

ARIEL LAMBRECHT
IGOR FELIZATTI CARNEIRO DA CUNHA

nota final
8,3 (ótimo)
WJM

**SIMULAÇÃO, FABRICAÇÃO E COMANDO DE UM
MICROMANIPULADOR PIEZELÉTRICO XY**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Engenheiro.

São Paulo
2007

ARIEL LAMBRECHT
IGOR FELIZATTI CARNEIRO DA CUNHA

**SIMULAÇÃO, FABRICAÇÃO E COMANDO DE UM
MICROMANIPULADOR PIEZELÉTRICO XY**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Engenheiro

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

São Paulo
2007

DEDICATÓRIA

A todos que contribuíram de forma direta
ou indireta para nossa formação.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Emílio Carlos Nelli Silva, pela presença e contínua supervisão.

Ao Professor Júlio Adamowski, por disponibilizar seus equipamentos.

Ao colegas Andrés Choi e Sandro Luis Vatanabe, pelo auxílio constante.

À Professora Izabel Fernanda Machado, pela cessão do microscópio.

Ao Jovinilo Oliveria Santos, pela ajuda técnica na análise em microscópio.

Aos Amigos, pela presença e companhia nessa longa jornada.

RESUMO

O presente trabalho visa o estudo das etapas de projeto, fabricação e controle de um MEMS (“*Micro-Electro-Mechanical System*”) micromanipulador piezelétrico com movimentos nos eixos X e Y. Para tanto, foram elaborados modelos computacionais do atuador com a finalidade de realizar uma análise em elementos finitos. Foi implementado um comando para o posicionador, do tipo *Joystick*, controlado por computador através do software Matlab®. Atuadores Piezelétricos oferecem uma solução para trabalhos de posicionamento que requerem alta acurácia, velocidade e resolução. Os movimentos resultantes da conversão de energia elétrica em energia mecânica pelos materiais piezelétricos são extremamente precisos, sendo uma característica importante para aplicações de nanopositionamento e micromanipulação. O dispositivo consiste essencialmente em uma estrutura multiflexível atuada por duas piezocerâmicas. A estrutura multiflexível age como um transformador mecânico amplificador mudando o sentido dos deslocamentos da saída da piezocerâmica. A fabricação do dispositivo se deu utilizando o método de fotolitografia realizado por empresa especializada, seguindo o projeto desenvolvido neste trabalho.

Palavras-chave: microposicionador piezelétrico, MEMS, nanoposicionador, CAE, fotolitografia, comando GPIB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Microposicionador simplificado com alta interferência de movimentos	6
Figura 1.2 - Modelo atuado por alavancas	7
Figura 1.3 - Modelo de estrutura complexa	7
Figura 1.4 - Microatuador piezelétrico monolítico.....	8
Figura 1.5 - Micromanipulador piezelétrico	8
Figura 1.6 - Microposicionador piezelétrico	9
Figura 2.1 - Efeito Piezelétrico: Estado Natural, Estado Distendido e Comprimido...	11
Figura 2.2 - Cristal PZT: Antes da Polarização e Polarizado	12
Figura 2.3 - Processo de Polarização: Antes; Polarização Total; Polarização Permanente.....	12
Figura 3.1 - Configuração de um microposicionador X-Y	26
Figura 3.2 - Projeto em CAD do protótipo	27
Figura 3.3 - Menu ANSYS. Organização da seqüência de passos necessária para realizar a simulação	28
Figura 3.4 - Determinação do elemento SOLID 227	29
Figura 3.5 - Determinação do tipo de elemento (SOLID 45)	29
Figura 3.6 - Propriedades dos materiais	30
Figura 3.7 - Vista frontal da estrutura 3D do microposicionador.....	32
Figura 3.8 - Modelo do microposicionador com os atuadores piezelétricos	33
Figura 3.9 - Vista isométrica da estrutura do microposicionador.....	34
Figura 3.10 - Definição dos atributos dos elementos da simulação	35
Figura 3.11 - Microposicionador discretizado.....	35
Figura 3.12 - Condições de contorno do modelo.....	36
Figura 3.13 - Engastamento da estrutura do posicionador.....	37
Figura 3.14 - Potencial elétrico na estrutura do posicionador	37
Figura 3.15 - Definição da análise estática	38
Figura 3.16 - Seleção da análise modal	39
Figura 3.17 - Definição dos modos de vibrar que serão estudadas.	40
Figura 3.18 - Definição da faixa de freqüências que será estudada.....	40
Figura 3.19 - Plotagem do resultado	41
Figura 4.1 - Esquema da estratégia de comando.....	43
Figura 4.2 - Interface visual da posição dos eixos.....	44

Figura 5.1 - Deslocamentos no eixo Y, devido a aplicação de tensão elétrica na cerâmica paralela ao eixo Y	49
Figura 5.2 - Deslocamentos no eixo X, devido a aplicação de tensão elétrica na cerâmica paralela ao eixo Y	50
Figura 5.3 - Deformação em Y gerada pela atuação das duas cerâmicas	51
Figura 5.4 - Deformação em X gerada pela atuação das duas cerâmicas	51
Figura 5.5 - Tensões de Von Mises para o modelo.....	52
Figura 5.6 - Primeira Harmônica da estrutura	53
Figura 5.7 - Seqüência de Fotolitografia	54
Figura 5.8 - Projeto do protótipo.....	55
Figura 5.9 - Resultado final da construção	55
Figura 5.10 - Aparato montado para testes no LFS	56
Figura 5.11 - Microscópio e suporte adaptado para testes com o atuador.....	57
Figura 5.12 - Saída do atuador observada através do microscópio	58
Figura 5.13 - Controle via Joystick da fonte de tensão.....	59
Figura 5.14 - Imagem do posicionador antes da aplicação de tensão	60
Figura 5.15 - Imagem do posicionador após a aplicação de tensão	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 MOTIVAÇÃO	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1.1 Materiais Piezelétricos	10
2.1.2 Efeito Piezelétrico	11
2.1.3 Equações Constitutivas do material Piezelétrico.....	13
2.1.4 Método dos Elementos Finitos Piezelétrico.....	14
2.2 FABRICAÇÃO DE MEMS.....	18
2.2.1 Deposição de filmes	20
2.2.2 Oxidação.....	22
2.2.3 Ataque Químico	23
2.2.4 Litografia.....	24
3 PROJETO DO PROTÓTIPO	26
3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO PROPOSTO	26
3.2 SIMULAÇÃO DO PROTÓTIPO UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS	27
3.2.1 Passos para análise em MEF.....	28
3.2.1.1 Pré-processamento	28
3.2.1.2 Solução.....	36
3.2.1.3 Pós Processamento.....	41
4 COMANDO DO ATUADOR	43
4.1 ESTRATÉGIA DE COMANDO	43
4.2 ESTRATÉGIA DE FORNECIMENTO DE TENSÕES ELÉTRICAS	45
4.3 INTERFACE GPIB.....	45
4.4 “INSTRUMENT CONTROL TOOLBOX”	46
4.5 INTERFACE ENTRE O MATLAB E O JOYSTICK	47
5 RESULTADOS	49

5.1 SIMULAÇÃO.....	49
5.2 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO	53
5.3 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	56
6 DISCUSSÃO	61
6.1 SIMULAÇÃO DO PROTÓTIPO	61
6.2 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO	62
6.3 INTERFACE DO COMANDO REMOTO DA FONTE DC	62
7 CONCLUSÕES	64

1 INTRODUÇÃO

Atuadores piezelétricos estão se tornando uma tecnologia madura. Existem diversos tipos de atuadores disponíveis (LeLetty, 1998) para as mais variadas aplicações. Estes produtos são baseados em múltiplas camadas de cerâmicas piezelétricas (Dibbern, 1994) que são materiais que sofrem deformações consideráveis quando submetidos a uma tensão elétrica. Essa alteração ocorre de forma aproximadamente linear, alcançando valores de 0,1% com tensões da ordem de 300 Volts.

Existem diversos tipos de microposicionadores piezelétricos. Um dos objetivos principais deste trabalho é definir dentro dessa gama aquele que atende melhor as necessidades do escopo do trabalho. A seguir, alguns exemplos de microatuadores são apresentados.

A Figura 1.1, Figura 1.2 e Figura 1.3 apresentam três diferentes formas construtivas de microposicionadores XY. Esses microposicionadores utilizam estruturas flexíveis com o intuito de gerar o deslocamento necessário de maneira acurada. O elemento piezelétrico que é utilizado como atuador monomorfo é fixado por uma dobradiça do tipo “Moonie” (Silva et. al., 2000) presa à base.

Para gerar movimentos em escala nanométrica não é possível utilizar mecanismos tradicionais, como juntas, pinos e guias, pois as folgas presentes nestes mecanismos tornam a obtenção de precisão nanométrica algo impossível de se alcançar. Por esse motivo, esses microposicionadores têm seu projeto baseado em estruturas flexíveis.

Um dos principais problemas que afetam a precisão de um microposicionador XY com precisão nanométrica é a interferência entre os atuadores nos eixos X e Y, que gera movimentos indesejados, já que o movimento de um dos atuadores gera o deslocamento de toda a estrutura. Assim, por exemplo, um deslocamento no atuador Y, gera um movimento no eixo X. No caso das estruturas em paralelogramo, o problema da interferência é contornado através da utilização de juntas flexíveis, que atuam como molas, dando uma maior mobilidade à estrutura, como mostra a Figura 1.2 e Figura 1.3.

O princípio básico de funcionamento é a aplicação de uma tensão elétrica a uma das extremidades do elemento piezelétrico fazendo com que este se expanda ou contraia. Nos dois primeiros pares de mecanismos na forma de paralelogramo

anexados a uma estrutura do tipo "Moonie" são então dispostos perpendicularmente uns aos outros com o intuito de se realizar um movimento linear na junta de saída ao longo dos eixos X e Y.

O princípio de funcionamento de cada um dos três tipos de atuadores é apresentado a seguir, a principal diferença no projeto de cada um deles diz respeito à forma de evitar interferência entre os atuadores nos eixos X e Y

O modelo 1 (Figura 1.1) é o mais simples e por isso apresenta a maior interferência, entre os movimentos. Observe que os atuadores piezelétricos (PZT) estão indicados nas figuras.

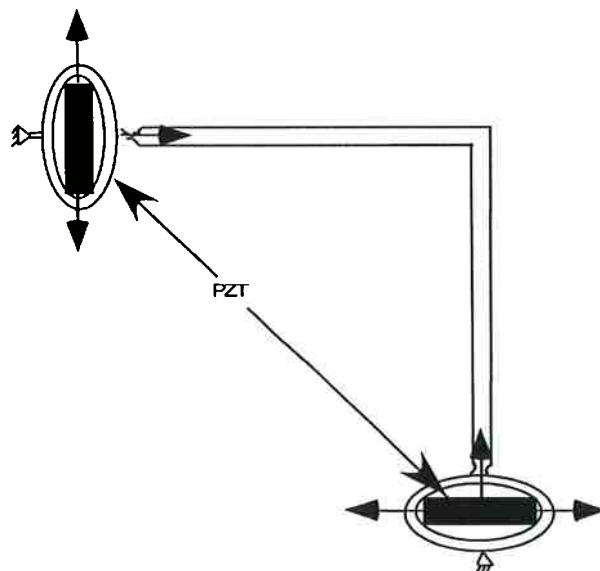


Figura 1.1 - Microposicionador simplificado com alta interferência de movimentos

A alternativa apresentada para diminuir este problema é a utilização de 4 juntas flexíveis colocadas nas barras que ligam o "Moonie". O modelo 2 (Figura 1.2) possui 6 juntas com a mesma finalidade e também utiliza uma alavanca para amplificar o movimento.

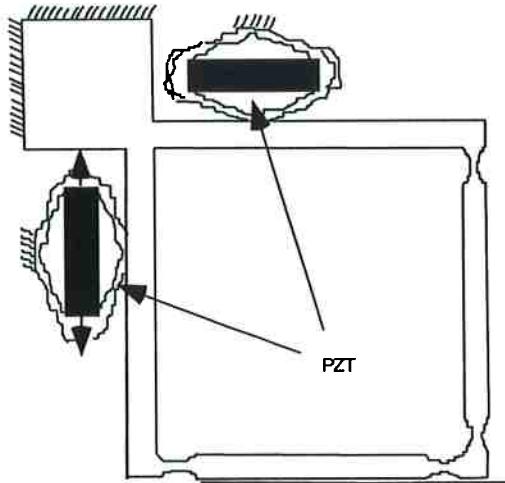


Figura 1.2 - Modelo atuado por alavancas

Finalmente, o modelo 3 (Figura 1.3) é o mais complexo apresentando quatro atuadores piezelétricos acoplados diretamente à estrutura. Ele possui sistema de amplificação baseado em alavancas e um sistema de diminuição de interferência através da utilização de barras finas.

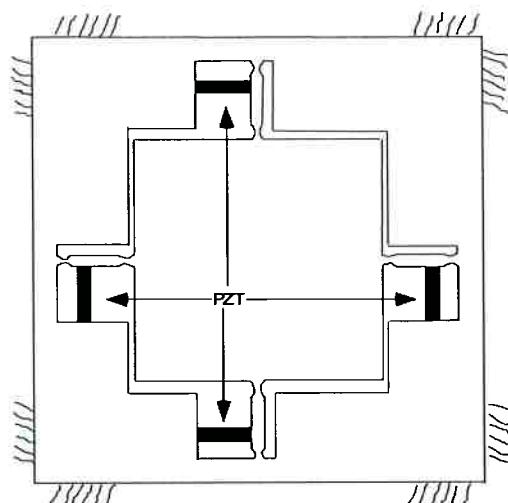


Figura 1.3 - Modelo de estrutura complexa

A Figura 1.4 apresenta um microposicionador que é cortado diretamente de uma parte inteiriça de cerâmica piezelétrica, mais conhecido como atuador piezelétrico monolítico (APM). As dimensões típicas são $25 \times 21 \times 1$ mm³ para uma área de posicionamento de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$.

O atuador consiste em duas pontes flexíveis monoliticamente fabricadas. O APM é cortado de forma que as partes atuadoras, os elementos de suporte e as dobradiças

sejam arranjados para amplificar o movimento. Os eletrodos devem possuir caminhos, que resultam em regiões que podem ser seletivamente ativadas ou desativadas.

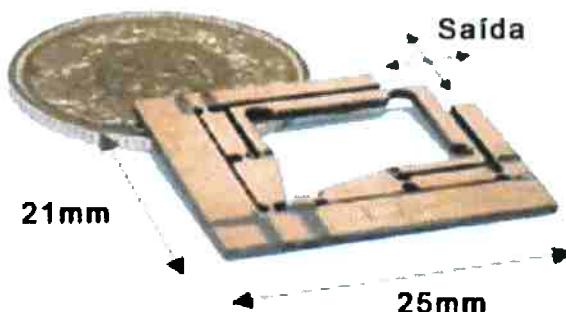


Figura 1.4 - Microatuador piezelétrico monolítico

A Figura 1.5 e Figura 1.6 apresentam um micromanipulador e um microposicionador respectivamente, construídos através de processo de otimização topológica. O primeiro caso apresenta um micromanipulador e o segundo um microposicionador. A atuação é realizada através das cerâmicas piezelétricas apresentadas, essas são fixadas nos atuadores gerando os movimentos necessários para pegar e posicionar o elemento desejado.

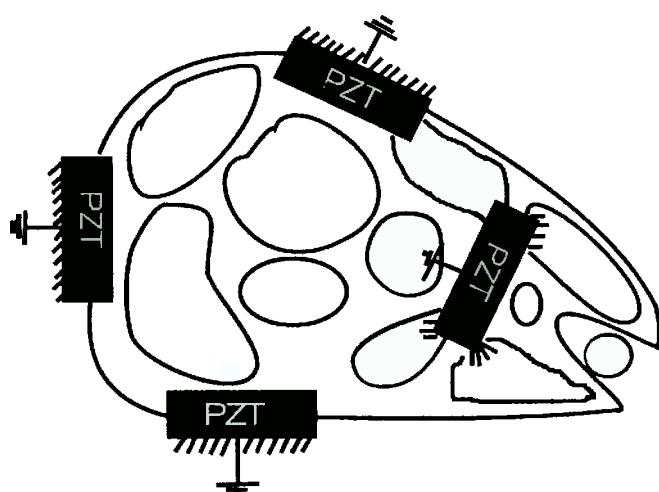


Figura 1.5 - Micromanipulador piezelétrico

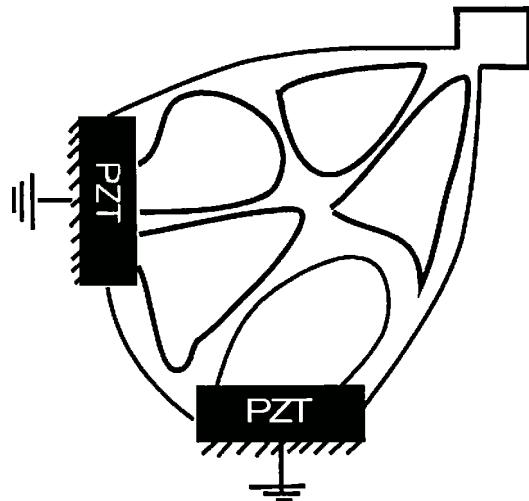


Figura 1.6 - Microposicionador piezelétrico

1.1 MOTIVAÇÃO

Os materiais piezelétricos podem ser facilmente integrados nos mais variados atuadores. A motivação do presente trabalho é proveniente do crescente número de aplicações de micromanipuladores piezelétricos. Eles oferecem algumas vantagens importantes em relação à tecnologia eletromagnética padrão, tal como a movimentação direta de pouca carga com excelente precisão, menor custo de produção, maior produtividade, tempo de resposta rápido, baixo consumo de potência, operação não-magnética, robustez entre outros.

Existem diversos campos de aplicação para estes mecanismos posicionadores. Eles têm sido largamente utilizados para atividades onde seja necessária a manipulação e o posicionamento de peças com movimento da ordem de micrometros tal como sistemas ópticos e equipamentos nas áreas de microeletrônica, aeroespacial, manufatura e a bioengenharia. Nesta última, este equipamento é utilizado na manipulação de células.

O presente trabalho visa à realização do projeto, a construção e o comando de um protótipo de microposicionador piezelétrico que atue nas direções X e Y. Para tanto, o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi utilizado para modelar e simular os atuadores piezelétricos lineares. O protótipo foi construído através da utilização de técnicas de fotolitografia. Paralelamente, elaborou-se um controle remoto via Joystick acoplado a um computador para comandar o microposicionador. O conjunto foi testado para a validação dos modelos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVISÃO DA LITERATURA

2.1.1 Materiais Piezelétricos

Os materiais piezelétricos reagem quando sujeitos a tensões elétricas aplicadas em seus terminais se expandindo ou se contraindo. Esta atribuição faz com que esse tipo de material seja amplamente utilizado nas mais diferentes aplicações, entre elas, pode-se citar acelerômetros, sensores de pressão e força, transdutores de ultra-som, atuadores e microposicionadores. Os dois últimos são o foco deste trabalho.

Atuadores piezelétricos são constituídos basicamente de duas ou mais cerâmicas piezelétricas interligadas por uma estrutura metálica. Existem diferentes formas de movimentação de atuadores piezelétricos e estas são consequência do formato e da configuração da estrutura utilizada. Além desta característica, a configuração também determina as freqüências de ressonância, o perfil de deslocamento e outras características que descrevem as especificações do projeto de um atuador piezelétrico. O acionamento deste tipo de atuador é geralmente realizado através da excitação das cerâmicas piezelétricas com tensões que provocam a deformação de parte da estrutura, gerando assim a movimentação linear do atuador.

Atuadores Piezelétricos (PZTs) são conhecidos por serem excelentes transdutores de posição. Estes atuadores são largamente usados em muitas aplicações da precisão. PZTs são vendidos em diferentes formas (tubos, discos e placas), apresentam baixo custo e são de fácil utilização. Sua instalação é simples: Basta colá-los às peças que se quer mover (espelhos, fibras) e conectá-los ao amplificador.

2.1.2 Efeito Piezelétrico

O efeito piezelétrico é a transformação de energia elétrica em energia mecânica causada pela expansão ou contração do cristal piezelétrico quando este é sujeito a uma determinada tensão elétrica.

Este fenômeno foi primeiramente observado pelos irmãos J. Curie e P. Curie. Eles constataram que quando determinados cristais eram sujeitos a um dado campo elétrico, tensões mecânicas e forças podiam ser observadas. A este fenômeno dá-se o nome de efeito piezelétrico. A Figura 2.1 mostra o efeito de polarização piezelétrica, que produz distensões ou contrações, conforme a polarização aplicada.

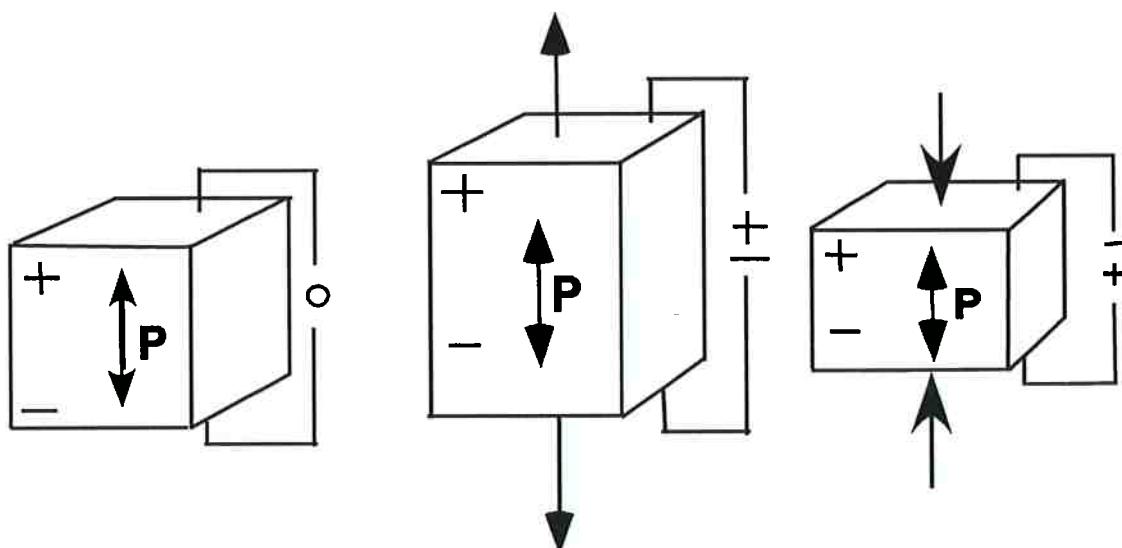


Figura 2.1 - Efeito Piezelétrico: Estado Natural, Estado Distendido e Comprimido

Materiais encontrados na natureza e que apresentam esse tipo de efeito, como, por exemplo, o quartzo, não podem ser utilizados para aplicações em Engenharia, pois o efeito piezelétrico ocorre de forma muito pouco intensa neste tipo de material. Por este motivo, novas cerâmicas ferroelétricas policristalinas foram desenvolvidas. Entre estas, podem-se citar como exemplos o Titânio de Bário (BaTiO_3) e o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) que aumentam as propriedades piezelétricas após passarem por um processo de polarização. Este processo consiste basicamente em passar estas cerâmicas da sua forma natural Cúbica de Face Centrada (estrutura isotrópica) para a Tetragonal (estrutura anisotrópica), como mostra a Figura 2.2.



Figura 2.2 - Cristal PZT: Antes da Polarização e Polarizado

Pode-se observar na Figura 2.2 que a separação entre as cargas positivas e negativas é a fonte do comportamento de dipolo elétrico. Antes do processo de polarização, esses dipolos estão dispostos aleatoriamente orientados dentro do PZT. O principal objetivo desse processo é produzir uma polarização permanente no piezelétrico, uma vez que esses dipolos podem ser facilmente orientados com a aplicação de tensão. Primeiramente aplica-se uma diferença de potencial gradualmente progressiva na direção e sentido desejados. De acordo com a tensão aplicada, o material vai se expandindo enquanto os dipolos elétricos vão se alinhando com a direção do campo elétrico gerado. Após a retirada dessa tensão, para qualquer tensão que gere um campo elétrico menor que o campo elétrico necessário para essa polarização completa, a cerâmica terá uma polarização permanente, caracterizando-a como um material piezelétrico, como mostra a Figura 2.3.

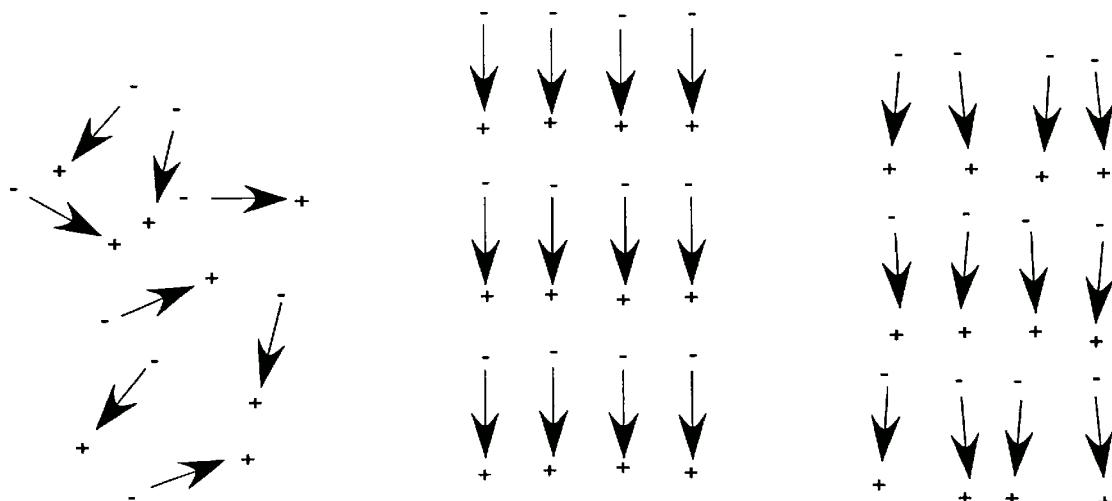


Figura 2.3 - Processo de Polarização: Antes; Polarização Total; Polarização Permanente

2.1.3 Equações Constitutivas do material Piezelétrico

Os materiais piezelétricos relacionam as variáveis de deslocamento elétrico (D) e campo elétrico (E) com as variáveis mecânicas deformação (ε) e tensão (T).

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

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & e^S \\ e^E & \varepsilon_D^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ E \end{Bmatrix} \quad (1)$$

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 para (1)

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & e^E \\ e & \varepsilon_D^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ E \end{Bmatrix} \quad (2)$$

A matriz em (2) pode ser definida como uma matriz elasto-piezo-dielétrica.

Sejam a matriz elástica de dimensões 6 x 9 constantes elásticas; a matriz piezelétrica de dimensões 6 x 3 e 3 x 6, com 5 constantes piezelétricas; e finalmente a matriz dielétrica de dimensões 3 x 3, com 3 constantes dielétricas, como mostrado abaixo:

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^S \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \\ -E_1 \\ -E_2 \\ -E_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Os valores das constantes elásticas, piezelétricas e dielétricas podem ser obtidos de trabalhos, livros ou artigos. A matriz acima é chamada matriz piezelétrica e é de fundamental importância para simular o comportamento do piezelétrico no software de elementos finitos ANSYS.

2.1.4 Método dos Elementos Finitos Piezelétrico

O método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico que pode ser usado para se obter soluções para uma abrangente variedade de problemas de Engenharia envolvendo análise de tensões, transferência de calor, eletromagnetismo e comportamento de fluidos (BATH, 1992).

A maioria dos problemas em Engenharia são equacionados utilizando-se equações diferenciais. Estas equações são derivadas da aplicação de leis fundamentais ou princípios da natureza para o sistema estudado. A solução exata deste tipo de equação é dada por uma solução homogênea e outra particular. Na primeira utilizam-se as propriedades físicas do sistema em questão, tais como módulo de elasticidade, condutividade térmica, condutividade viscosa, entre outras. Enquanto, na solução particular são levados em conta os distúrbios impostos ao sistema. Esses distúrbios podem ser forças ou momentos externos, variações na temperatura ou na pressão, etc. Desta forma esses dois tipos de parâmetros definem as equações diferenciais: as propriedades físicas do sistema definem a matriz de condutibilidade e rigidez; enquanto os distúrbios definem a matriz de carregamento. As equações diferenciais são de extrema utilidade na modelagem de problemas de Engenharia. No entanto, em muitos casos, o fato de a obtenção da solução exata

não ser possível pode impossibilitar a análise. Por este motivo o MEF aproxima numericamente a solução destes problemas, dividindo o domínio de interesse em pequenas sub-regiões e nós. A solução é exata é então calculada somente para esse ponto, realizando-se uma aproximação entre os pontos da malha.

As aplicações do Método dos Elementos Finitos em estruturas piezelétricas são particularmente usadas para determinar freqüências naturais, modos de vibrar, tensões etc. Dadas as diversas aplicações do MEF na Engenharia, se faz necessário a elaboração de uma formulação que permita flexibilidade de modelo suficiente para qualquer geometria e que caracterize qualquer tipo de material piezelétrico. Por esse motivo é necessária toda uma formulação completa para analisar elementos piezelétricos.

A análise realizada neste trabalho focará suas atenções para a reação do material e da estrutura escolhida para diferentes tensões. LERCH (1990) afirma que para a análise de um elemento piezelétrico no MEF, existem três equações principais: equilíbrio, elétrica e construtiva. A seguir, apresenta-se a derivação de cada uma dessas equações.

A equação de equilíbrio é obtida através da segunda lei de Newton sendo expressa da seguinte forma:

$$\nabla\{T\} = \rho \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial t^2} \quad (4)$$

Onde ρ é a densidade do material e ∇ é um operador dado por:

$$\nabla = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

e $\{u\}$ é o vetor deslocamento, que também pode ser expresso em função dos eixos X, Y e Z:

$$\{\mathbf{u}\} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

A equação que descreve o comportamento elétrico é descrita através da equação de Maxwell, como:

$$\operatorname{div}\{\mathbf{D}\} = 0 \quad (7)$$

Onde o divergente

$$\operatorname{div}(\cdot) = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (8)$$

e onde $\{\mathbf{D}\}$ já foi definido em (2). Essa expressão apresenta o fato de as cargas elétricas no interior das cerâmicas serem nulas. As equações construtivas juntamente com as equações acima, serão resolvidas pela formulação de MEF, porém é importante inicialmente estabelecer as relações entre os componentes dessas equações.

De acordo com OSTERGAARD (1993), LERCH (1990), ALLIK (1970) e NAILLON (1983) o vetor de deformação mecânica $\{\mathbf{S}\}$ pode ser relacionado com os deslocamentos nodais, $\{U_e\}$, através da matriz deformação-deslocamento $[\mathbf{B}_u]$. Similarmente, o campo elétrico $\{\mathbf{E}\}$ pode ser relacionado com o potencial elétrico de cada nó, $\{\varphi\}$, através da matriz campo elétrico-deslocamento, $[\mathbf{B}_\varphi]$. Desta forma:

$$\{\mathbf{S}\} = -[\mathbf{B}_u]\{U_e\} \quad (9)$$

$$\{\mathbf{E}\} = -[\mathbf{B}_\varphi]\{\varphi\} \quad (10)$$

Onde as matrizes $[\mathbf{B}_u]$ e $[\mathbf{B}_\varphi]$, são descritas como:

$$[\mathbf{B}_u] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[\mathbf{B}_\varphi] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para a formulação de MEF, o deslocamento e o potencial são aproximados para cada elemento, sendo dados por:

$$\{\mathbf{u}\} = -[\mathbf{N}_u]^T \{\mathbf{U}_e\} \quad (13)$$

$$\{\varphi\} = -[\mathbf{N}_\varphi]^T \{\varphi_e\} \quad (14)$$

onde $[\mathbf{N}_u]$ é o vetor da função de forma do deslocamento e $[\mathbf{N}_\varphi]$ é o vetor da função de forma do potencial elétrico. É importante ressaltar que $[\mathbf{N}_u]$ e $[\mathbf{N}_\varphi]$ são funções interpoladoras como vista na introdução aos elementos finitos. $\{\mathbf{U}_e\}$ é o vetor de deslocamento nodal para um elemento e $\{\varphi_e\}$ é o vetor de potencial elétrico nodal para um elemento e podem ser descritos como:

$$\{\mathbf{U}_e\} = \begin{bmatrix} U_{x1} \\ U_{x2} \\ U_{y1} \\ U_{y2} \\ \vdots \\ U_{xi} \\ U_{yi} \end{bmatrix}; \{\varphi_e\} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_i \end{bmatrix}$$

(15)

onde i é o número de nós de cada elemento.

ROBERTS (1999), e FRANK (1999) aplicam a formulação de MEF nas equações acima, e obtém uma equação resultante que pode ser escrita em termos do deslocamento $\{U\}$ e do potencial elétrico $\{\varphi\}$ para cada nó, sendo que os esforços mecânicos são expressos em termos de $\{F\}$ e as cargas elétricas de $\{Q\}$, resultando nas equações abaixo.

$$[\mathbf{M}_{uu}] \{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{C}_{uu}] \{\dot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}_{uu}] \{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{u\varphi}] \{\varphi\} = \{\mathbf{F}\}$$

(16)

$$[\mathbf{K}_{u\varphi}] \{\mathbf{U}\} + [\mathbf{K}_{\varphi\varphi}] \{\varphi\} = \{\mathbf{Q}\}$$

(17)

Essas equações podem ser escritas em sua forma matricial da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{M}_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{\mathbf{U}}\} \\ \{\ddot{\varphi}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{U}}\} \\ \{\dot{\varphi}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}_{uu}] & [\mathbf{K}_{u\varphi}] \\ [\mathbf{K}_{u\varphi}] & [\mathbf{K}_{\varphi\varphi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{U}\} \\ \{\varphi\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{F}\} \\ \{\mathbf{Q}\} \end{Bmatrix}$$

(18)

Onde $[\mathbf{K}_{uu}]^e$ é a matriz de rigidez mecânica do elemento e é dada por:

$$[\mathbf{K}_{uu}]^e = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{c}] [\mathbf{B}_u] dV$$

(19)

e $[\mathbf{K}_{u\varphi}]^e$ é a matriz de acoplamento piezelétrico do elemento e é dada por:

$$[\mathbf{K}_{uu}]^e = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{e}] [\mathbf{B}_u] dV \quad (20)$$

e $[\mathbf{K}_{uu}]^e$ é a matriz de rigidez dielétrica do elemento e é dada por:

$$[\mathbf{K}_{uu}]^e = \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{B}_u]^T [\mathbf{e}] [\mathbf{B}_u] dV \quad (21)$$

e $[\mathbf{M}_{uu}]^e$ é a matriz de massa do elemento e é dada por:

$$[\mathbf{M}_{uu}]^e = \rho \iiint_{\Omega_e} [\mathbf{N}_u]^T [\mathbf{N}_u] dV \quad (22)$$

2.2 FABRICAÇÃO DE MEMS

Os MEMS são fabricados a partir de processos de microfabricação, divididos basicamente em dois tipos: microfabricação em volume ("bulk micromachining") e microfabricação de superfície (surface micromachining"). Ambos os processos se iniciam a partir de um substrato, como o silício por exemplo, e serão descritos brevemente a seguir. O presente estudo concentra-se no processo de microfabricação de superfície.

A microfabricação de superfície mantém o substrato inalterado, e adiciona/remove camadas de filmes com padrão desejado sobre a superfície do substrato. Essa técnica fornece uma grande flexibilidade na obtenção de estruturas planas XY (altura e largura), com baixo controle sobre a dimensão Z (espessura).

O processo de microfabricação em volume envolve a remoção de material do próprio substrato de silício a fim de se obter um produto final desejado. Esse processo permite um controle maior sobre a espessura (dimensão Z) com restrição da flexibilidade nas dimensões X e Y.

A microfabricação de superfície envolve deposição, remoção e criação de padrões de filmes finos em um substrato. O substrato geralmente é uma lâmina de silício, por

exemplo, um disco circular, tipicamente de 500 a 1000 μm de espessura e de 3 a 12 polegadas de diâmetro. Para os MEMS, o substrato geralmente tem função apenas de apoio estrutural ou suporte mecânico.

Os processos utilizados nas técnicas de microfabricação podem ser enumerados nos seguintes:

- Deposição de filme
- Oxidação
- Ataque químico ou remoção de material ou corrosão (“Etching”)
- Litografia
- Difusão
- Implantação de íon

A deposição e oxidação são técnicas aditivas, enquanto o ataque químico é subtrativo. O aspecto mais importante da microfabricação moderna é a litografia, técnica na qual se obtém os padrões desejados nos filmes depositados. A difusão e a implantação de íons são meios utilizados para introduzir dopantes nos filmes depositados ou no substrato.

2.2.1 Deposição de filmes

A fim de se depositar filmes para a microfabricação de superfície há quatro técnicas principais que podem ser utilizadas: evaporação, “sputtering”, deposição química de vapor (CVD, do inglês “Chemical Vapor Deposition”) e epitaxial. Todos podem depositar filmes com a espessura variando aproximadamente de 0,1 μm a 4 μm .

- Evaporação: como o próprio nome diz, a técnica de evaporação envolve a deposição do material a ser depositado, denominado “charge”, é aquecido até a sua temperatura de evaporação. O substrato alvo, no qual será feita a deposição é colocado de tal maneira que sua face esteja diretamente alinhado a vista do “charge”. Esse processo é realizado sob vácuo ($\sim 10^{-4}$ Pa) a fim de que o filme depositado resultante contenha poucos contaminantes. Ao se aquecer o suficiente, o “charge” começará a evaporar-se. O material se dispersa radialmente do “charge” e uma porção dele se aloja no substrato.

- Sputtering: nessa técnica, ocorre o bombardeio de um “charge” com íons de alta energia (tipicamente Ar^+). Os íons retiram átomos da superfície do “charge”. O substrato alvo é posicionado de tal maneira que os átomos desprendidos se alojem em sua superfície.
- Deposição química de vapor: ocorre a deposição de filmes através de reações químicas. Os substratos são posicionados dentro de um tubo de um forno circular e são aquecidos com bobinas resistivas (o aquecimento é utilizado para aumentar as taxas de reações químicas). Gases reagentes são lançados dentro do tubo e reagem na superfície do substrato, depositando um sólido reagente. Se as condições apropriadas são satisfeitas, e os gases são escolhidos corretamente, o material desejado será depositado. Obviamente, os materiais que podem ser depositados são limitados pela química.
- Epitaxial: constitui uma técnica de crescimento de cristais. Geralmente, o substrato é um material monocristalino, como, por exemplo, um monocristal de silício. Nessa técnica, este cristal único é estendido. O epitaxial pode ser realizado apenas em materiais monocristalinos e apresenta condições e processos complicados.

Com a finalidade de se comparar as diferentes técnicas de deposição, os seguintes fatores foram utilizados:

- conformidade: refere-se à capacidade de o material se depositar em topologias distintas;
- uniformidade: refere-se à variação na espessura da camada depositada ao longo do substrato;
- contaminação: refere-se à quantidade de materiais indesejados que são introduzidos na camada depositada;
- materiais que a técnica pode depositar;
- tensão residual: tensão entre a camada depositada e o substrato e/ou outros filmes finos. A tensão residual pode ser resultado de: diferença nos coeficientes de expansão térmica entre os vários filmes e o substrato, dopantes e gradientes de contaminação, discordância dos contornos de grão (i.e., nas interfaces filme-filme ou filme-substrato).

A Tabela abaixo mostra a comparação entre as técnicas de deposição:

Técnica de deposição	Conformidade e Uniformidade	Contaminação	Tensão residual	Materiais que podem ser depositados
Evaporação	Pobre	Pobre	Nenhuma	Qualquer material que possa ser fundido em temperatura razoável
Sputtering	Pobre	Pobre	Muito Baixa	Qualquer Material
CVD	Excelente	Boa	Alta	Limitado pela química
Epitaxial	Excelente	Boa	Nenhuma	Camadas monocrystalinas

2.2.2 Oxidação

A oxidação é outra técnica aditiva. A oxidação é realizada colocando-se os substratos em um ambiente oxidante (p. ex. uma mistura de O₂ e H₂O para substratos de silício) e aquecimento. Esse processo pode ser utilizado para depositar até 2µm de dióxido de silício.

Além desta técnica de oxidação usual, também podem ser utilizados óxidos como, por exemplo, o SiO₂ misturados com um agente (algum tipo de solvente volátil) que aumenta a viscosidade do óxido e faz com que esteja com um líquido de elevada viscosidade. Este líquido de viscosidade elevada é depositado sobre o substrato, que é rotacionado a altas velocidades para produzir uma camada uniforme de óxido líquido. O substrato e o óxido são aquecidos e o solvente evapora-se, deixando apenas a camada de óxido. A camada de óxido produzida é pobre em comparação com a obtida a partir da oxidação usual (aquecimento do substrato em um ambiente oxidante); a interface não é tão robusta, e a camada depositada geralmente possui mais contaminantes do que a oxidação comum.

Os óxidos são muito importantes para MEMS porque eles são freqüentemente utilizados como camadas de sacrifício. Uma camada de sacrifício é aquela depositada para o único propósito de criar-se a geometria desejada. Ela é posteriormente removida.

2.2.3 Ataque Químico

O ataque químico é uma técnica utilizada para a remoção controlada de material do substrato e seus filmes finos depositados. Há dois tipos de ataque químico: úmido e seco.

O ataque químico úmido utiliza reagentes químicos líquidos. O substrato é colocado dentro de um reagente e agitado (para se ter uma boa uniformidade da taxa de remoção) por um certo período de tempo. Quando o ataque químico é completado, os substratos são removidos. As taxas de ataque químico são bem conhecidas para muitos reagentes padrões e os materiais com os quais eles devem entrar em contato.

O ataque químico seco tipicamente utiliza íons energéticos para bombardear o substrato, do qual é retirado material com um processo similar ao "sputtering". As taxas de ataque químico seco são menos acuradas.

Os dois aspectos mais importantes do processo de ataque químico são: seletividade e anisotropia. A seletividade de um reagente refere-se à quão seletivo este é para atacar o material em relação a outro. Por exemplo, o HF (ácido fluorídrico), que é um reagente de ataque químico úmido, é extremamente seletivo entre o silício e o óxido; ele irá remover centenas de micrônus de óxido antes de remover um micrônus de silício. A outra característica importante dos reagentes é a sua anisotropia. Um reagente completamente anisotrópico irá remover material em apenas uma direção. Um reagente isotrópico irá provocar remoção em todas as direções com a mesma taxa.

Os processos de remoção individuais irão ser diferentes um do outro em relação à seletividade e a anisotropia. Porém, geralmente é verdadeiro dizer que o ataque químico úmido é muito seletivo e quase completamente isotrópico. Por outro lado, o ataque químico seco é quase sempre não-seletivo, porém muito anisotrópico.

Tipicamente, deseja-se alta seletividade e alta anisotropia. Há técnicas de ataque químico que incorporam aspectos de ambos, úmido e seco. As técnicas são moderadamente seletivas e moderadamente anisotrópicas. Quase sempre, existe uma solução de compromisso com a seletividade e anisotropia.

2.2.4 Litografia

A litografia une processos aditivo e subtrativo a fim de criar os padrões desejados nas camadas depositadas. Muitos processos de fabricação são descritos pelo número de passos de litografia que eles envolvem. Quanto mais litografias, ou máscaras, ou passos, mais difícil é o processo de fabricação.

Há muitos tipos de litografia, incluindo, dentre outros, a fotolitografia (ultravioleta), a ultravioleta profunda (DUV) e por raios-X. A fotolitografia é a mais barata e, portanto, a mais comum na indústria. Porém, os outros três oferecem melhores resoluções. A fotolitografia é o processo abordado neste trabalho, mas todas as técnicas de litografia utilizam os mesmo passos essenciais. Elas diferem apenas no método de exposição.

A litografia pode ser dividida nos seguintes passos:

1. Deposição do Resiste: O substrato é fixado em uma base por sucção através de vácuo e girado em alta rotação. Em seguida, um composto chamado fotoresiste (PR, do inglês “Photoresist”) é adicionado ao substrato em rotação, que é coberto por uma camada altamente uniforme de PR. O fotoresiste é um fluido de viscosidade elevada formado por um composto orgânico sensível à luz e um solvente volátil. O solvente é utilizado para obter-se a viscosidade apropriada. Há dois tipos de resisto: positivo e negativo. Quando exposto a certa radiação, o composto orgânico no resisto positivo muda de forma e se torna mais solúvel. O resisto negativo se torna menos solúvel quando exposto. O resisto positivo é o mais popular para a litografia porque fornece uma resolução melhor.
2. Aquecimento do resisto em baixa temperatura: Os substratos com resisto são então aquecidos à baixa temperaturas por poucos minutos para promover a adesão entre as duas superfícies.
3. Alinhamento da máscara do substrato: Uma máscara contém o padrão que se deseja transferir ao substrato, ou seja, o projeto no plano XY. Ele é composto de um substrato com a finalidade de suporte mecânico que é transparente à exposição de radiação (p. ex., vidro é a camada de suporte para a fotolitografia UV) e uma camada de material com o padrão a ser

transferido, que é opaco em relação à exposição de radiação (p. ex., em uma fotolitografia, uma liga de cobalto é aplicada ao vidro). O padrão na máscara é obtido por outro processo litográfico. Uma vez que a máscara está produzida, ela é depositada sobre o substrato. Geralmente, para se obter uma resolução melhor, um sistema de redução de 10 para 1 é colocado entre a máscara e o substrato (i.e., a imagem é transferida ao substrato é 10 vezes menor que aquela máscara). Podem ser utilizados métodos simples para posicionar a máscara em contato físico com o substrato. A máscara é então alinhada manualmente com o substrato (esta é uma tarefa lenta e representa o maior custo na manufatura em termos de tempo e dinheiro).

4. Exposição do resiste: Uma vez que a máscara e o substrato estão alinhados, uma quantidade controlada de radiação expõe o resiste através da máscara. Apenas as partes de resiste que estão sob a porção transparente da máscara são expostos.
5. Revelação do resiste: Depois da exposição, coloca-se o resiste em contato com um solvente. No caso de resiste positivo, apenas as partes expostas são removidas, enquanto que, nos resistes negativos, as porções não-expostas são removidas.

Através do procedimento descrito acima, um padrão é transferido ao resiste, que em seguida é utilizado como máscara para a deposição do material que constitui o MEMS, ou seja, após a revelação do resiste, é feito o preenchimento dos locais em que o resiste foi sensibilizado (no caso de resiste positivo) e removido. Após a deposição, utilizando solventes químicos, o resiste não-sensibilizado é dissolvido, restando apenas a estrutura desejada. Para se conseguir estruturas mais complexas, esse procedimento é repetido várias vezes.

3 PROJETO DO PROTÓTIPO

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO PROPOSTO

A Figura 3.1 apresenta a estrutura que será adotada neste trabalho.

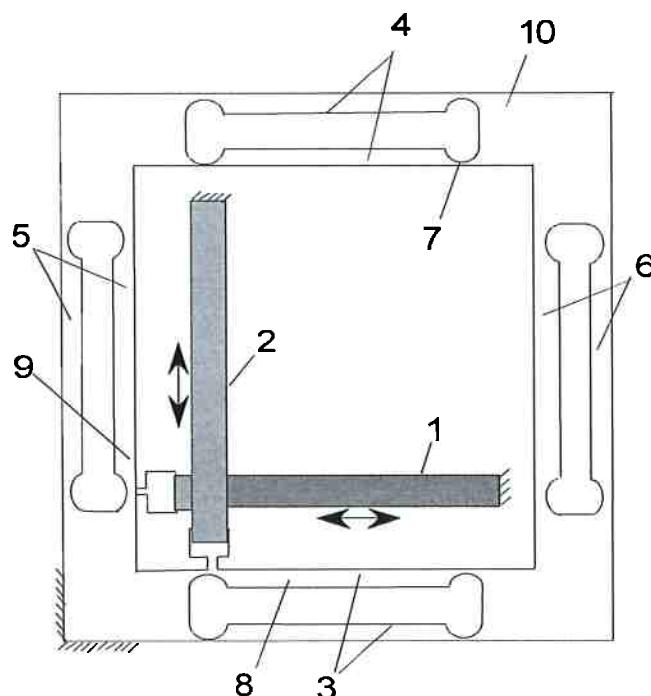


Figura 3.1 - Configuração de um microposicionador X-Y

Na figura os piezelementos são representados pelos números 1 e 2, os mecanismos paralelogramos por 3, 4, 5 e 6, a dobradiça flexível assimétrica por 7, as alavancas por 8 e 9 e a junta de saída por 10

A atuação nesse sistema é obtida através da utilização de cerâmicas piezelétricas, que fornece a esse equipamento elevada precisão e alta eficiência. Os elementos piezelétricos são fixados na base através de juntas flexíveis. Dois pares de mecanismos paralelogramos com juntas flexíveis são organizados paralelamente de forma a tornar possível a realização de movimento nos eixos X e Y na junta de saída. Os atuadores geram altas forças e pequenos deslocamentos (aproximadamente $2 \mu\text{m}$). Através da utilização de amplificadores com elevada relação de redução, o movimento pode ser aumentado em até 100 vezes.

O protótipo foi desenhado em um software de CAD, para posterior fabricação pelo processo de fotolitografia. Na imagem a seguir, observam-se as dimensões do projeto.

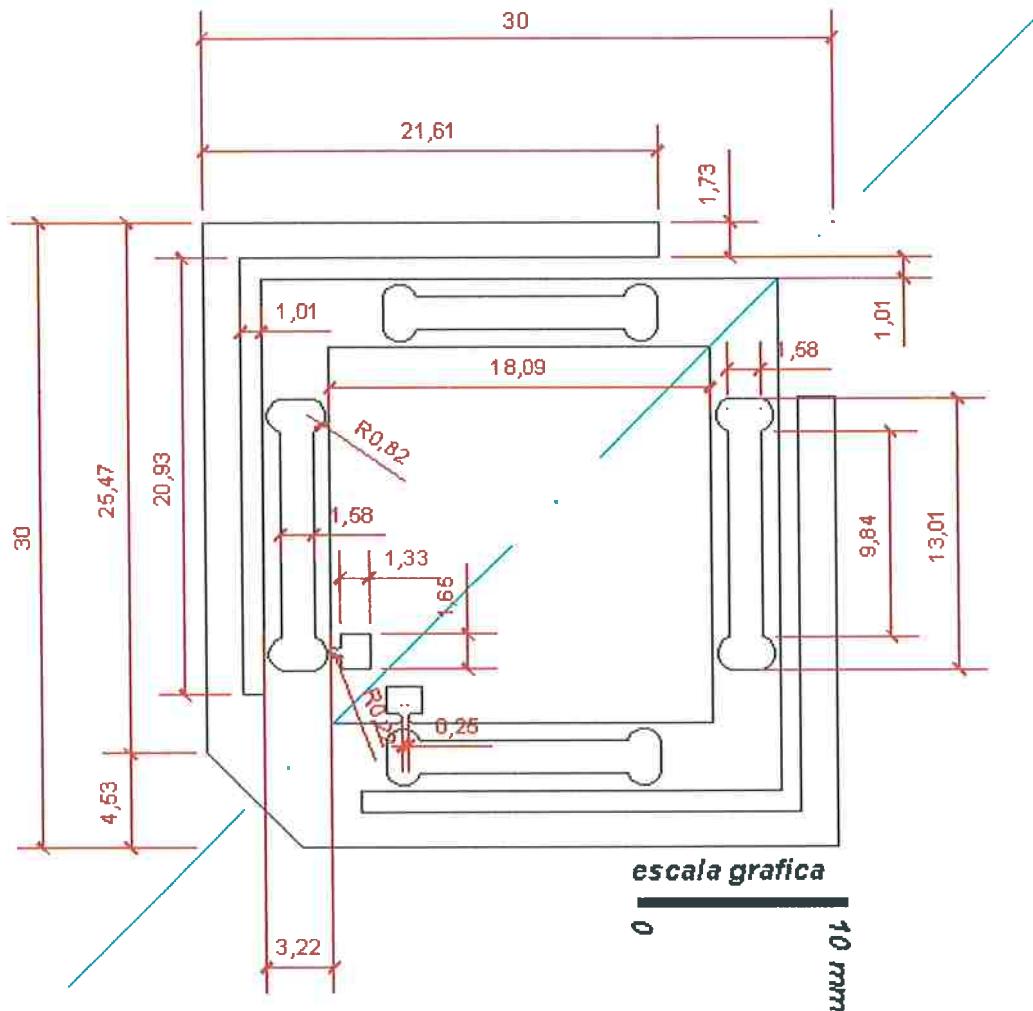


Figura 3.2 - Projeto em CAD do protótipo

3.2 SIMULAÇÃO DO PROTÓTIPO UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS

O objetivo desta etapa é simular computacionalmente atuadores piezelétricos através do Método dos Elementos Finitos utilizando o software comercial ANSYS. A partir dessas simulações, pretende-se obter as características de operação do microposicionador.

O menu principal do software ANSYS é apresentado na Figura 3.3, ele foi desenvolvido de maneira a fornecer todos os passos necessários (na seqüência apropriada) para a construção de um modelo, sendo que as principais etapas a serem realizadas são: o Pré-processamento, a solução e o pós processamento. A seguir apresentamos os passos necessários à construção do modelo.

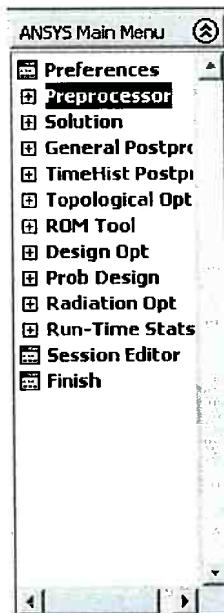


Figura 3.3 - Menu ANSYS. Organização da seqüência de passos necessária para realizar a simulação

3.2.1 Passos para análise em MEF

3.2.1.1 Pré-processamento

- Definição das propriedades dos Elementos

Utilizando a seqüência apresentada pelo software, o primeiro passo do pré-processamento é a definição dos tipos de elementos que serão utilizados na simulação. Esta indicação do elemento estabelece os graus de liberdade que serão estudados, bem como o tipo de discretização que será realizada (em blocos, hexagonal, tetragonal, etc). No modelo que foi construído foram utilizados apenas dois materiais, a cerâmica piezelétrica e o metal da estrutura, que será modelado com as propriedades do cobre. Desta forma, o elemento utilizado para a modelagem

da cerâmica é o elemento SOLID 227 (Figura 3.4), que possui discretização do tipo tetragonal e graus de liberdade de um elemento piezoelétrico (X, Y e Volt).

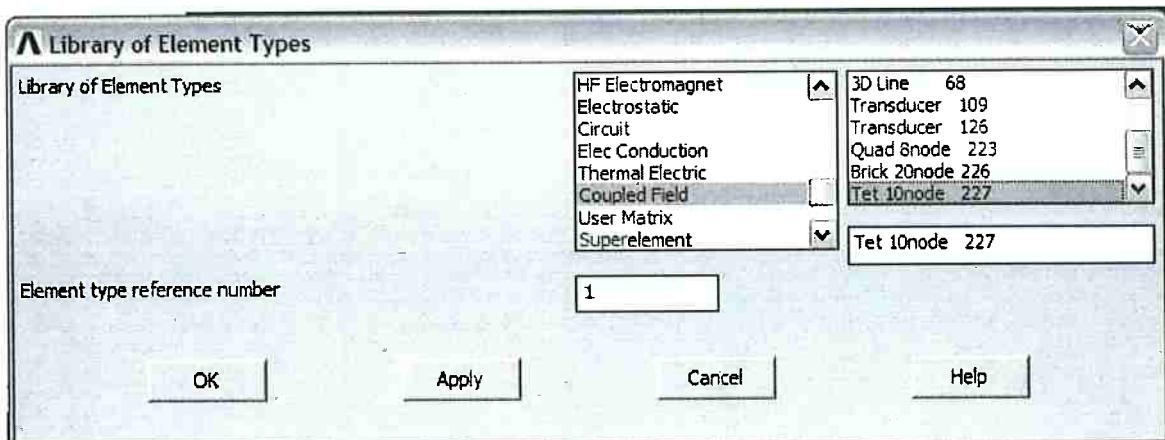


Figura 3.4 - Determinação do elemento SOLID 227

O cobre, por sua vez, será modelado com a utilização do elemento SOLID 45 (Figura 3.5). Ambos os elementos são definidos através do seguinte caminho: **Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete**. A seguir apresentamos a interface de adição de elementos do ANSYS

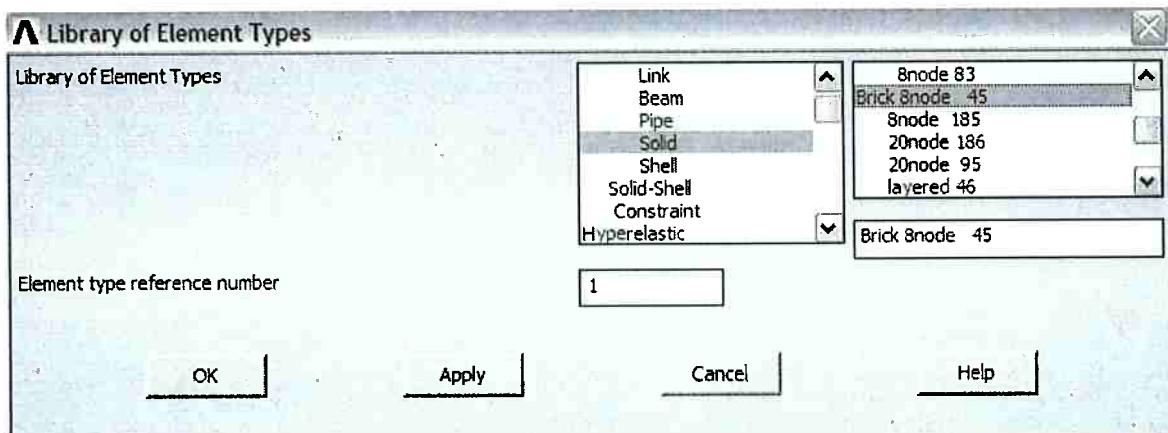


Figura 3.5 - Determinação do tipo de elemento (SOLID 45)

- Definição das propriedades dos materiais

Uma vez definidos os elementos que serão utilizados, é importante estabelecer as propriedades dos materiais. O ANSYS permite a inclusão de modelos de materiais, nos quais o usuário seleciona as variáveis relevantes ao seu estudo. O caminho para se realizar esta análise é **Preprocessor > Material Models > Material > New**

Model. Como pode ser visto na Figura 3.6, definimos dois tipos de modelos de materiais, um para o elemento piezelétrico e outro para o cobre.

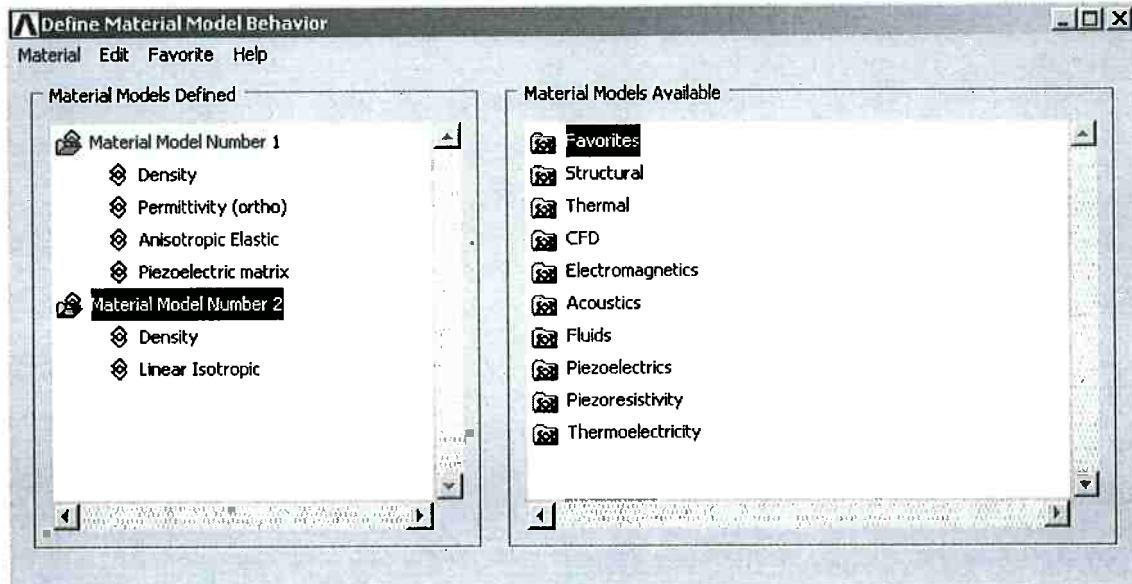


Figura 3.6 - Propriedades dos materiais

Como é possível observar as propriedades relevantes à simulação para a cerâmica piezelétrica são a densidade, a permissividade elétrica, o comportamento mecânico dado pela sua matriz de rigidez e as propriedades piezelétricas, fornecidas na matriz piezelétrica. O cobre, por sua vez necessita apenas de sua densidade e suas propriedades mecânicas. Todos esses valores podem ser encontrados na literatura.

Os valores das propriedades utilizados na simulação são apresentados a seguir:
 Cerâmica piezelétrica:

Densidade:

$$\rho = 7800 \frac{kg}{m^3}$$

Permissividade elétrica:

$$\epsilon_x = 1,5293 \cdot 10^{-8} \frac{F}{m}$$

$$\epsilon_y = 1,379 \cdot 10^{-8} \frac{F}{m}$$

$$\epsilon_z = 1,5293 \cdot 10^{-8} \frac{F}{m}$$

Matriz de rigidez:

$$[c] = \begin{bmatrix} 1,21 \cdot 10^1 & 7,52 \cdot 10^0 & 7,54 \cdot 10^0 & 0 & 0 & 0 \\ 7,52 \cdot 10^0 & 1,11 \cdot 10^0 & 7,52 \cdot 10^0 & 0 & 0 & 0 \\ 7,54 \cdot 10^0 & 7,52 \cdot 10^0 & 1,21 \cdot 10^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,11 \cdot 10^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,11 \cdot 10^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,28 \cdot 10^0 \end{bmatrix} \frac{N}{m^2}$$

Matriz piezelétrica:

$$[e]^T = \begin{bmatrix} 0 & -5,35 & 0 \\ 0 & 15,8 & 0 \\ 0 & -5,35 & 0 \\ 12,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12,3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{N}{V}$$

As propriedades do cobre são apresentadas a seguir:

Densidade:

$$\rho = 2000 \frac{kg}{m^3}$$

Módulo de elasticidade:

$$E = 119 GPa$$

Número de Poisson:

$$\nu = 0,33$$

- Modelagem

A primeira etapa a ser realizada é a criação do modelo proposto neste projeto.

Este modelo é construído basicamente através da subtração de áreas. Inicialmente construímos um bloco com o seguinte caminho: **Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block**, fornecendo em seguida as dimensões desejadas. Neste ponto é importante ressaltar que o ANSYS não utiliza unidades, por isso é apenas necessário manter a coerência das unidades nas dimensões, desta forma, sempre que fornecemos uma medida para o ANSYS, esta estará em milímetros. Em seguida subtraímos dele um outro bloco, para desta forma obtermos a área vazada existente em seu interior. O caminho para construção do quadrado é exatamente o mesmo apresentado anteriormente, após a sua construção realizamos a operação booleana de subtração através do seguinte caminho **Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volume**, selecionando a área que se deseja subtrair. Posteriormente, utilizando os mesmos caminhos de construção e operação booleana subtraímos 4 retângulos e 16 circunferências de forma a obter as juntas flexíveis e as alavancas do modelo.

O resultado desta modelagem da estrutura 3D do microposicionador é apresentado a seguir:

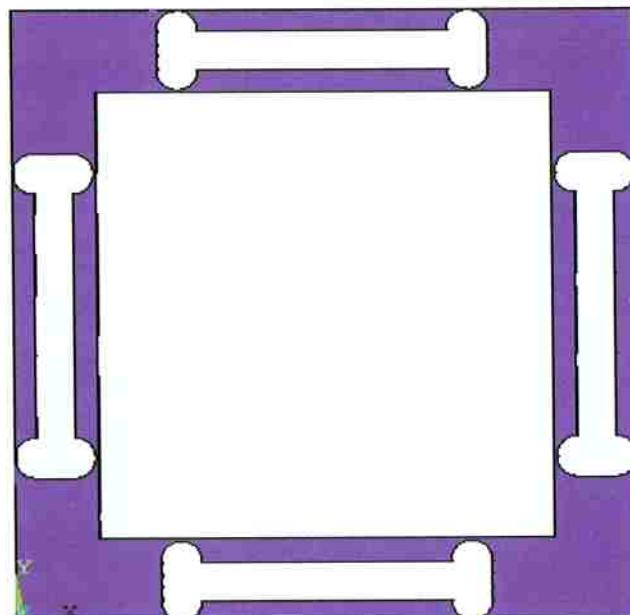


Figura 3.7 - Vista frontal da estrutura 3D do microposicionador

Posteriormente é necessário anexar às bases onde os atuadores serão fixados, bem como as retângulos que representarão as cerâmicas piezelétricas. O resultado final desta operação é apresentado a seguir:

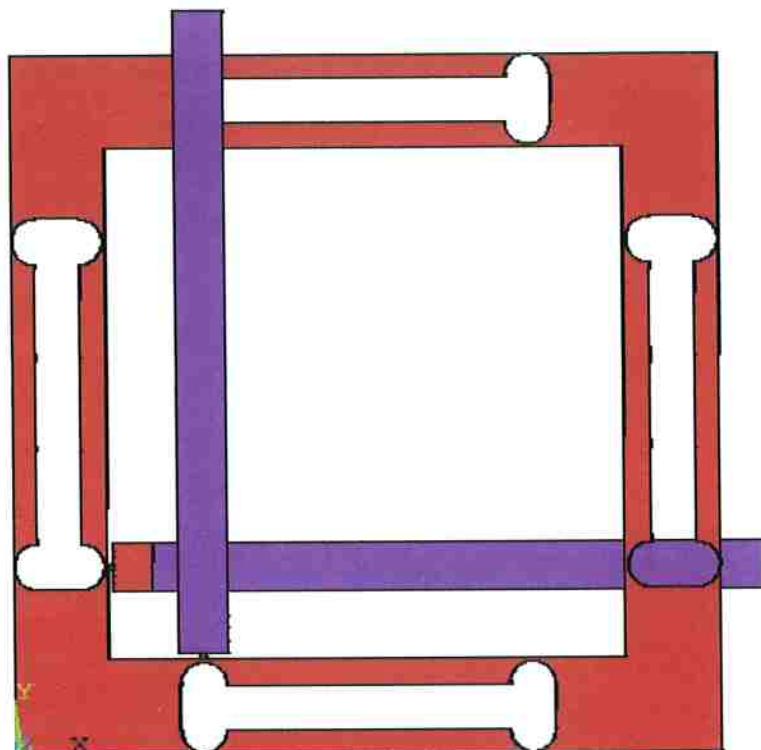


Figura 3.8 - Modelo do microposicionador com os atuadores piezelétricos

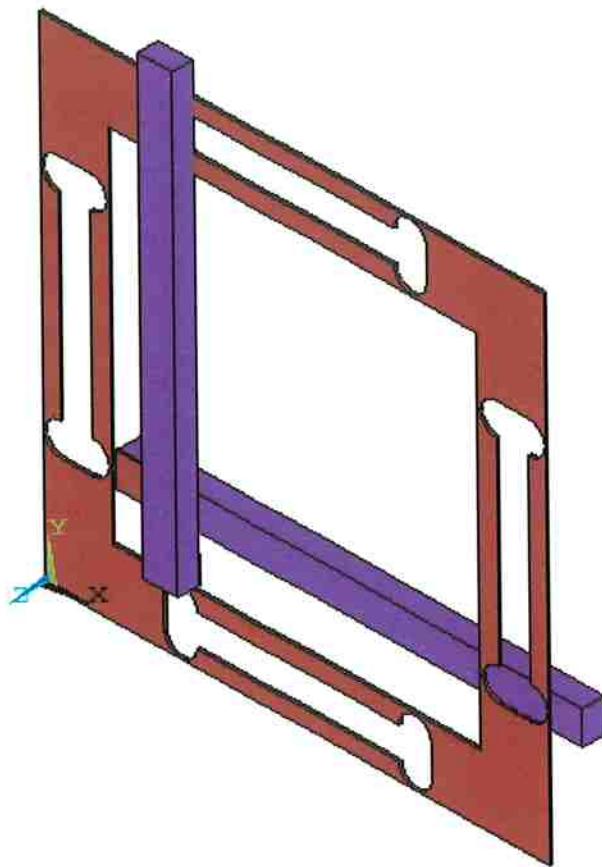


Figura 3.9 - Vista isométrica da estrutura do microposicionador

- Discretização

Atribuição dos elementos às geometrias

Finalmente é necessário atribuir as propriedades definidas anteriormente a uma determinada geometria do modelo. Assim sendo, atribuímos as propriedades do cobre à estrutura e as do elemento piezelétrico às cerâmicas. O caminho utilizado é **Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Volumes**

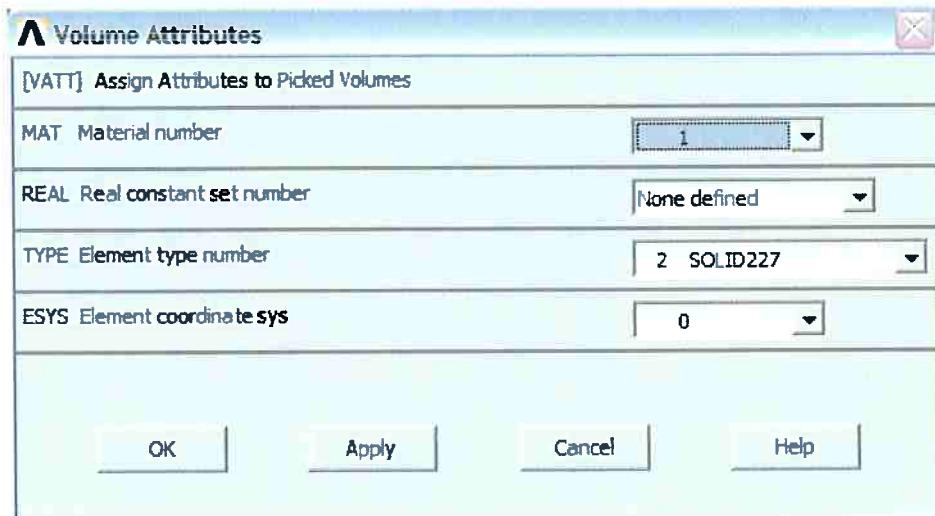


Figura 3.10 - Definição dos atributos dos elementos da simulação

Com isso, definimos o elemento e o material do tipo 2 para as cerâmicas piezelétricas e o elemento e o material do tipo 1 para a estrutura metálica.

Feito isso, resta apenas realizar o comando de discretização, que é obtido através do seguinte caminho: **Mesh > Volume > Free**. Todas as áreas são então selecionadas e inicia-se a discretização. O resultado da discretização é apresentado a seguir:

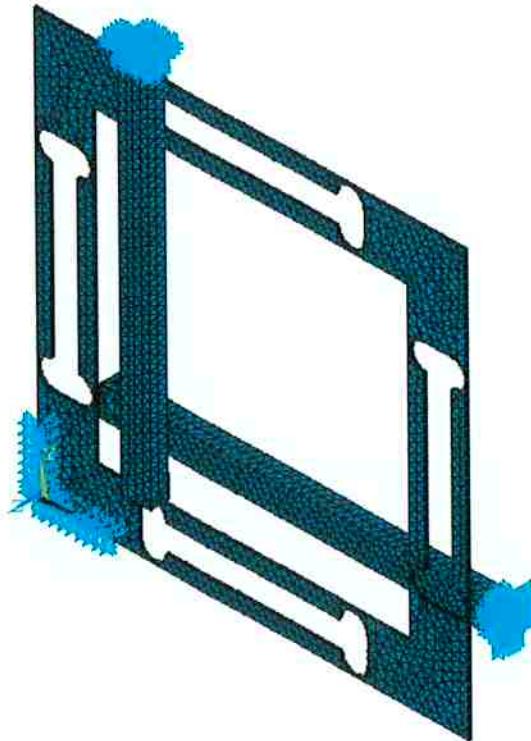


Figura 3.11 - Microposicionador discretizado.

É possível notar que a malha possui um grande número de nós (11.297) e 10.694 elementos, o que, tornará o resultado mais preciso.

3.2.1.2 Solução

A próxima etapa a ser realizada com a finalidade de simular o modelo é o estabelecimento das condições de contorno. Para o modelo estudado temos as condições de contorno apresentadas a seguir:

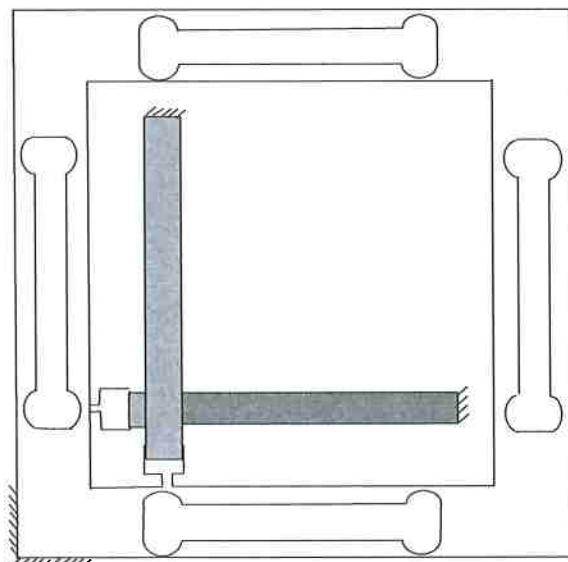


Figura 3.12 - Condições de contorno do modelo

Dessa forma, é necessário engastar uma extremidade do posicionador. Isso é feito utilizando o comando ***Solution> Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes***. A opção **box** é selecionada e os nós que serão engastados são determinados. Após esta escolha, restringe-se os movimentos nos eixos X, Y e Z, através da utilização da interface apresentada abaixo.

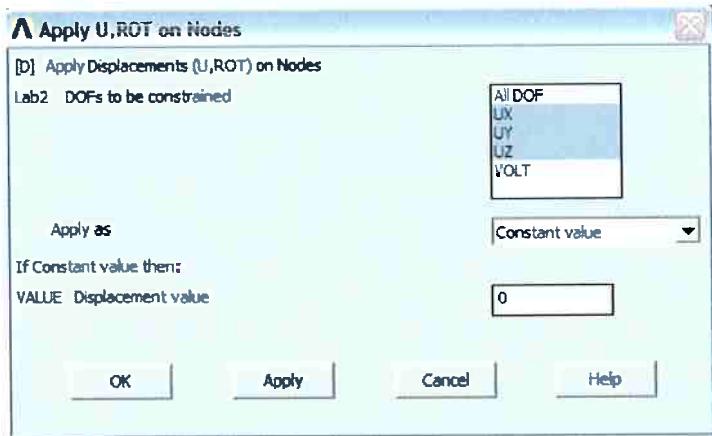


Figura 3.13 - Engastamento da estrutura do posicionador

No caso dos atuadores é necessário fazer exatamente o mesmo processo com a finalidade de engastar

Depois de determinar as condições de contorno, é necessário estabelecer quais serão as cargas aplicadas na estrutura. Foi aplicada uma tensão de 100 volts nas superfícies internas do elemento piezelétrico e uma tensão de 0 V na superfície externa dos mesmos. O potencial elétrico ao qual as cerâmicas estão sujeitas é apresentado na Figura 3.14.

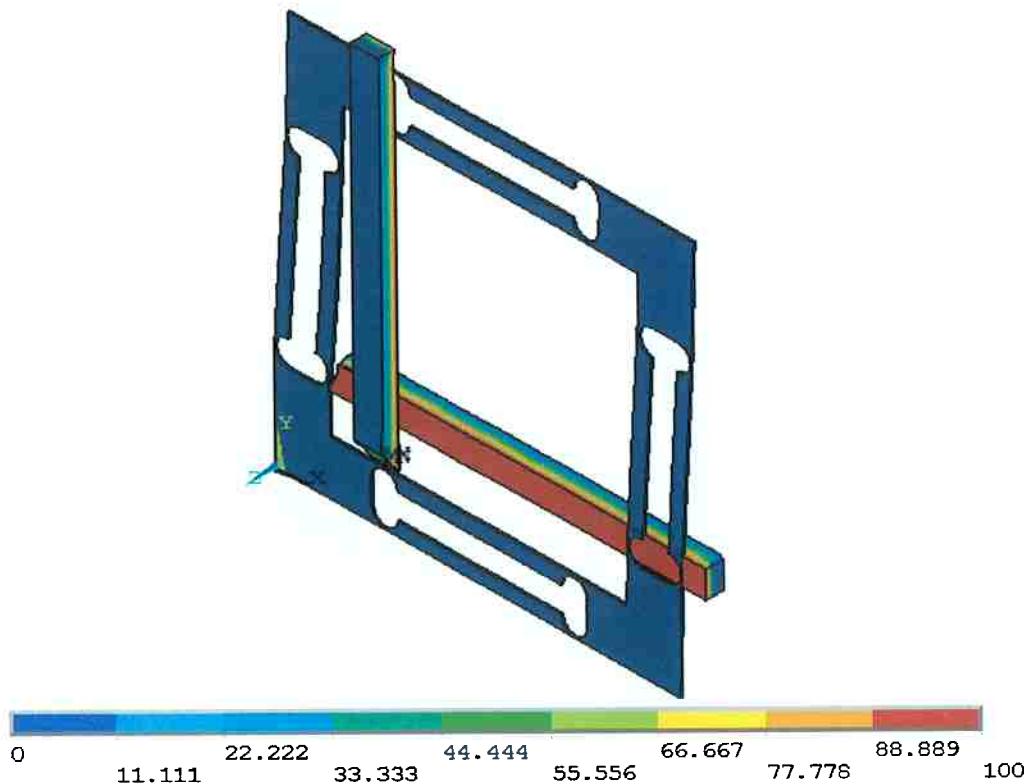


Figura 3.14 - Potencial elétrico na estrutura do posicionador

A Figura 3.14 permite observar os planos sujeitos a tensão de 100 V e os planos sujeitos a tensão de 0V, bem como a queda de tensão gradual entre esses dois planos.

- Análise estática

A primeira aproximação realizada ao problema foi a solução através de uma análise estática, com a finalidade de observar os deslocamentos gerados na estrutura devido a aplicação da tensão de 100V. Este resultado é obtido através do seguinte caminho. **Solution > Analysis Type > New Analysis** e a seguinte interface será apresentada pelo ANSYS:

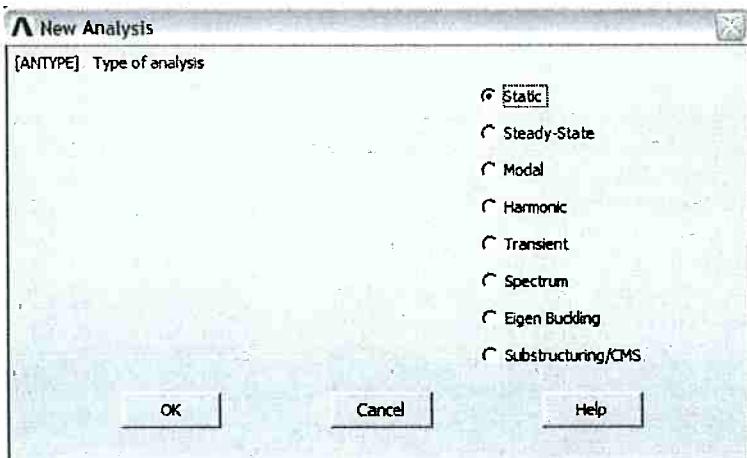


Figura 3.15 - Definição da análise estática

Escolhe-se então a opção “Static”. Uma vez determinadas todas as condições de contorno, as tensões que serão aplicadas à estrutura e o tipo de análise que será realizada a simulação está pronta para ser efetuada. Neste momento a solução do modelo é calculada através do **caminho Solution > Solve > Current LS**. O software calculará a solução nodal da estrutura apresentada. Os passos para a visualização dos resultados será apresentada posteriormente.

- Análise Modal

Com o objetivo de avaliar as freqüências de ressonância do modelo, uma análise modal foi realizada. Esta etapa é de suma importância na avaliação da forma de

operação do posicionador. Deve-se sempre evitar que as freqüências de excitação estejam próximas as freqüências de ressonância. A análise modal é realizada pelo seguinte caminho: **Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis > Modal.**

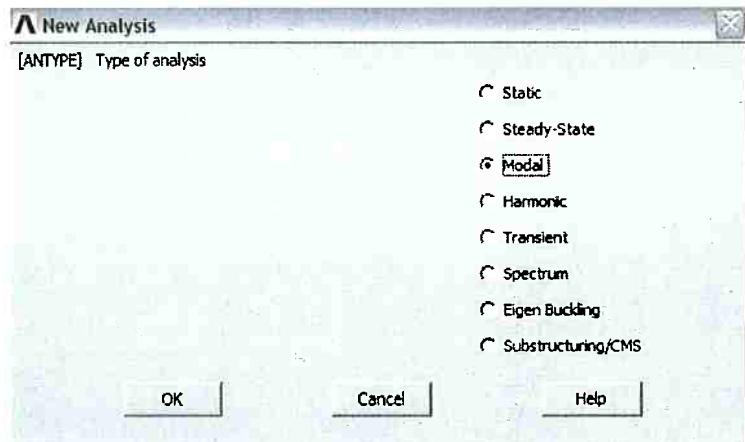


Figura 3.16 - Seleção da análise modal

Para o caso da análise modal é preciso definir quais serão os modos que serão considerados, bem como a faixa de freqüências às quais a estrutura será sujeita. O caminho para definir esses parâmetros é dado por: Solution > Analysis Type > Analysis Options. O ANSYS apresentará uma janela, aonde será definido o número de modos que serão estudados, depois disso uma nova janela será apresentada pelo software na qual será possível definir a faixa de freqüências a ser estudada. Estas janelas são apresentadas nas Figura 3.17 e Figura 3.18

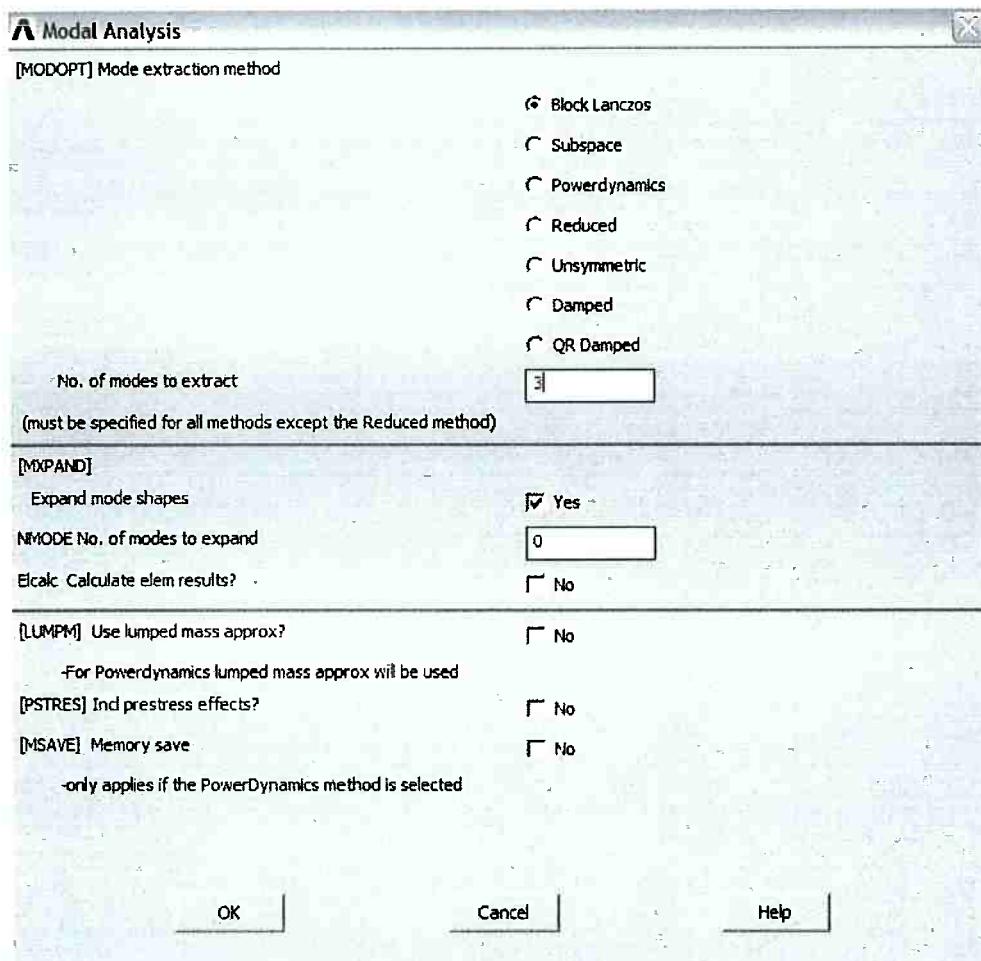


Figura 3.17 - Definição dos modos de vibrar que serão estudadas.

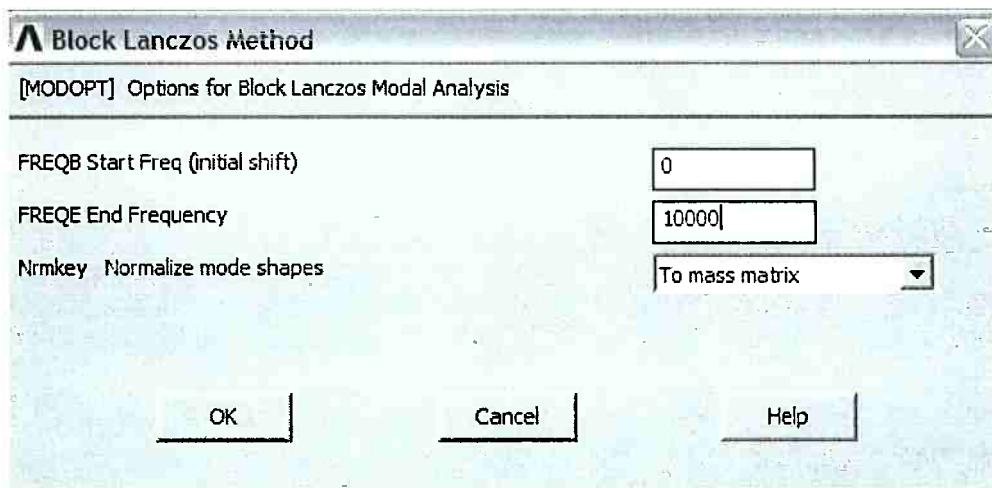


Figura 3.18 - Definição da faixa de freqüências que será estudada.

Depois desta definição o modelo está pronto para ser simulado e sua solução é calculada através do comando Solution > Solve > Currente LS.

3.2.1.3 Pós Processamento

Uma vez calculadas as soluções é necessário apresentar os resultados. Para isto o ANSYS possui uma ferramenta de pós processamento. Para obter as respostas da análise estática, inicialmente carregamos os resultados obtidos através do comando General Postproc > Read Results > First Set. Feito isso, é possível plotar os resultados na tela através do seguinte caminho General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solution. Este comando abrirá a interface apresentada na Figura 3.19

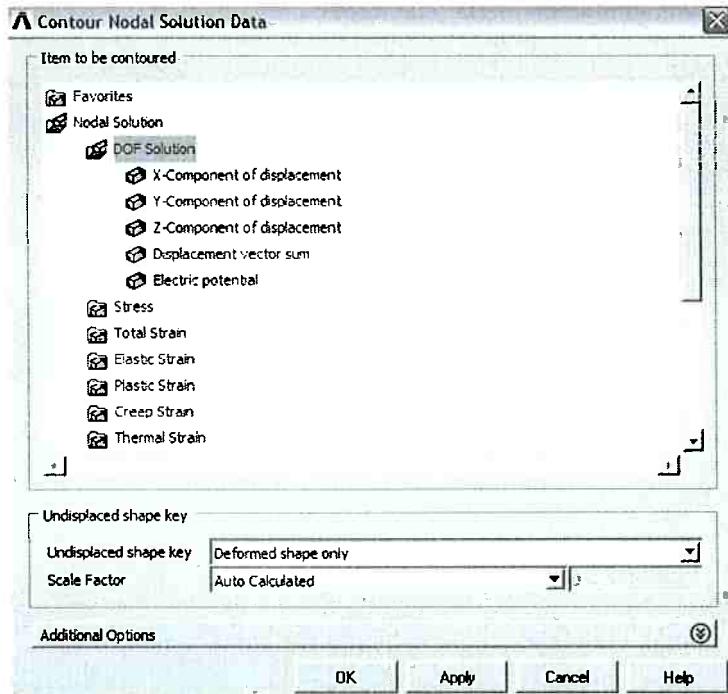


Figura 3.19 - Plotagem do resultado

Com esta função é possível determinar os deslocamentos, os potenciais elétricos e as tensões de Von Mises.

Além disso, podemos determinar o deslocamento da extremidade de saída da estrutura utilizando o comando TimeHist PostProc. Com esse comando, selecionamos um único nó e obtemos os resultados de cada um de seus graus de liberdade para posteriormente apresentá-los em forma de tabela.

Para o caso da análise modal, obtemos primeiro uma tabela com as freqüências dos modos de vibrar da estrutura através do comando General Postproc > Results

Summary. Além disso, a estrutura deformada para o primeiro modo de vibrar é obtida através do comando Plot Result > Deformed Shape. As saídas do pós processamento são apresentadas na seção de resultados deste trabalho.

4 COMANDO DO ATUADOR

4.1 ESTRATÉGIA DE COMANDO

O comando do MEMS piezelétrico é realizado através de uma referência de tensão, fornecida por uma fonte de tensão e corrente contínuas (fonte DC) e pode ser feita através de duas formas:

Comando direto, através do ajuste da tensão diretamente na fonte de tensão.

Comando remoto, através de uma interface com o usuário, que controla a tensão na fonte.

Para este trabalho, será estudado o comando remoto da fonte, que será feito através de um Joystick. Os comandos enviados através do computador são processados e enviados via interface GPIB à fonte DC, que fornecerá a tensão de alimentação do microatuador. O movimento realizado poderá ser observado através de uma câmera CCD acoplada a um microscópio óptico. As imagens podem ser armazenadas digitalmente (Figura 4.1).

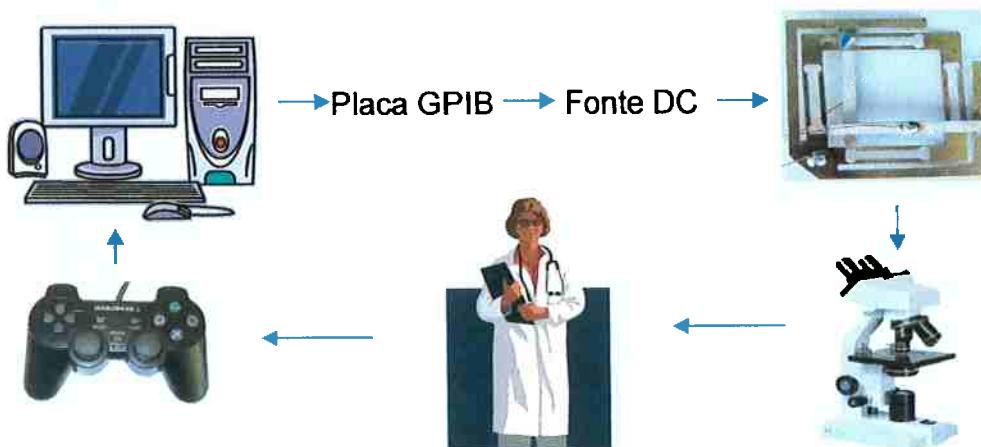


Figura 4.1 - Esquema da estratégia de comando.

Para processamento dos dados, decidiu-se pela utilização do software MATLAB, versão 7 fornecido pela The MathWorks INC.

O programa em MATLAB processa os canais de entrada e envia o sinal de saída utilizando o Instrument Control Toolbox e a interface GPIB até a fonte de Tensão com 2 canais que são conectados aos amplificadores de sinal e posteriormente aos

2 piezos do posicionador. Uma interface visual de referência (Figura 4.2) auxilia a localização geográfica dos eixos X e Y do posicionador, facilitando o controle.

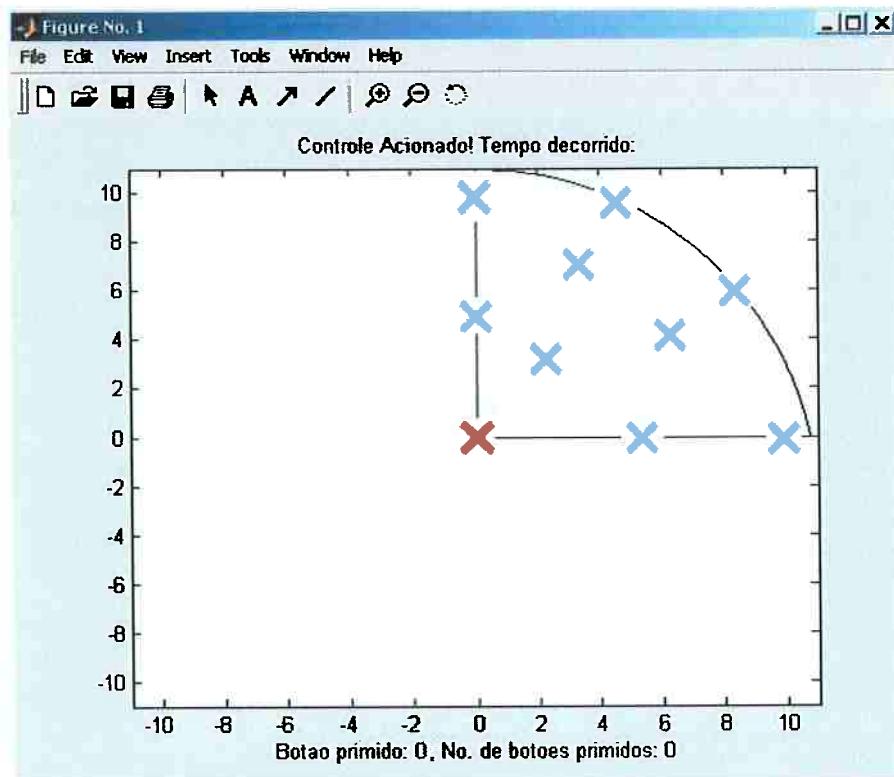


Figura 4.2 - Interface visual da posição dos eixos

Observa-se que o comando somente aceita valores positivos de posição, uma vez que deseja-se trabalhar apenar com elongamentos dos piezelétricos.

Após receber os comandos, o MATLAB traduz as entradas (deslocamento desejado) em valores de tensão de saída, a serem enviados à fonte DC para o comando do microatuador.

A comunicação entre o MATLAB e a fonte DC é realizada através da interface de controle de instrumentos GPIB, disponível na fonte DC.

O movimento do micro atuador será observado em uma câmera CCD (“Cage Couple Device”) acoplada a um microscópio óptico. As imagens podem ser então enviadas a um computador através de placa de captura de imagens e seu tratamento (imagem e filme) pode ser realizado via software comercial.

4.2 ESTRATÉGIA DE FORNECIMENTO DE TENSÕES ELÉTRICAS

O comando do MEMS piezelétrico é realizado através do fornecimento de uma referência de tensão aos eletrodos, através de uma fonte de tensão e corrente contínuas (fonte DC). Tipicamente, as tensões necessárias para excitar as cerâmicas piezelétricas a ponto de obter deslocamentos visíveis a olho nu seriam de 1000V (mil Volt). Para isso, tem-se a necessidade da utilização de fontes de alta tensão ou amplificadores de tensão. O máximo deslocamento dos transdutores piezelétricos (tipicamente 0,1% de seu tamanho) é obtido com campos elétricos na ordem de 20 kV/cm.

Os fabricantes resolvem parcialmente este problema construindo pilhas de pequenas piezocerâmicas conectadas mecanicamente "em série" e eletricamente em paralelo. Estas pilhas têm tensões de operação menores. Fazer pilhas custa relativamente caro e não são tão resistentes quanto uma única peça de cerâmica. Optou-se por controlar uma fonte de tensão DC Agilent E3549A com capacidade máxima de 60 Volts e 2 canais de saída, com comunicação GPIB, e posteriormente amplificar o sinal para tensões de kVolts, através de um amplificador que foi encomendado para tal fim.

4.3 INTERFACE GPIB

O MATLAB pode se comunicar com diversos instrumentos utilizando-se do barramento GPIB através do "Instrument Control Toolbox". Para isso, é necessário ter instalado no microcomputador uma placa GPIB. Neste caso, utilizou-se uma placa PCI conectada à placa-mãe.

O GPIB é uma interface para a transferência de dados entre computadores e instrumentos. É amplamente utilizado para controlar remotamente instrumentos em bancadas de teste.

Suas principais características são:

- Suporte a até 15 dispositivos simultâneos;
- Distância máxima entre dispositivos de 2m;
- Comprimento máximo do cabo de 20m;
- Envio de dados de forma paralela (1 byte por vez);
- Taxa máxima de transmissão de dados de 1 Mbyte/s.

Os instrumentos no barramento são divididos em 3 diferentes categorias: controladores, ouidores e faladores. Cada instrumento pode cumprir mais de uma função. Geralmente o controlador é um computador, que indica para cada instrumento, as atividades que devem cumprir. É função do controlador evitar a ocorrência de conflitos, permitido que apenas um instrumento fale enquanto os outros ouçam.

4.4 “INSTRUMENT CONTROL TOOLBOX”

O “Instrument Control Toolbox” é um conjunto de instruções construídas em MATLAB com as seguintes características:

Possui uma estrutura para comunicação com instrumentos que suportam a interface GPIB, o padrão VISA, os protocolos TCP/IP e UDP e interfaces seriais.

Possui funções de transferência de dados entre o MATLAB e o instrumento.

A comunicação é baseada em eventos.

Para se realizar uma tarefa no instrumento controlado pelo MATLAB, como por exemplo estabelecer uma comunicação, deve-se:

- Criar o objeto de instrumento, fornecendo a porta de entrada para controlar o comportamento da aplicação.
- Conectar o objeto ao instrumento.
- Configurar as propriedades
- Escrever e ler dados no instrumento.
- Desconectar.

Inicialmente, devemos criar o objeto. Objetos GPIB são criados com a função GPIB conforme indicado a seguir:

```
GPIB = GPIB ( 'VENDOR' , BOARDINDEX; PRIMARYADDRESS ) ;
```

Os parâmetros de entrada desta função são o nome do adaptador, o índice da placa e o endereço do instrumento respectivamente.

O próximo passo é conectar o objeto ao instrumento, através da função fopen:

```
FOPEN (OBJETO) ;
```

As propriedades são utilizadas para estabelecer o comportamento desejado do objeto, e podem ser declaradas da seguinte forma:

```
SET (OBJETO, 'PROP1', 'VALOR1') ;
```

Para a operação de escrita, utiliza-se o comando fprintf e a leitura do instrumento é dada pelas funções fgetl, fgets, fread, fscanf ou readasync.

Quando o objeto criado não é mais necessário, deve-se desligá-lo do instrumento, através da função fclose (objeto) .

4.5 INTERFACE ENTRE O MATLAB E O JOYSTICK

Utilizando um Joystick previamente instalado no sistema operacional, conectado através de uma porta Universal Serial Bus (USB), o MATLAB pode receber dados de posição, enviados pelo operador, utilizando uma biblioteca dll que transforma os dados de entrada no Joystick para valores binários. O MATLAB recebe 6 canais (1,2,3,4,5,6) com as seguintes informações:

Canal 1	Posição em X1 (eixo 1)
Canal 2	Posição em Y1 (eixo 1)
Canal 3	Posição em X2 (eixo 2)
Canal 4	Posição em Y2 (eixo 2)
Canal 5	Botão primido (numero binário)
Canal 6	Número de botões primidos

Para este trabalho, o canal mais significativo é o canal 1 e 2, uma vez que o objetivo é definir a posição do objeto.

O movimento do posicionador se dá pela composição dos dois eixos X e Y. Assim, o deslocamento máximo da ponta do posicionador acontece quando os piezos X e Y estão distendidos ao máximo.

Uma das formas de comunicação entre o MATLAB e o meio externo é através do “Data Acquisition Toolbox”, que fornece um conjunto de ferramentas para controlar e adquirir dados a partir de placas de “hardware”.

5 RESULTADOS

5.1 SIMULAÇÃO

A análise estática foi realizada através de dois tipos de abordagem. Num primeiro momento foi aplicada tensão em apenas uma das cerâmicas para avaliar a interferência do movimento em um eixo sobre o outro. O resultado da simulação é apresentado na Figura 5.1 e Figura 5.2

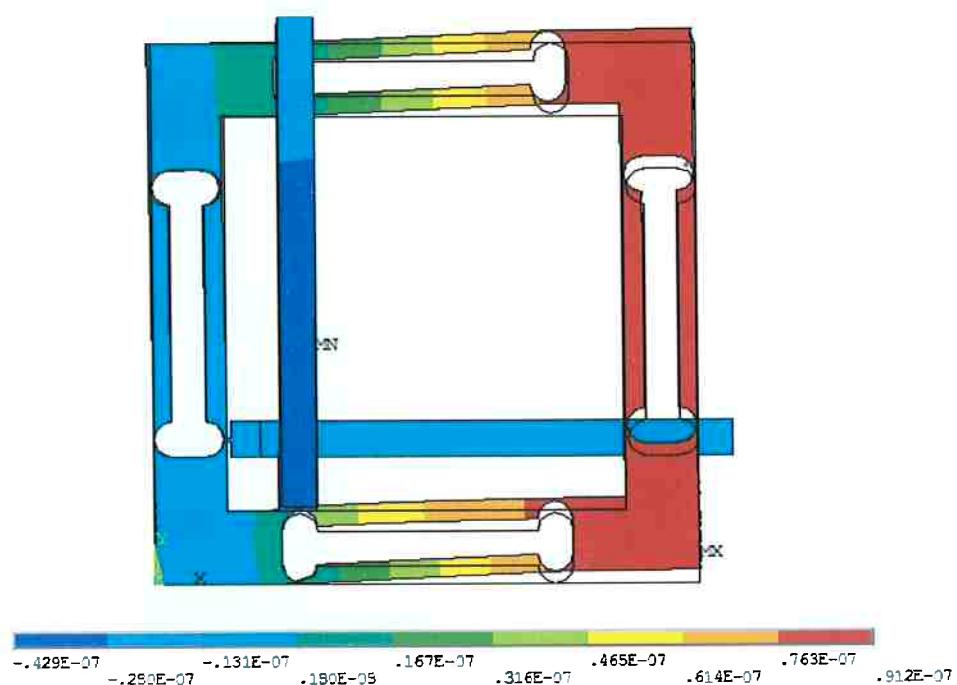


Figura 5.1 - Deslocamentos no eixo Y, devido a aplicação de tensão elétrica na cerâmica paralela ao eixo Y

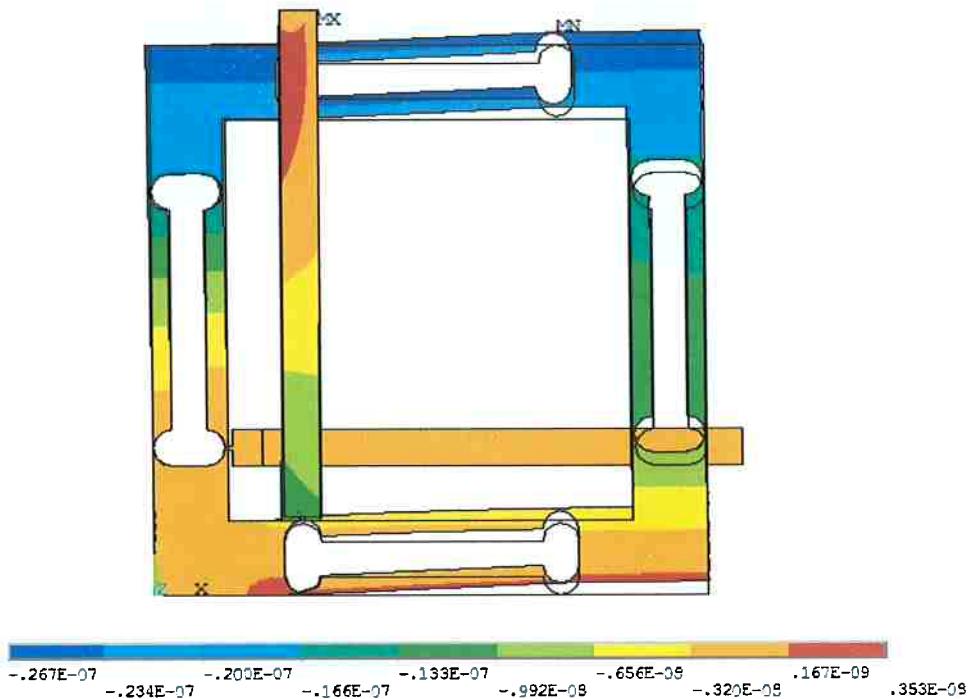


Figura 5.2 - Deslocamentos no eixo X, devido a aplicação de tensão elétrica na cerâmica paralela ao eixo Y

As figuras mostram que a atuação no eixo Y, também gera uma movimentação no eixo X, esta interferência prejudica o resultado final do posicionador, como poderá ser visto a seguir. De forma semelhante, quando a atuação no eixo X é realizada há uma movimentação também no eixo Y. Os resultados da aplicação de tensão em cada um dos piezos são apresentados a seguir:

	Deslocamento em X [nm]	Deslocamento em Y [nm]
Atuação em X	91	-26
Atuação em Y	-26	91

Como é possível notar a interferência no movimento não pode ser considerada desprezível e acabará influenciando o resultado final da movimentação nos dois eixos.

A aplicação de tensão em ambos os piezos foi a etapa seguinte da análise realizada. Aplicaram-se as tensões apresentadas anteriormente em cada um dos piezos e os resultados gerados são apresentados a seguir:

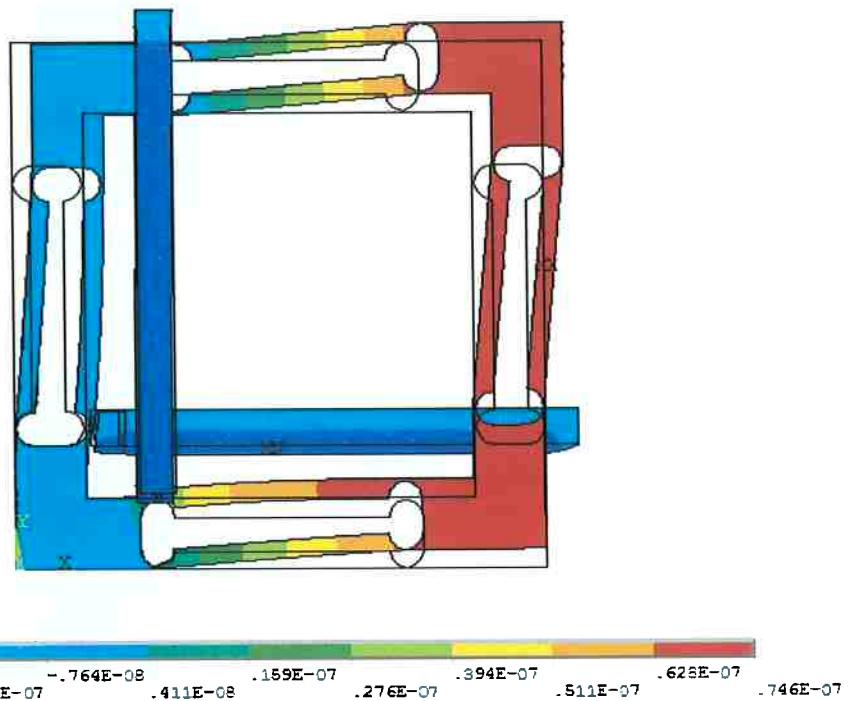


Figura 5.3 - Deformação em Y gerada pela atuação das duas cerâmicas

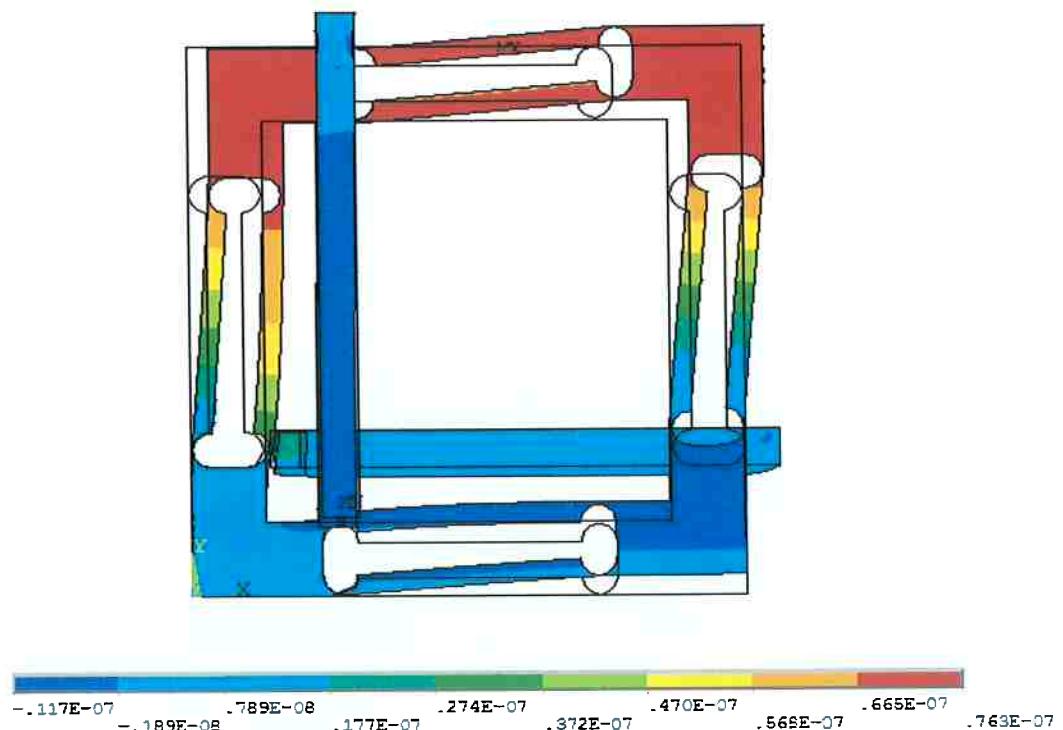


Figura 5.4 - Deformação em X gerada pela atuação das duas cerâmicas

Os resultados do deslocamento da extremidade de saída do posicionador são 70 nm no eixo X e 69 nm no eixo Y. Se os resultados da aplicação de tensão em apenas

uma cerâmica forem considerados, pode-se notar a influência negativa da interferência nos movimentos. O resultado final da movimentação é um valor muito próximo à soma do deslocamento da atuação e da interferência, como a interferência é negativa, temos uma diminuição no deslocamento final do posicionador.

A seguir uma análise das tensões de Von Mises foi realizada. Pode-se observar uma concentração de tensão das regiões próximas ao engaste. Este resultado era esperado pois, pelo fato de não se movimentar, estas regiões serão sujeitas às maiores tensões. Também é importante observar a influencia da interferência cruzada nas tensões de Von Mises. O elevado comprimento da cerâmica faz com que a movimentação da outra cerâmica gere uma grande tensão no engaste.

A tensão de Von Mises máxima observada foi de 18,9 MPa, que é muito inferior à tensão de escoamento da cerâmica. Este fato ajuda a corroborar o modelo.

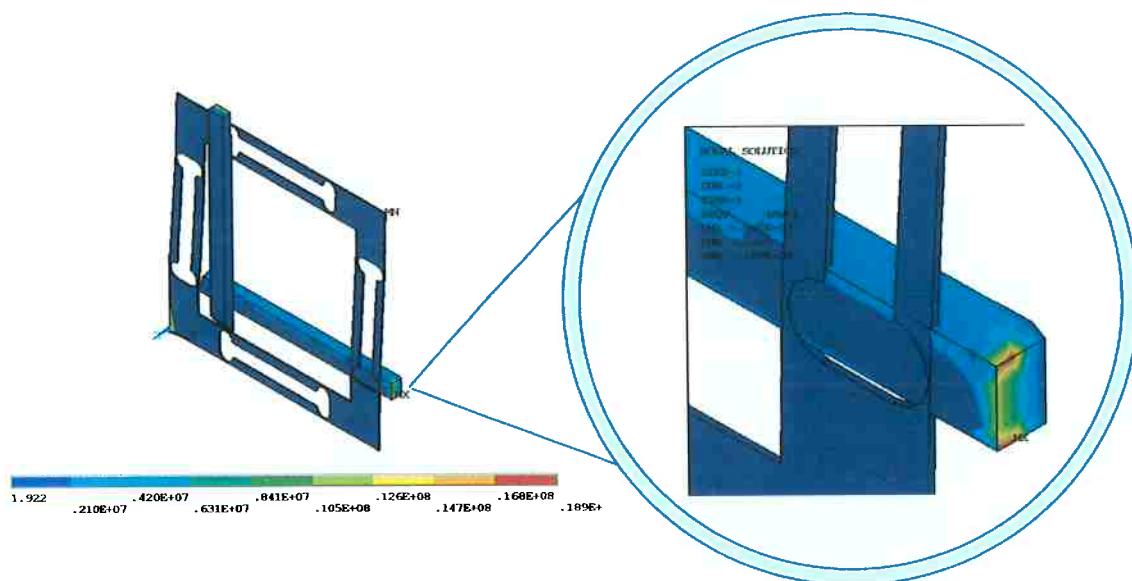


Figura 5.5 - Tensões de Von Mises para o modelo.

Finalmente foi realizada uma análise modal com a finalidade de se obter as freqüências de ressonância. Foram calculados os três primeiros modos de vibrar e suas freqüências, que são apresentados a seguir.

Modos de Vibrar	Freqüência [Hz]
1	1538.5
2	1841.3
3	6307.1

Como é possível notar, não haverá problemas com as freqüências de excitação às quais a estrutura está sujeita, pois a primeira harmônica da estrutura possui um valor elevado, muito superior às freqüências de operação do posicionador. A deformação da primeira harmônica pode ser vista na Figura 5.6

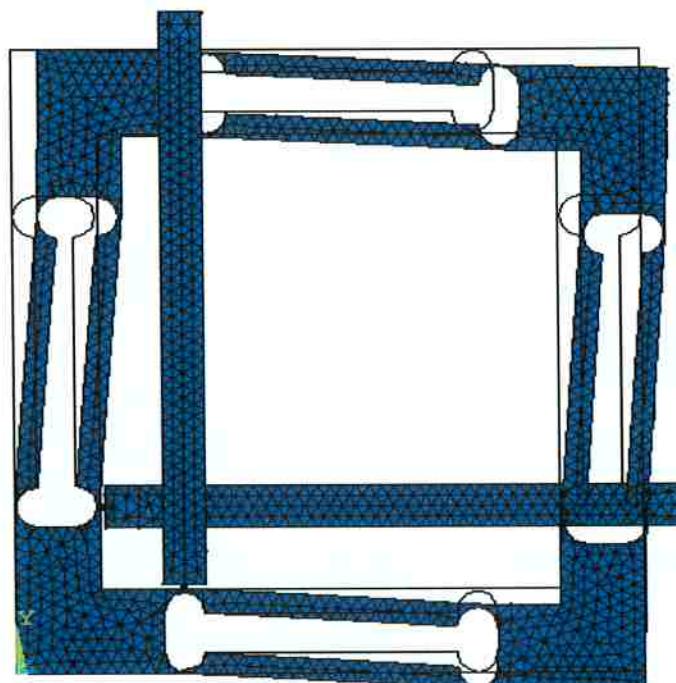


Figura 5.6 - Primeira Harmônica da estrutura

5.2 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

A fabricação do protótipo foi realizada pela Metalfoto, empresa especializada no ramo de fotolitografia. O desenho de fabricação em cad foi enviado para a empresa que realizou a fabricação utilizando uma liga de cobre e latão e fazendo a usinagem através de fotolitografia. Como já apresentado anteriormente a fotolitografia é feita através da utilização de máscaras (feitas com materiais de sacrifício), da deposição

e retirada do material. Para o caso específico do protótipo estudado neste trabalho, a seqüência da fotolitografia é apresentada na Figura 5.7

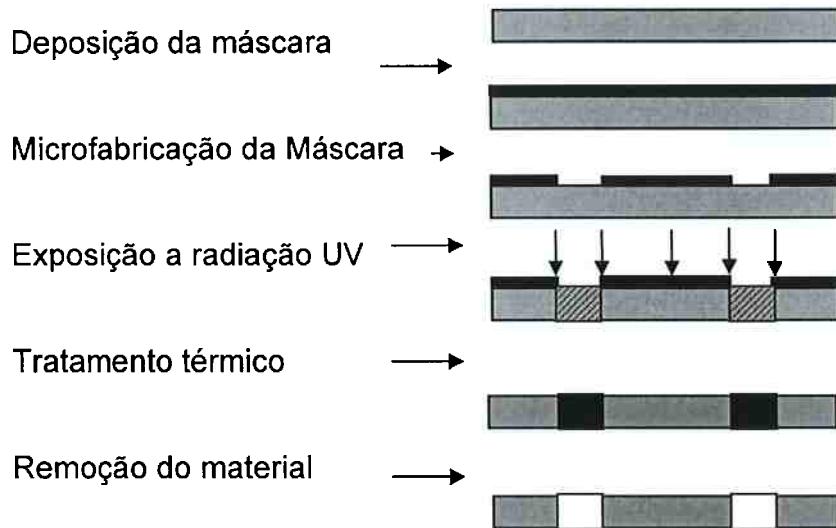


Figura 5.7 - Seqüência de Fotolitografia

Temos inicialmente o a liga de cobre e latão no forma de matéria prima. Uma máscara é depositada sobre a superfície da liga. A máscara passa por um processo de microfabricação com a finalidade de se obter a forma da área vazada do projeto. Com a máscara pronta, o protótipo é exposto a radiação UV, fazendo com que haja sensibilização do material. Segue um tratamento térmico na estrutura e a posterior remoção do material, formando desta forma a estrutura desejada.

O resultado final da construção da estrutura do posicionador nos permitiu realizar a verificação do elevado nível de qualidade de uma peça fabricada por fotolitografia. Apesar das dimensões reduzidas do protótipo, o acabamento é excelente mesmo nos menores detalhes. Um outro fato marcante é a espessura do protótipo (0,15 mm), tal espessura jamais seria obtida com processos de fabricação tradicionais. Com a estrutura construída, o passo seguinte foi a fixação dos atuadores piezelétricos à estrutura. Inicialmente foi necessário cortar as cerâmicas nas dimensões do projeto, isto foi feito com a utilização de um estilete apropriado para o corte de cerâmicas. Em posse das cerâmicas já cortadas, a próxima etapa era a fixação das mesmas à estrutura. Esta fixação foi feita através de colagem, utilizando-se uma cola de secagem rápida, e outra condutiva. A utilização da cola

condutiva se fez necessária para que as tensões elétricas pudessem ser transmitidas da estrutura para o piezo, uma vez que a alimentação da tensão elétrica era feita diretamente na estrutura.

Finalmente, foram soldados os fios de fornecimento de tensão elétricas às superfícies externas dos piezos e à estrutura do posicionador. O projeto do protótipo e o resultado final da construção podem ser vistos na Figura 5.8 e Figura 5.9 para efeito de comparação.

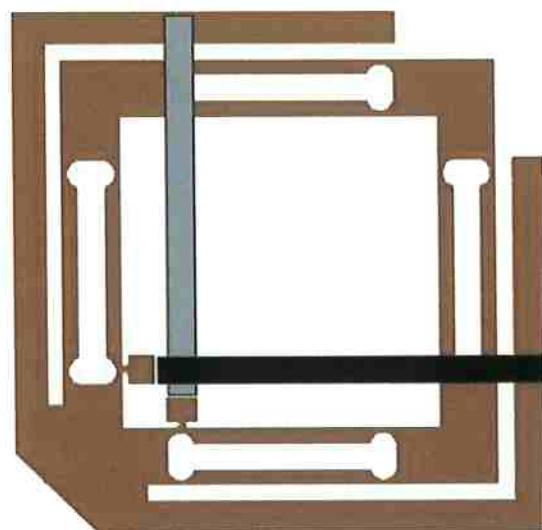


Figura 5.8 - Projeto do protótipo

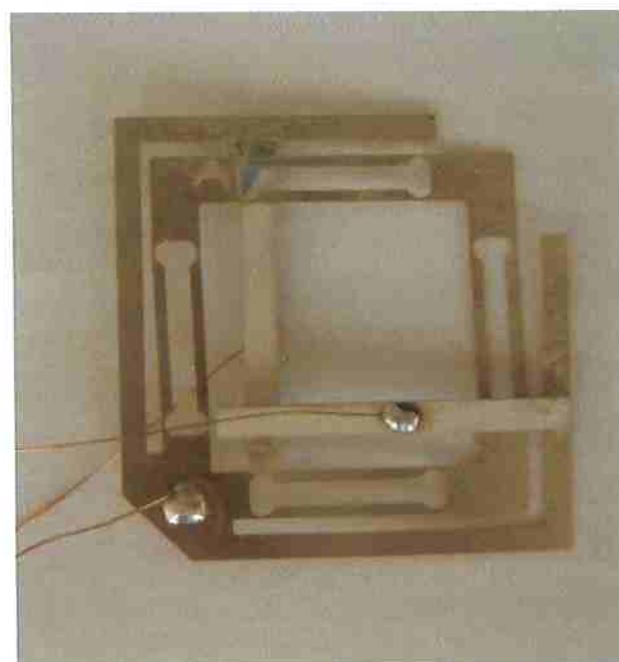


Figura 5.9 - Resultado final da construção

5.3 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Os experimentos com o atuador fabricado foram realizados para observar a reação do projeto ao estímulo de tensão elétrica. Utilizou-se para tanto os laboratórios do departamento.

O Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica possui um microscópio com capacidade de aumento de até 1000x. Possui também uma câmera CCD acoplada para aquisição das imagens analisadas. Este laboratório não possuía todos os meios para a análise do atuador, uma vez que o aparato não era específico para tais fins (Figura 5.10).

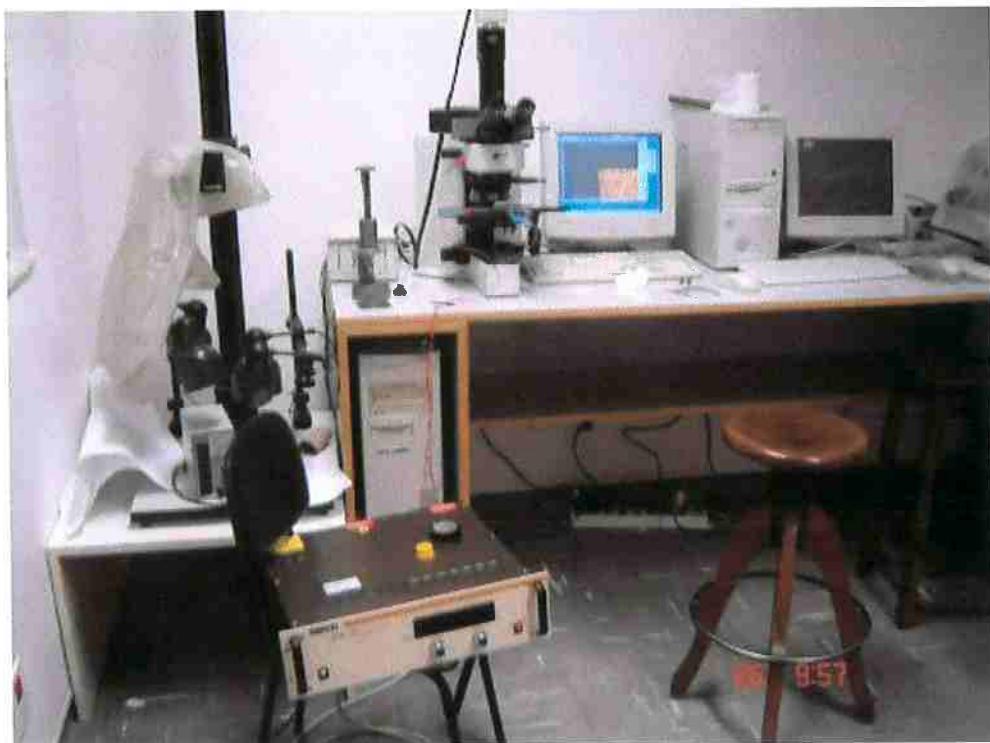


Figura 5.10 - Aparato montado para testes no LFS

Foi necessária a adaptação de um suporte para fixar o atuador ao microscópio, evitando que o mesmo curto-circuitasse os terminais do atuador, conforme se observa na Figura 5.11. Também era necessário fixar o atuador de forma tal a permitir os movimentos no plano X e Y.



Figura 5.11 - Microscópio e suporte adaptado para testes com o atuador

Nos testes com a fonte DC Agilent controlada remotamente, observou-se que a tensão fornecida na saída não era suficiente para se observar movimentos no atuador. Assim, utilizou-se de outra fonte DC (Bertan 105) com possibilidade de tensões de 20kV. Essa fonte não é controlável remotamente e possui apenas uma saída. Mesmo assim, ela foi de suma importância para a verificação da simulação, já que a fonte Agilent controlada não consegue fornecer tensões suficientes.

As imagens do atuador foram capturadas e analisadas em um computador. O software disponível não era específico para medir deslocamentos, mas mesmo assim pode-se observar a mudança de posição do atuador no momento de aplicação de carga (Figura 5.12).

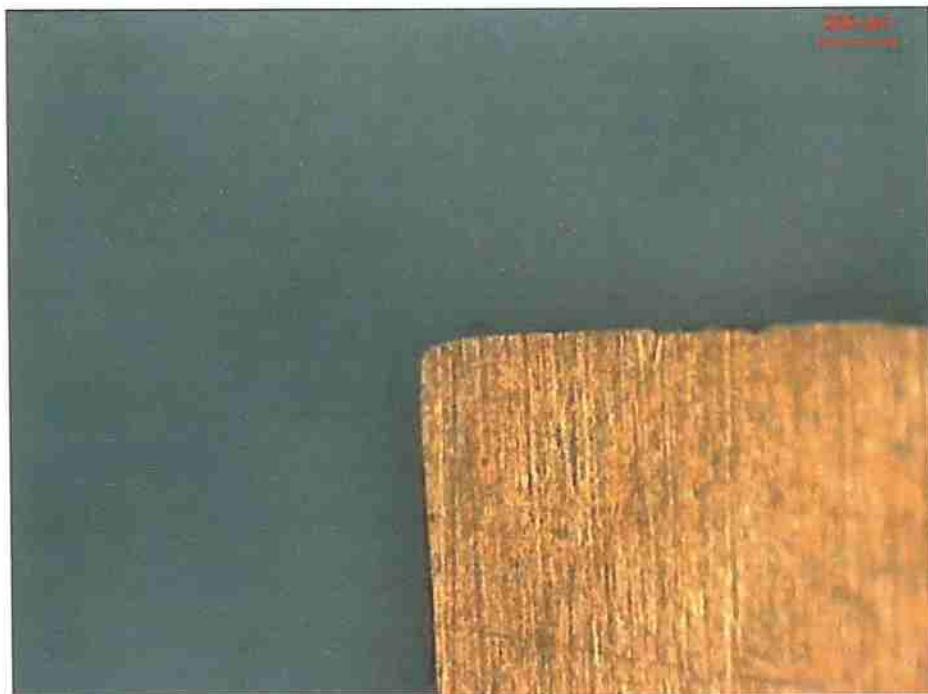


Figura 5.12 - Saída do atuador observada através do microscópio

O aparato utilizado para os testes da fonte controlado pelo *Joystick* pode ser visto na imagem a seguir. Os testes foram realizados observando a tensão de saída na fonte controlada remotamente, segundo a posição desejada pelo usuário. Essa posição era dada pelo *Joystick* e podia ser vista em tempo real no MATLAB.

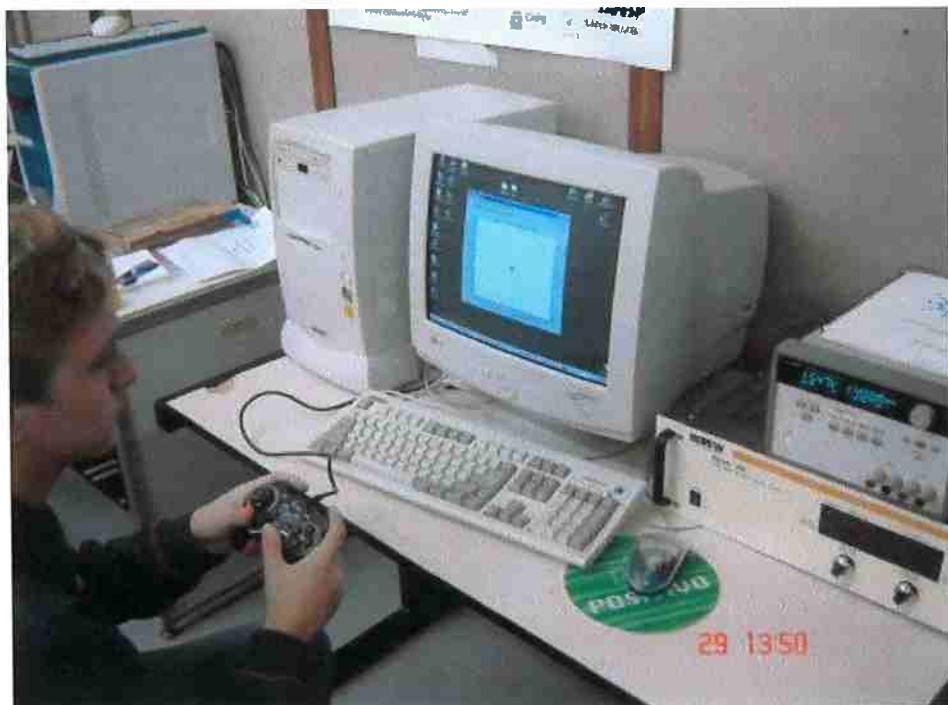


Figura 5.13 - Controle via Joystick da fonte de tensão

O experimento foi realizado utilizando-se o aparato apresentado anteriormente. Os deslocamentos foram observados com o auxílio de um microscópio que realizou um aumento de 500 vezes no tamanho original do protótipo. As cerâmicas piezelétricas foram sujeitas a uma tensão elétrica de 1000 V. De acordo com a simulação (supondo o comportamento linear do posicionador), esta tensão elétrica geraria um deslocamento de aproximadamente 7 μm . O microscópio utilizado permitia a captura das imagens, com isso, foram obtidas imagens do posicionador antes e depois da aplicação da tensão. Essas imagens são apresentadas na Figura 5.14 e Figura 5.15. A medição do deslocamento foi realizada através da sobreposição das imagens, que permitiu observar um deslocamento de aproximadamente 5 μm .

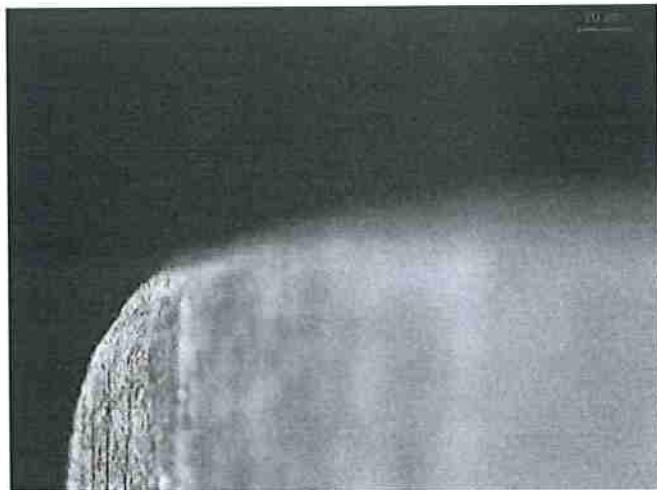


Figura 5.14 - Imagem do posicionador antes da aplicação de tensão



Figura 5.15 - Imagem do posicionador após a aplicação de tensão

6 DISCUSSÃO

6.1 SIMULAÇÃO DO PROTÓTIPO

A simulação apresentou resultados coerentes em relação aos modelos semelhantes já apresentados na literatura. O deslocamento de 70 nm quando a estrutura é sujeita a tensões elétricas de 100 V é equivalente àqueles vistos nos demais exemplos apresentados neste trabalho, que têm deslocamentos entre 54 e 96 nm.

Além disso, as tensões de Von Mises para a estrutura estão dentro de um intervalo aceitável para os limites de escoamento dos materiais. A simulação permitiu observar que a estrutura do posicionador está sujeita a baixas tensões mecânicas. As maiores tensões mecânicas ocorrem no engaste (Figura 5.5), devido à movimentação da outra cerâmica piezelétrica. O fato de possuírem um grande comprimento faz com que pequenos movimentos em uma de suas extremidades acabem gerando grandes tensões mecânicas na outra extremidade. Mesmo com esta concentração de tensão no engaste, os valores da máxima tensão são de aproximadamente 19 MPa (Figura 5.5), que é um valor aceitável para a cerâmica piezelétrica.

A análise harmônica também corroborou o modelo proposto, pois as freqüências de ressonância estão em uma faixa muito superior as faixas de operação que serão aplicadas ao protótipo. A simulação apresenta um valor de aproximadamente 1500 Hz para o primeiro modo de vibrar, como desejamos fazer apenas a movimentação do posicionador, as freqüências de excitação serão baixas, não havendo riscos de operarmos com ressonância.

Os resultados do potencial elétrico nos nós, por sua vez, permitiu a observação da distribuição de tensão ao longo da cerâmica piezelétrica. O resultado mostrou grande uniformidade na distribuição da queda de tensão.

Como último comentário é importante ressaltar que, a simulação realizada possui uma peculiaridade em relação aos demais modelos de posicionadores apresentados como exemplo neste trabalho: sua simulação foi realizada utilizando uma estrutura 3D e não em 2D. A escolha por estruturas tridimensionais trouxe uma maior riqueza de detalhes na análise, mas também representou algumas dificuldades. A adição de um grau de liberdade ao modelo possibilita com que o mesmo se desloque na

direção do eixo Z, esta movimentação fugia ao escopo do estudo deste trabalho. Este problema foi contornado com a adição das condições de contornos necessárias à adequação da análise. Essas restrições foram de extrema utilidade durante a realização do experimento, pois sabendo da possibilidade de uma movimentação no eixo Z, limitamos este movimento.

6.2 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

A fabricação do protótipo, feita pela empresa especializada no ramo de Fotolitografia Metalfoto mostrou-se de acordo com os requisitos do projeto. Os custos foram baixos para um produto final de boa qualidade. A entrega é rápida, bastando enviar o arquivo em CAD do projeto para a empresa.

A montagem das piezocerâmicas no atuador é uma operação extremamente delicada, as dimensões são reduzidas e se a colagem for realizada de maneira inadequada, todo o resultado poderia ter sido comprometido. Por este motivo o auxílio do Eng. Andreas Choi durante a construção do protótipo foi de extrema importância no sucesso desta etapa.

Também foi necessário construir um suporte para o atuador, no momento em que se percebeu que o microscópio existente no laboratório não possuía suportes necessários para a execução do ensaio. O suporte é constituído de uma borracha de mouse pad que funcionou perfeitamente para a finalidade proposta.

6.3 INTERFACE DO COMANDO REMOTO DA FONTE DC

A interface de controle do posicionador é bem simples. O MATLAB tem uma boa interface de *hardware* e *software* através de *toolboxes*, uma funcionalidade adequada para implementar comunicações entre diversos componentes do sistema de comando do posicionador: as interfaces usuário-programa, Joystick-MATLAB e MATLAB-instrumento (fonte DC).

A comunicação através de barramento GPIB é realizada através do Instrument Control Toolbox, com funções de escrita e leitura de dados fáceis de programar e

configurações específicas para determinados fabricantes de adaptadores já existentes.

O teste do comando através do controle do atuador não pode ser executado, uma vez que a fonte controlável de 2 canais com saída de tensões elétricas suficientemente elevadas para observação de movimento não estava disponível. Isso não prejudicou o teste da interface de comando, uma vez que foi utilizada uma fonte de tensão DC, onde se podia observar a saída de tensão de acordo com o controle do Joystick.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou análises de MEMS piezelétricos utilizando Método de Elementos Finitos, proporcionando estimativas das grandezas envolvidas nos deslocamentos resultantes devido à aplicação de tensões elétricas nos piezelétricos. Estudou-se as técnicas de microfabricação existentes no mercado para a posterior construção de um protótipo. Segundo o projeto analisado, através de uma técnica relativamente barata de fabricação - a Fotolitografia – obteve-se como resultado uma estrutura que poderia ser acionada através de uma fonte de tensão DC comandada remotamente via *Joystick*.

Tendo-se construído o protótipo e o comando do atuador, passou-se para a fase de testes.

O principal entrave no projeto foi a falta de uma fonte de tensão DC com valores de saída suficientemente elevados para que pudesse ser observado um deslocamento no atuador. Optou-se, assim, por utilizar uma fonte de alta-tensão que não é controlável remotamente para excitar o piezo e observar o deslocamento em microscópio óptico.

Feita a medição, observou-se um deslocamento da ordem de 5 micrômetros no plano XY, valor coerente com a simulação em MEF.

O modelo de nanoposicionador XY proposto mostrou-se viável.

A escolha do método de fabricação utilizado se mostrou correta e eficiente. O controle do posicionador foi implementado e testado com uma fonte com tensão máxima de saída de 60 Volts.

REFERÊNCIAS

ALLIK, H., HUGHES, T. J. R., "Finite element method for piezoelectric vibration", International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 2, 1970

BATHE, K. J., "Finite element procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 07632, USA, 1982

FRANK, J., KOOPMANN, G.H., CHEN, W., LESIEUTRE, G.A., "Design and Performance of the High Force Piezoelectric Inchworm Motor", Center for Acoustic and Vibration, Penn State University, University Park, PA 16802 *Proceedings of Smart Structures & Integrated Systems – 6th SPIE (Annual International Symposium on Smart Structures and Materials)*, Newport Beach, California (EUA), março de 1999 (anais em CDROM)

KEOSCHKERJAN R., QIAO F., SCHILLING C., WURMUS H., HARUTYUNYAN M., "Piezoelectric X-Y-Micropositioner Made of Photo-Sensitive Glass to Form one Micro-Handling", Ilmenau Technical University, Germany, State Engineering University of Armenia, Erevan, Armenia *Actuator 2000 – 7th International Conference on New Actuators*, Bremen, Alemanha, junho de 2000.

LERCH, R., "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-Dimensional Finite Elements", IEEE, Transactions on Ultrasonic Ferroelectric and Frequency Control, Vol. 37, nº2, pp. 237-246, maio, 1990.

LYSHEVSK, S. E. Nano and micro-electromechanical systems: Fundamentals of Nano-and Microengineering. London: CRC Press, 2001.

NADER, G., "Desenvolvimento de técnicas de características de transdutores piezoeletricos". Escola Politécnica – USP, p. 13-61, São Paulo, 2002.

NAILLON, M., COURSANT, R.H., BESNIER, F., "Analysis of piezoelectric structures by a finite element method", Acta Electronica, 25,4,: p.341-362,1983

OSTERGAARD, D.F., PAWLAK, T. P., "Three-Dimensional Finite Element for Analyzing Piezoelectric Structures", Swanson Analysis System, Inc., IEEE, Ultrasonics Symposium, pp. 639 – 644, Houston, EUA, 1986

R. LeLetty, F. Claeysen, Piezoactuators and Piezo Motors for High Strokes/Precise Positioning Applications, Actuator Messe Bremen, 1998.

ROBERTS, D., "Development of Linear Piezoelectric Motor basec upon the Inchworm Model" Mechanical Sciences Sector, Dera, Franborough, Hants, GU14, OLX, *Proceedings of Smart Structures & Integrated Systems – 6th SPIE (Annual International Symposium on Smart Structures and Materials)*, Newport Beach, California (EUA), março de 1999 (anais em CDROM)

SILVA, E. C. N., "Modelagem Vibracional de transdutores de ultra-som piezoeletricos pelo método de elementos finitos", Escola Politécnica – USP, São Paulo, 1993

SIMÕES, D.A. O Método dos Elementos Finitos e sua Aplicação com ANSYS. Monografia, 176 p., FEG – Unesp, 2005AGUILERA FERNANDES, EDSON.

Swanson Analisys System, INC. ANSYS – Getting started for Revision 5.1. Upd0 DN-p511:51, september 30, 1990

U. Dibbern, Piezoelectric Actuators in Multilayer Technique, Proc. Actuator 94 Conf., Pub Messe Bremen, pp 114-118, 1994.

APÊNDICE

Código-Fonte do “Software” de Comando em MATLAB

```

daqregister('joz.dll');
% Add 4 channels. One for x, y, z and r axis.
ai=analoginput('joy',1); % ID do joystick (paineel de controle)
addchannel(ai,[1 2 3 4 5 6]); %channels: 1=X ; 2=Y ; 3=Z; 4=R ; 5= botao
(quase binario) ; 6=no de botoes primidos

% Set up the display
hFig=figure('DoubleBuffer','on');
hJoy = plot(0,0,'x','MarkerSize',10,'LineWidth', 4);
hold on;
hJoy2 = plot(0,0,'x','MarkerSize',20, 'LineWidth', 4);
axis([-11 11 -11 11]);
hTitle=title('Controle Acionado! Tempo decorrido: ');
hXAxis=xlabel('Botao primido: 0, No. de botoes primidos: 0');
t0 = clock;
tt = [];

%Create a GPIB object%%%%%%%%%%%%%
obj1 = instrfind('Type', 'gpib', 'BoardIndex', 7, 'PrimaryAddress', 10,
'Tag', '');

% Create the GPIB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(obj1)
    obj1 = gpib('AGILENT', 7, 10);
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1)
end

% Connect to instrument object, obj1.
fopen(obj1);

% Communicating with instrument object, obj1.
data1 = query(obj1, '*IDN?')
% Vamos testar ajustar as tensões nas saídas 1 e 2
Tensao_X=0;
Tensao_Y=0;

fprintf (obj1, 'INST:SEL OUT1');
fprintf (obj1, 'VOLT %d', Tensao_X);
fprintf (obj1, 'INST:SEL OUT2');
fprintf (obj1, 'VOLT %d', Tensao_Y);
fprintf (obj1, 'OUTPUT ON');

%%%%%%%%%%%%%
while 1
    d = getsample(ai);

    d(2) = -d(2); d(4) = -d(4);

    if d(1)<0
        d(1)=0;
    end
    if d(2)<0
        d(2)=0;
    end
    Tensao_X = d(1);

```

```

Tensao_Y = d(2);
if Tensao_X < 0
    Tensao_X=0;
end
if Tensao_Y < 0
    Tensao_Y=0;
end

% decoding the data from dll: JoyIn.cpp
ButtonsPressed = round((10+d(5))*32768/10); %so pra pegar os botoes
bP = ButtonsPressed;
NoOfButtonsPressed = round((10+d(6))*32768/10);
nBP = NoOfButtonsPressed;
set(hJoy,'XData',d(1),'YData',d(2));
set(hJoy2,'XData',d(3),'YData',d(4));
set(hTitle,'String',['Controle      Acionado!      Tempo      decorrido:      '
num2str(etime(clock,t0))]);
set(hXAxis,'String',['Botao primido: ',num2str(bP),'  No. de botoes
primidos: ',num2str(nBP)]);
tt = [tt; etime(clock,t0)];
drawnow

fprintf (obj1, 'INST:SEL OUT1');
fprintf (obj1, 'VOLT %d', Tensao_X*3);
fprintf (obj1, 'INST:SEL OUT2');
fprintf (obj1, 'VOLT %d', Tensao_Y*3);
end

% Disconnect from instrument object, obj1.
%fclose(obj1);

% Clean up all objects.
%delete(obj1);

```

ANEXO

Manual de instalação do Joystick no MATLAB:

Você precisa ter um Joystick previamente instalado.

Se mais de um Joystick estiver instalado no sistema, você pode pegar o ID do joystick em Control panel/Gaming options/Controller IDs. Se tiver problemas com os IDs no MatLab, tente mudar os IDs no painel de controle

No MATLAB:

1. Abra o MATLAB.
2. Dircione o caminho para o diretório onde estiverem os seus arquivos.
 - File/Set Path/Add Folder.
 - Clique em Save.
3. No prompt de comando,digite daqregister('joy').
4. Pronto!