo da forma que se espera obter. Os dois eletrodos na verdade nunca entram em contato, com um pequeno espaço existindo entre eles, geralmente mantido por ajuda de um controle por computador. Os dois eletrodos são submersos em um fluido dielétrico, possibilitando a descarga, esfriando a ferramenta e a peça e removendo qualquer resíduo. A resistência do fluido dielétrico é crucial na produção de um bom acabamento uma vez que ele controla a frequência da descarga.

A descarga é produzida por uma corrente D.C. que é conectada aos dois eletrodos e percorre o fluido ionizando-o. Energia térmica é produzida em alguns focos localizados de calor e a temperatura geral eleva-se bastante, o suficiente para derreter e vaporizar o material. A ferramenta também sofre erosão e aumento de temperatura. O desgaste da ferramenta é verificado como a razão do material removido da peça e o material removido da ferramenta, e pode variar bastante dependendo da ferramenta utilizada e do material de peça (de 1 a 100). A figura 4.14 mostra um diagrama simplificado do processo EDM.



Figura 4.14 – Esquema simplificado de usinagem por EDM.

Para o caso de fabricação de microestruturas complexas, como no caso do enfoque desse projeto, utilizou-se um método específico do processo EDM que é a EDM por fio. Em vez de usar um eletrodo grande, o EDM por fio utiliza um eletrodo longo e fino (geralmente de bronze) que é constantemente renovado para a produção de faíscas. Isso evita o desgaste excessivo da ferramenta enquanto é utilizada. Em outros aspectos, esse método é exatamente o mesmo do EDM comum. A usinagem por esse método pode atingir precisão de até $2 \cdot 10^{-3}$ in. Contudo, a precisão disponível para a fabricação da estrutura foi de 0,5mm. A figura 4.15 ilustra esse processo.

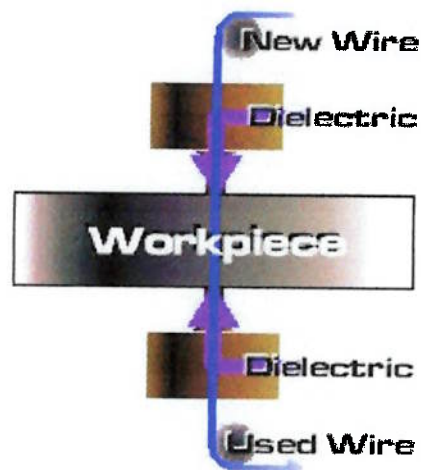


Figura 4.15 - EDM por Fio (Courtesy <http://www.bath.ac.uk/~en9smd/spark.htm>)

As principais vantagens do método para a micro-usinagem são a sua grande acurácia, flexibilidade (podendo criar formas e contornos complexos), além de não danificar a peça por contato. EDM permite a fabricação de estruturas com grande razão de aspecto (*aspect-ratio*) feitas dos mais diferentes materiais produzindo um bom acabamento e sem alterações térmicas, mesmo nos menores contornos.

5. FABRICAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO

5.1 PROJETO DE SISTEMAS AUXILIARES

A micro-pinça projetada consiste em uma estrutura extremamente frágil. De alguma forma ela precisa ser presa a algum dispositivo de fixação para que possa ter sua funcionalidade verificada. Essa estrutura deve ser rígida o suficiente para não se deformar sob a ação do deslocamento piezelétrico, pois esse deve somente deslocar a estrutura da pinça.

Além disso, nas simulações foi idealizada a ação de um parafuso regulador que permitirá um universo de operação consideravelmente maior para o atuador. Para fixar esse parafuso e obter os resultados esperados também se faz necessária uma estrutura auxiliar.

Portanto, no intuito de prover fixação rígida para o *stack* piezelétrico e também permitir a montagem de componentes como o parafuso regulador, foi desenvolvido um dispositivo que pode ser fixado em uma segunda estrutura através de um parafuso M6 com o uso de porca. O desenho desse dispositivo é mostrado na figura 5.1. O parafuso de regulação da abertura da pinça conta com uma rosca M3 no dispositivo.

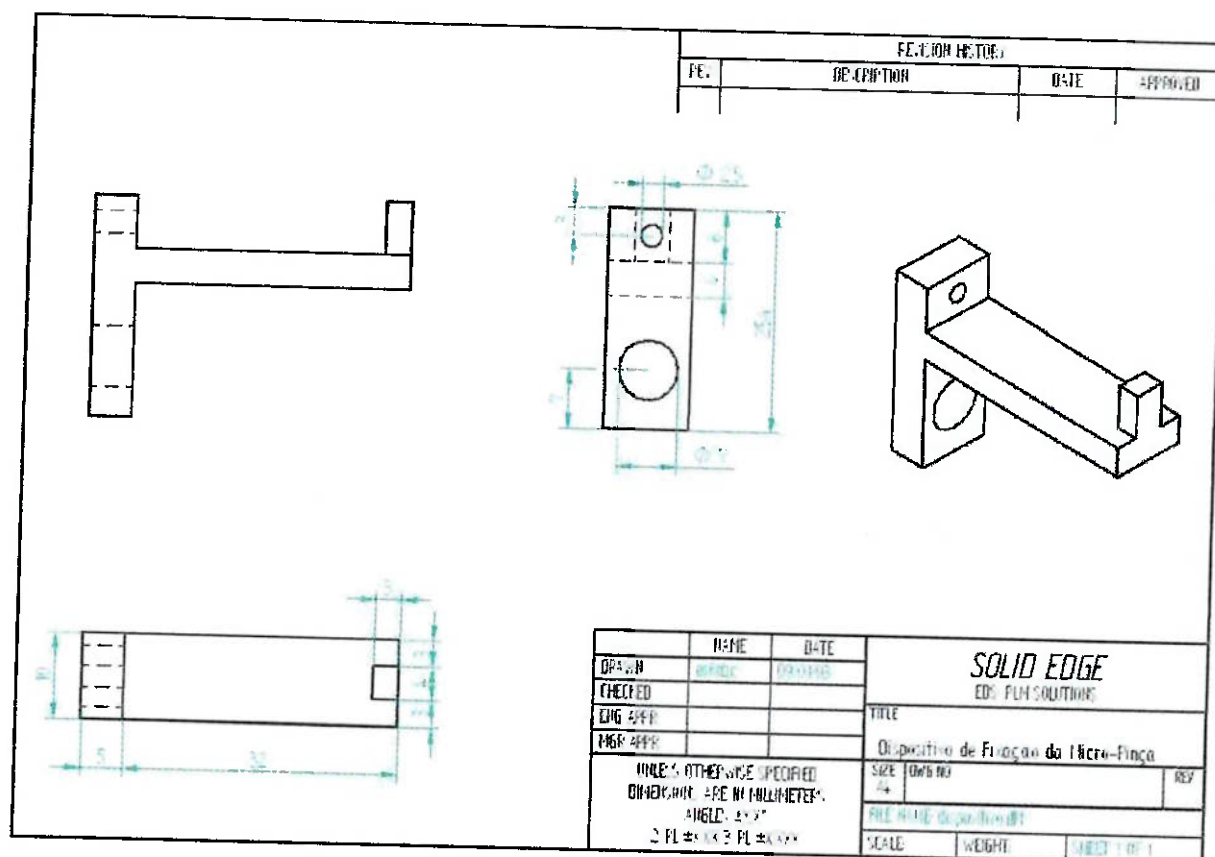


Figura 5.1 – Desenho do Dispositivo de Fixação da Micro-Pinça.

Para a fabricação desse dispositivo, utilizou-se uma barra quadrada de 1pol de aço inox. Inicialmente, a barra foi cortada na largura 10mm com a serra. Após o estabelecimento da largura, as faces superior e inferior foram fresadas para que depois os furos fossem feitos na parede vertical da peça. O furo menor foi ainda vazado por uma rosca M3.

5.2 FABRICAÇÃO DA MICRO-PINÇA

A micro-pinça a ser fabricada é semelhante àquela simulada com máximo deslocamento obtido. Observando a precisão do processo de fabricação por EDM (0,5mm), o modelo otimizado foi adaptado para essa tolerância. O desenho da pinça é mostrado na figura 5.2.

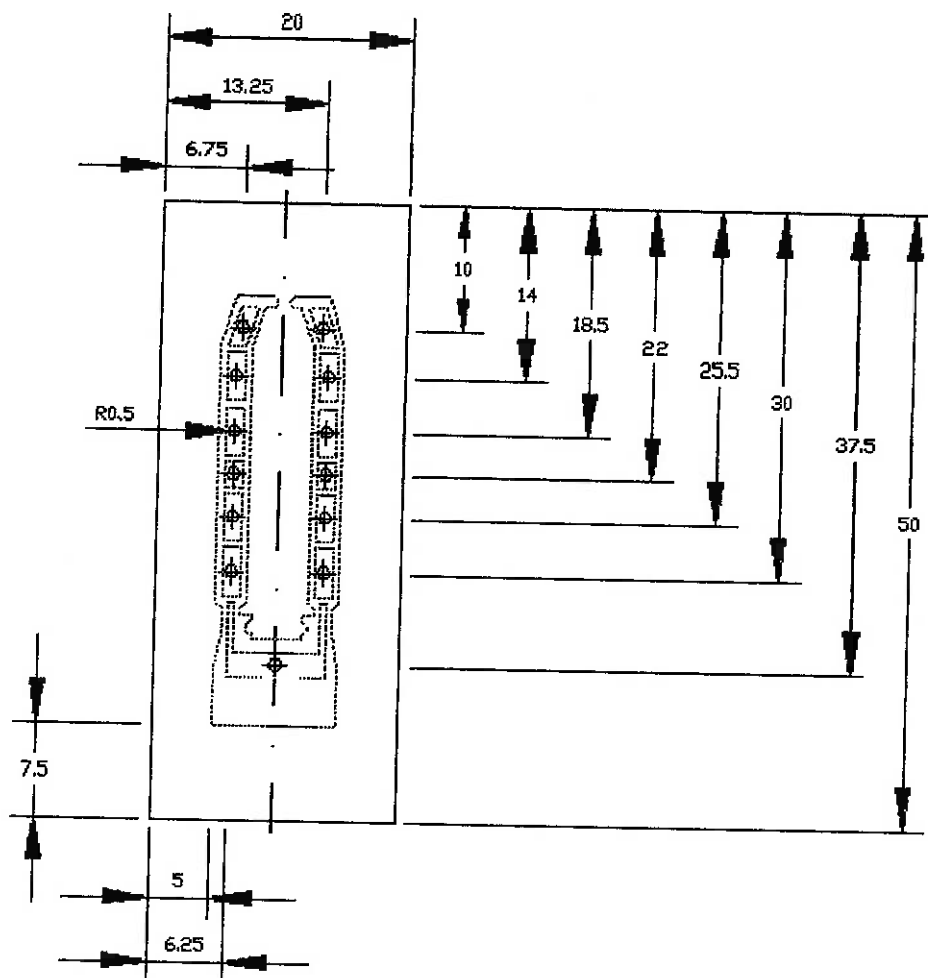


Figura 5.3 – Desenho de Furação da Chapa Inicial de Alumínio

5.3 MONTAGEM DOS COMPONENTES

Nesta fase diversos problemas foram enfrentados. O *stack* inicialmente considerado quebrou-se em dois durante montagem. O projeto continuou com uma das partes quebradas (8 x 4 x 4 mm) que manteve suas propriedades atuadoras, comprovada por testes. Novas simulações foram realizadas considerando agora que a 30 V a estrutura se deformaria 40 % (8 mm / 20 mm) do anteriormente assumido, portanto, 2μm (nova simulação na figura 5.4).

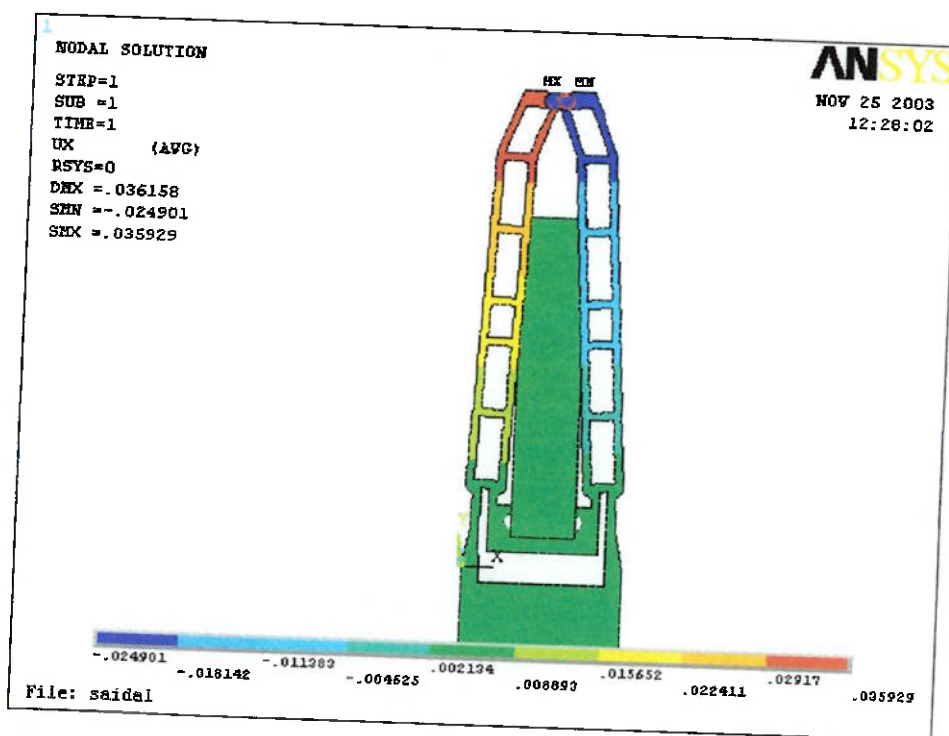


Figura 5.4 – Nova Simulação com *Stack* Menor (deslocamento 2 μm)

Com a micro-pinça e o dispositivo de fixação fabricados, juntamente com o stack piezelétrico, procede-se a montagem desses componentes. Como já dito, a fixação é feita através de cola de cera de abelha. Então, em suma, o *stack* piezelétrico deve ser fixado em uma extremidade à estrutura flextensional (micro-garra) e, na outra extremidade, ao dispositivo de fixação da figura 5.1.

O layout de colagem é mostrado na figura 5.5 a seguir:

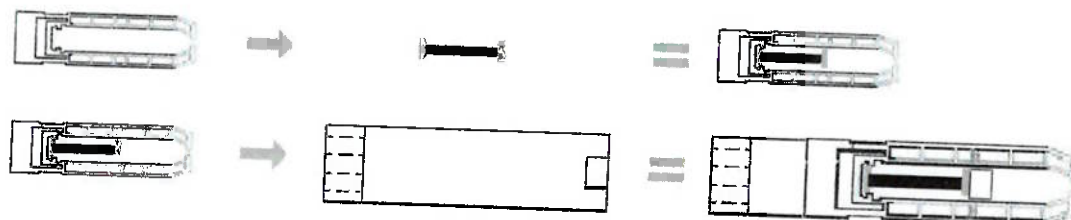


Figura 5.5 – Layout de Colagem dos Componentes.

No entanto, a operação de colagem exige atenção. Como esse material é uma resina, ele não possui rigidez elevada e, se interposto entre a peça e o piezo, pode

absorver energia de deslocamento em deformação. Dessa forma, as estruturas devem ser coladas de modo que a cera circunde a região de contato, porém, o contato em si, deve ser somente entre o piezo e a peça ou dispositivo. Evitando que exista cola entre os contatos, perdas no deslocamento não ocorrerão.

5.4 SISTEMA MONTADO

A figura 5.6 mostra a garra e o dispositivo, ambos fixados ao *stack* piezelétrico. Já a figura 5.7 mostra o sistema preso a um posicionador XY de modo a realizar o controle manual de posicionamento.

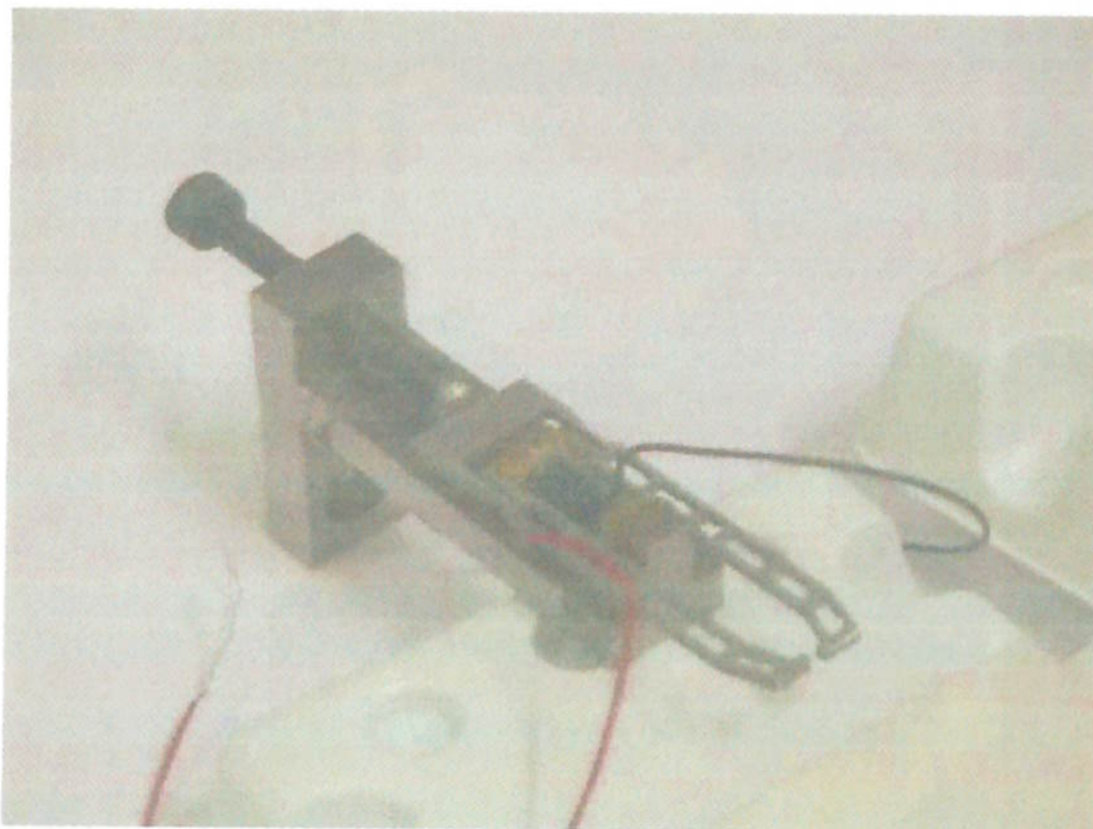


Figura 5.6 – Foto do Sistema Montado

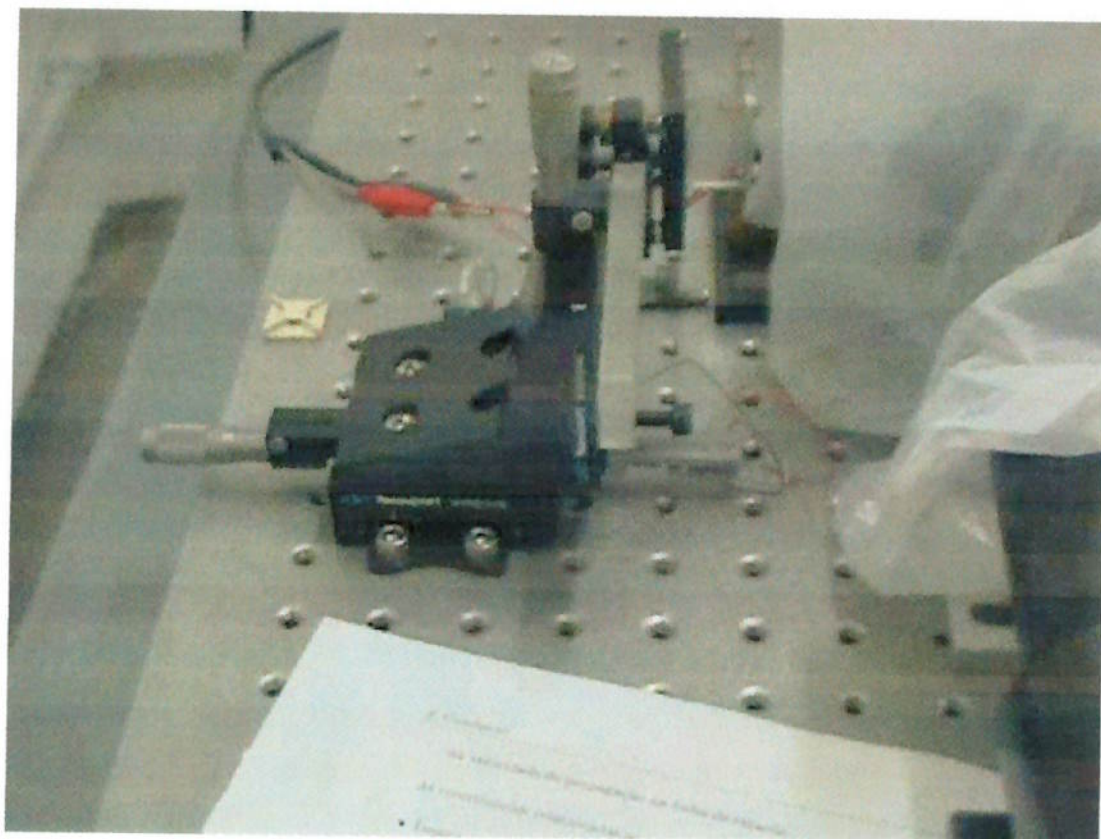


Figura 5.7 – Foto do Sistema Preso a um Posicionador XY.

6. RESULTADOS

6.1. REALIZAÇÃO DO TESTES

Para realizar os testes no sistema, foi utilizado o Laboratório de Microeletrônica (LME). Nesse laboratório, para fazer os ensaios, foi utilizada uma *probe station* dotada de microscópio óptico, câmera CCD e CPU com monitor e televisão para acompanhar o processo (figura 6.1)



Figura 6.1 – *Probe Station* utilizada para a realização dos testes.

Utilizou-se também uma fonte de tensão regulada para fornecer 30V ao sistema. O dispositivo foi fixado à base do microscópio através de fita.

6.2. DESLOCAMENTO MEDIDO

A figura 6.2 mostra a imagem ampliada em 160x o braço da garra. Por projeto, sabe-se que esse braço possui 0,5mm. Dessa forma, a medida verificada nesta figura é relacionada a esse valor. Na figura 6.3 aparece o deslocamento efetivo desempenhado pelo sistema na aplicação de 30V. Assim, a medida desse deslocamento na figura pode ser comparado proporcionalmente à relação estabelecida pela figura 6.2. Em suma, tem-se uma regra de três (eq. 6.1).

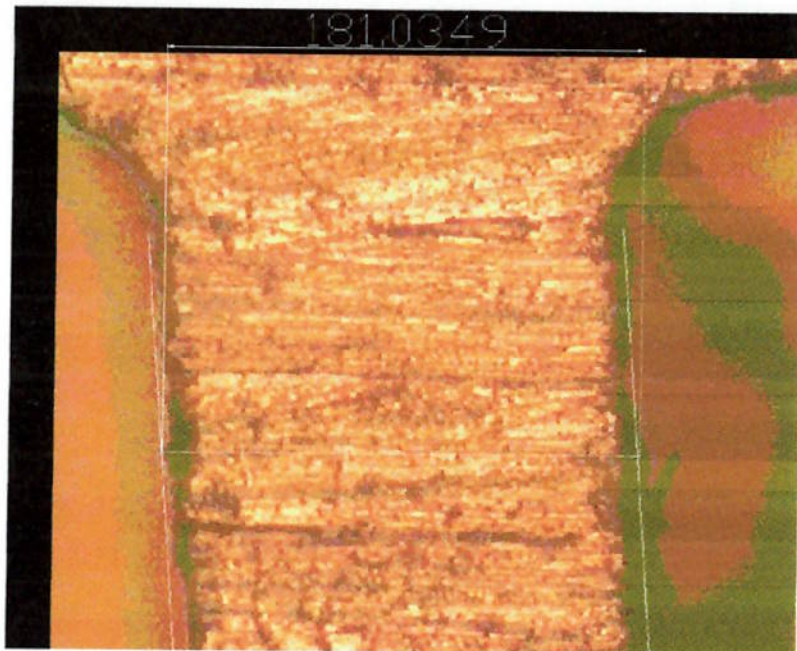


Figura 6.2 – Imagem de um Braço da Garra de 0,5mm de largura.



Figura 6.3 – Deslocamento Medido (Esquerda: Antes; Direita: Depois)

$$\frac{500}{181,035} = \frac{d}{4.0825 + 4,5928} \Rightarrow d = 23,96 \mu m \quad (6.1)$$

Como se nota na figura, é muito difícil estabelecer relações entre os dois instantes visualmente. A figura 6.4 mostra uma ampliação maior (1000x) para o evento, fazendo com que seja melhor observado o deslocamento.

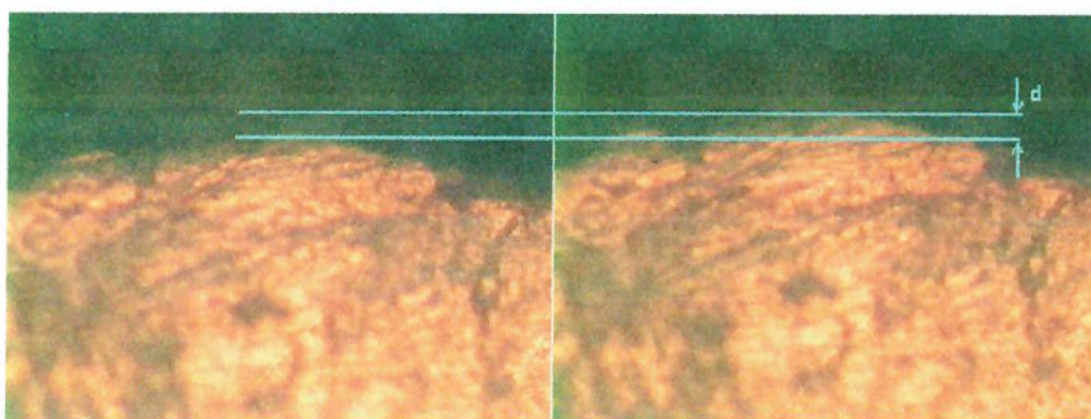


Figura 6.4 – Comparação entre as posições inicial e final.

6.3. ANÁLISE

Algumas observações importantes podem ser feitas quanto aos testes realizados. A primeira foi o baixo deslocamento observado ($24\mu\text{m}$) quando comparado ao deslocamento simulado ($60\mu\text{m}$), gerando portanto um erro de 60%. Como já dito, o stack utilizado possuía comprimento 40% menor que o comprimento do stack nominal assumido por NADER(2002) e que foi a base da estimativa de deslocamento. Como já dito também, utilizou-se para as simulações um valor de 40% desse deslocamento nominal. Ora, com o stack reduzido e possivelmente abalado por sua quebra, esse valor de deslocamento inicial pode ter caído bastante, e dependendo, numa proporção maior do que a redução de seu tamanho.

Uma segunda observação importante a fazer foi quanto ao comportamento transitório da ação da garra. Ao ser aplicada a tensão de 30V, a estrutura rapidamente assumiu a configuração final (fechada). No entanto, ao desligar a alimentação, a garra tomou um longo tempo para restabelecer sua posição inicial. Dessa forma, observou-se um fraco efeito de mola da estrutura, retardando sua ação. Esse problema pode estar relacionado diretamente a alguns fatores. O primeiro seria a observação de um problema já previsto na etapa de montagem, que é a alocação de cola de cera de abelha entre o stack e as estruturas. Essa cola pode estar absorvendo parte do deslocamento e também retardando o retorno da estrutura à posição inicial.

O segundo fator seria o uso do parafuso regulador. Como já previsto nas simulações, o uso do parafuso regulador poderia provocar tensões localizadas muito

altas, o que configuraria um deslocamento plástico nesses pontos da estrutura. Há de se esperar que, se houve uma situação dessas, é facilmente justificável a perda de parte do comportamento elástico da estrutura.

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho tivemos a oportunidade de trabalhar com ferramentas poderosas de engenharia como o método de elementos finitos e o de OT. Realizamos um projeto completo de engenharia da concepção até o teste do protótipo. Nos familiarizamos com EDM e os problemas de um projeto de mecanismo de precisão. Era esperado como resultado do trabalho uma estrutura que amplificasse o movimento do *stack* em algo em torno de 30 vezes, conseguimos porém uma amplificação de 12,5 vezes. Em termos de movimento absoluto as simulações indicavam que o movimento gerado para uma tensão de 30 V no *stack* seria de aproximadamente 150 μm (antes do *stack* se partir). Esta expectativa caiu para 60 μm (com o *stack* partido). Em termos de funcionalidade estas perdas poderiam ser contornadas devido ao parafuso de regulagem.

Apesar de abaixo das expectativas geradas pelo ANSYS em termos de amplificação, a estrutura obteve aproximadamente a mesma amplificação daquela vista em MENCIASSI (1999). Inclusive, em seu trabalho, o método de elementos finitos gerava como fator de amplificação valores entre 30 e 40. Talvez estes resultados possam ser explicados por imprecisões no modelo original. Nenhuma estrutura real é perfeitamente plana. Na prática, observava-se que deslocamentos eram gerados em z pois o microscópio perdia o foco quando a amplificação era grande, e isto se constitui numa perda ineficiente de energia.

Apesar de cuidados terem sido tomados para evitar que a cera de abelha ficasse entre o mecanismo e o *stack*, na prática isto é bem difícil. Os componentes envolvidos são bem pequenos, frágeis e avessos a manipulação humana.

Outro fator importante de ser observado é que as propriedades utilizadas no modelo foram tomadas de livros, em atividades experimentais, porém, é comum a variação destas propriedades. Para que o modelo se aproximasse mais do real seria interessante que ele considerasse alguns dos fatores mencionados, como uma exata

definição do *stack* piezelétrico no ANSYS em vez de uma projeção de deslocamento como foi utilizada.

As simulações aqui realizadas apesar de serem ideais retratam bem somente uma parte da realidade (não modelam bem as perdas do sistema). Nota-se através do ANSYS que a Otimização Topológica realmente melhora o resultado, porém, ela não é essencial ao projeto. O algoritmo utilizado ainda apresenta limitações em modelar uma estrutura flexensional, desde a sua concepção (quanto ao sistema de alavancas, posicionamento do *stack*, etc.) até espessuras variáveis ao longo da estrutura, que acreditaríamos ser o algoritmo ideal. Determinar a melhor posição para o *stack* e suas dimensões influenciam a resposta e no nosso caso não se tinha uma metodologia definida para encontrar esta solução. Um estudo de soluções em três dimensões ou com diferentes materiais que poderiam agregar muito à solução ainda está além das capacidades atuais do programa utilizado.

Em termos de movimentação absoluta o resultado não foi bom. Isto se deve em grande parte à quebra do *stack*. O *stack* é uma estrutura muito frágil, o que gerou problemas de manipulação, resultando em alguns danos como quebra no fio de conexão, na cola que liga as cerâmicas, e na cola que liga o *stack* ao isolante. Estas falhas se tornaram críticas no nosso projeto porque o *stack* é um componente extremamente caro e não produzido no Brasil. Se o sistema como um todo fosse analisado, verificar-se-ia que se não houver uma proteção especial ao *stack*, ele estará bastante suscetível a acidentes devido a essa fragilidade.

Talvez a chave para o sucesso em um projeto deste tipo seja procurar proteger o micromanipulador, inclusive, gerando meios de se efetuar uma montagem mais precisa do protótipo, com risco de danos reduzidos aos componentes envolvidos.

Assim, acredita-se que muito ainda pode ser melhorado e que sistemas de manipulação, como o apresentado nesta monografia, ainda possam ser produzidos em escala comercial, contando para isso com uma maior robustez, uma maior vida dos componentes e melhores resultados de atuação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MENCIASSI, ARIANA; **Microfabricated Grippers for Micromanipulation of biological and Mechanical Objects**, Ph.D.Thesis in Bioengineering, Gennaio 1999.
- [2] CARBONARI, RONNY C. , **Projeto de Atuadores Piezelétricos Flexensionais Usando Método de Otimização Topológica** , Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da USP, São Paulo 2003.
- [3] LOBERTO, G.A., **Desenvolvimento de um Atuador Piezelétrico XY para um Interferômetro**, Relatório I.C. FAPESP, São Paulo, 2003.
- [4] NAKAZAWA, HIROMU; **Principles of Precision Engineering**, 1st Edition, Oxford University Press Inc., New York 1994.
- [5] SPRIT – PROJECT; MINIMAN – **Miniaturized Robot for Micromanipulation** , Public Final Report, March 2002.
- [6] SILVA, E.C.N.; **Otimização Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos, Apostila do Curso**, Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Poli-USP 2003.
- [7] NADER, G.; **Desenvolvimento de Técnicas de Caracterização de transdutores Piezelétricos**, Poli-USP 2002.
- [8] ANDO, Y.; **Micro Grippers** , J.Robotics Mechatronics, 2 (1992), pp.214-217
- [9] BALANDRAS, S.; BASROUR, S.; ROBERT, L.; MEGTERT, S; BLIND, P.; ROUILLAY, M.; BERNEDE, P.; DANIAU, W.; **Microgrippers Fabricated by the LIGA Technique**, Sensor and Actuators A 58 (1997), pp. 265-272.
- [10] THORNEL, G.; BEXELL, M.; SCHWEITZ, J.A.; JOHANSSON, S.; **Design and Fabrication of a Gripping Tool for Micromanipulation**, Sensors and Actuators A 53 (1996), pp. 428-433.
- [11] LIMA,R.L.; **Projeto de Mecanismos Flexíveis Usando o Método de Otimização Topológica**, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da USP, São Paulo 2002.