



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Vinícius Michelan Demarque

Simulação, fabricação e comando de um micro-espelho piezelétrico Z

São Paulo

2008

Vinícius Michelan Demarque

Simulação, fabricação e comando de um micro-espelho piezelétrico Z

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo relacionada à disciplina
PMR2550 – Projeto de Conclusão
de Curso II

Curso de Graduação: Engenharia
Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos
Nelli Silva

São Paulo

2008

Resumo

Este trabalho apresenta as etapas de projeto e execução de um micro eletro mecanismo (MEMS), que são simulação, fabricação e comando. O MEMS abordado nesse trabalho é um micro-espelho com deslocamento no eixo Z atuado por cerâmicas piezelétricas.

A fase de projeto consiste em dimensionar o protótipo de acordo com outros micro-mecanismos já existentes, obtidos através de pesquisas, e as limitações impostas pelos meios disponíveis para fabricação e análise. A viabilidade do projeto é analisada através de simulação por um software de Elementos Finitos 3D (ANSYS).

Neste software, analisa-se os deslocamentos do micro-espelho para uma série de tensões dadas e os modos de vibrar dos atuadores para se conhecer a freqüência de trabalho do mesmo.

A fase de execução compreende as duas outras etapas. A fabricação do espelho e dos atuadores é feita por uma empresa especializada, pois necessita de técnicas não disponíveis, como fotolitografia. O comando é desenvolvido no software MATLAB e é feito através de joystick ligado ao computador. O computador recebe os sinais de entrada do joystick e os interpreta no software MATLAB. Este software, por sua vez, envia sinais através de uma placa GPIB do computador para a fonte de tensão ligada ao micro-espelho. Este comando é desenvolvido para que o micro-espelho piezelétrico seja testado e para que seja feita a comparação entre o resultado simulado e o obtido.

Os deslocamentos obtidos pelo micro-espelho são da ordem de micrômetros (10^{-6} m). Para medir deslocamentos dessa magnitude utiliza-se um interferômetro laser.

Palavras chaves: Micro-espelho, atuador piezelétrico, atuador bi-laminar, MEMS, microeletromecanismos

Abstract

This work presents the steps of Project and execution of a Micro-Electro-Mechanical System (MEMS), that are simulation, manufacturing and control. The MEMS mentioned at this work is a micro mirror with a displacement at Z axis acted by piezoelectric ceramics.

The phase of project consists on dimension the prototype according to other existing MEMS, obtained through researches, and the limitations imposed by the available means for manufacturing and analysis. The viability of the project is examined through simulation by a software of 3D Finite Elements (ANSYS).

This software analyses the displacement of the micro mirror for a set of given tensions and the ways of vibrate of the actuators to know the operating frequency of the micro mirror.

The execution phase consists on the two other steps. The manufacturing of the mirror and the actuators is made by a specialist company, because it needs unavailable techniques, like photolithography. The control is developed on MATLAB and is made through joystick connected to a computer. The computer receives input signals from the joystick and interprets them on the MATLAB software. This software sends signals through the GPIB board of the computer to the tension source connected to the micro mirror. This control is developed to test the micro mirror and to compare the results of the simulations with the results obtained by the prototype.

The displacements obtained by the micro mirror are from the order of the micrometer (10^{-6} m). To measure displacements of that size, it's used a laser interferometer.

Keywords: Micro mirror, piezoelectric actuator, bilaminar actuator, MEMS, Micro-Electro-Mechanical System

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Reflexão do micro-espelho rotacional (TSAUR <i>et al.</i> , 2002).....	página 1
Figura 1.2 – Reflexão do micro-espelho com deslocamento em Z (YEE <i>et al.</i> , 2000).....	página 2
Figura 1.3 – “Scanner” 1D (KOBAYASHI; TSAUR; MAEDA, 2005).....	página 3
Figura 1.4 – Micro-espelho rotacional 1D (FILHOL <i>et al.</i> , 2005).....	página 4
Figura 1.5 – Desenho esquemático de micro-espelho piezelétrico (MAEDA <i>et al.</i> , 2002).....	página 5
Figura 1.6 – Micro-espelho piezelétrico (YEE <i>et al.</i> , 2000).....	página 5
Figura 2.1 – Eixos de polarização em um monocristal e um policristal... Figura 2.2 – Polarização de um policristal.....	página 8
Figura 2.3 – Efeito piezelétrico em cerâmicas.....	página 9
Figura 2.4 – Propriedades da cerâmica piezelétrica em um atuador bilaminar.....	página 12
Figura 3.1 – Criação dos sólidos.....	página 15
Figura 3.2 – Modelagem do micro-espelho.....	página 16
Figura 3.3 – Definição dos tipos de elementos.....	página 17
Figura 3.4 – Graus de liberdade do elemento 2.....	página 18
Figura 3.5 – Propriedades dos materiais.....	página 19
Figura 3.6 –Escolha do elemento para discretização de um material... Figura 3.7 – Determinação do tamanho dos elementos.....	página 21
Figura 3.8 – Resultado da discretização.....	página 23
Figura 3.9 – Nós da Malha.....	página 25
Figura 3.10 – Seleção do tipo de análise.....	página 26
Figura 3.11 – Condições de contorno de deslocamento.....	página 27
Figura 3.12 – Condições de contorno elétricas.....	página 28
Figura 3.13 – Configuração da análise modal.....	página 29
Figura 3.14 - Configuração do método Block Lanczos.....	página 30
Figura 3.15 – Condição de contorno elétrica real e imaginária.....	página 31
Figura 3.16 – Opções da análise harmônica.....	página 32

Figura 3.17 – Plotando forma deformada mais bordas não deformadas.....	página 33
Figura 3.18 – Plotando o deslocamento no Eixo Z.....	página 33
Figura 3.19 – Deformação com cerâmicas em fase para baixo.....	página 35
Figura 3.20 – Deslocamento com cerâmicas em fase para baixo.....	página 35
Figura 3.21 – Deformação com cerâmicas em fase para cima.....	página 36
Figura 3.22 – Deslocamento com cerâmicas em fase para cima.....	página 36
Figura 3.23 – Deformação com cerâmicas em oposição de fase.....	página 37
Figura 3.24 – Deslocamento com cerâmicas em oposição de fase.....	página 37
Gráfico 3.1 – Tensão X Ângulo para o micro-espelho rotacionado.....	página 38
Gráfico 3.2 – Tensão X Deslocamento para micro-espelho deslocado para cima.....	página 39
Figura 3.25 – Visualizador de Variáveis.....	página 41
Figura 3.26 – Adicionar Variável ao Visualizador de Variáveis.....	página 41
Gráfico 3.3 – Análise Harmônica no intervalo de 150 a 600 Hz (a) e de 1100 a 1350 Hz (b).....	página 42
Figura 4.1 – Desenho em CAD do protótipo.....	página 43
Figura 4.2 – Desenho de conjunto do protótipo.....	página 44
Figura 4.3 – Desenho de fabricação da base.....	página 45
Figura 4.4 – Desenho de fabricação do micro-espelho.....	página 46
Figura 4.5 – Desenho de fabricação do engaste.....	página 46
Figura 5.1 – Etapas de produção do micro-espelho.....	página 48
Figura 5.2 – Componentes do atuador.....	página 49
Figura 6.1 – Esquema do fluxo de comando.....	página 51
Figura 6.2 – Interferômetro Laser ligado ao micro-espelho.....	página 54
Gráfico 7.1 – Tensão Elétrica X Deslocamento do micro-espelho.....	página 55
Figura 7.1 – Aparelhos de comando do micro-espelho.....	página 56

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Resultados das simulações estáticas.....	página 38
Tabela 3.2 – Resultados da simulação modal.....	página 40
Tabela 4.1 – Lista de materiais do protótipo.....	página 44

Lista de Símbolos

θ	Ângulo de varredura do micro-espelho
h	Deslocamento vertical do micro-espelho
[T]	Matriz tensão mecânica
[S]	Matriz deformação mecânica
{E}	Vetor campo elétrico
{D}	Vetor deslocamento elétrico
[c^E]	Matriz de rigidez elástica obtida a campo elétrico constante
[e]	Matriz piezelétrica de tensão mecânica
[ε^S]	Matriz dielétrica obtida a deformação constante
[M_{uu}]	Matriz de massa
[K_{uu}]	Matriz de rigidez elástica
[K_{uΦ}]	Matriz de rigidez piezelétrica
[K_{ΦΦ}]	Matriz de rigidez dielétrica
{u}	Deslocamento
{Φ}	Campo elétrico potencial
{F}	Forças mecânicas
{Q}	Cargas elétricas
ρ	Densidade do material
X	Eixo ou direção X
Y	Eixo ou direção Y
Z	Eixo ou direção Z

Sumário

1. Introdução.....	página 1
1.1. OBJETIVO.....	página 6
1.2. JUSTIFICATIVA.....	página 6
2. Formulação Teórica.....	página 8
2.1. MATERIAIS PIEZELÉTRICOS.....	página 8
2.2. FOTOLITOGRÁFIA.....	página 11
2.3. ATUADORES BILAMINARES.....	página 11
3. Análise pelo Método dos Elementos Finitos.....	página 13
3.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PIEZELÉTRICO....	página 13
3.2. MODELAGEM.....	página 14
3.3. DISCRETIZAÇÃO DO MODELO.....	página 16
3.4. SIMULAÇÃO.....	página 25
3.4.1. Análise Estática.....	página 26
3.4.2. Análise Modal.....	página 28
3.4.3. Análise Harmônica.....	página 30
3.5. VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS.....	página 32
3.5.1. Resultados da Análise Estática.....	página 32
3.5.2. Resultados da Análise Modal.....	página 39
3.5.3. Resultados da Análise Harmônica.....	página 40
4. Projeto do Protótipo Experimental.....	página 43
5. Fabricação do Protótipo.....	página 47
5.1. FABRICAÇÃO DO MICRO-ESPELHO.....	página 47
5.2. FABRICAÇÃO DOS ATUADORES.....	página 48
5.3. FABRICAÇÃO DA BASE.....	página 49
5.4. FABRICAÇÃO DO ENGASTE.....	página 50
6. Comando do Micro-espelho.....	página 51
6.1. FLUXO DE COMANDO.....	página 51
6.2. INTERFACE GPIB.....	página 52
6.3. INTERFACE ENTRE O MATLAB E O JOYSTICK.....	página 52
6.4. INTERFERÔMETRO LASER.....	página 53
7. Resultados.....	página 55

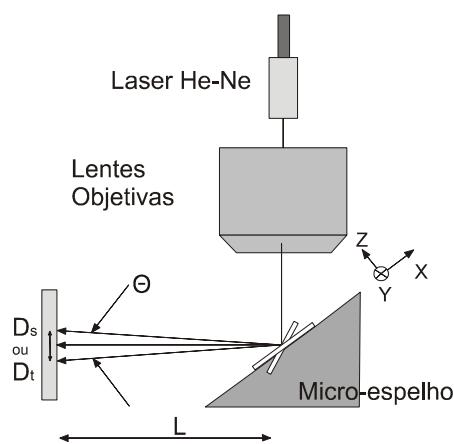
8. Conclusão.....	página 57
9. Referências Bibliográficas.....	página 58
Anexo A – Resultados da Análise Modal	página 60
Anexo B – Código Fonte do Programa em MATLAB.....	página 63

1. Introdução

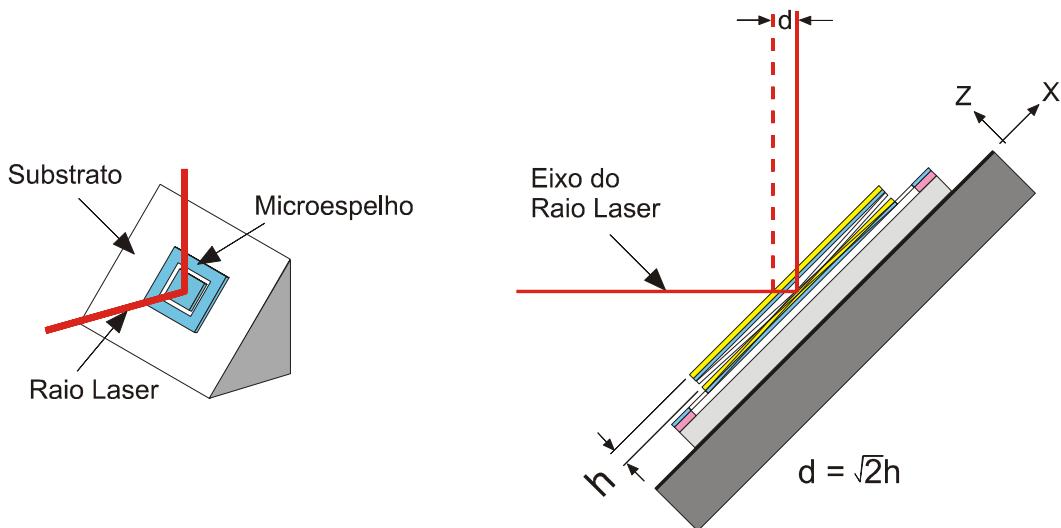
Nos últimos anos, muitas pesquisas envolvendo micro-atuadores e micro-espelhos foram desenvolvidas. Todas elas são ligadas a diversos tipos de aplicações, desde leitura de código de barras a escaneamento de imagens (TSAUR *et al.*, 2002). Diferentes métodos de atuação são utilizados. Eletromagnéticos, eletrostáticos, térmicos e piezelétricos são os mais citados na literatura (KOBAYASHI; TSAUR; MAEDA, 2005). A necessidade de uma grande tensão elétrica nos eletromagnéticos e eletrostáticos e a demora na resposta dos térmicos faz com que os atuadores piezelétricos sejam superiores a baixas tensões e baixo consumo de energia.

Os atuadores piezelétricos sofreram uma grande expansão nos últimos anos e a exigência de uma grande precisão em processos de diversas naturezas contribuiu com o aumento da utilização desses materiais.

Uma das aplicações que exigem uma altíssima precisão, ou seja, um deslocamento extremamente pequeno (da ordem de 10^{-6} m) e bem controlado é a leitura ótica de dados, ou “scanner” óptico. Para essa finalidade, utiliza-se um micro-espelho atuado por cerâmicas piezelétricas. Esse espelho pode ser rotacionado no eixo X ou Y, como visto na figura 1.1 (TSAUR *et al.*, 2002), ou então deslocado no eixo Z, representado na figura 1.2 (YEE *et al.*) para fazer a varredura de uma determinada área alterando a posição do feixe de luz refletido pelo espelho.



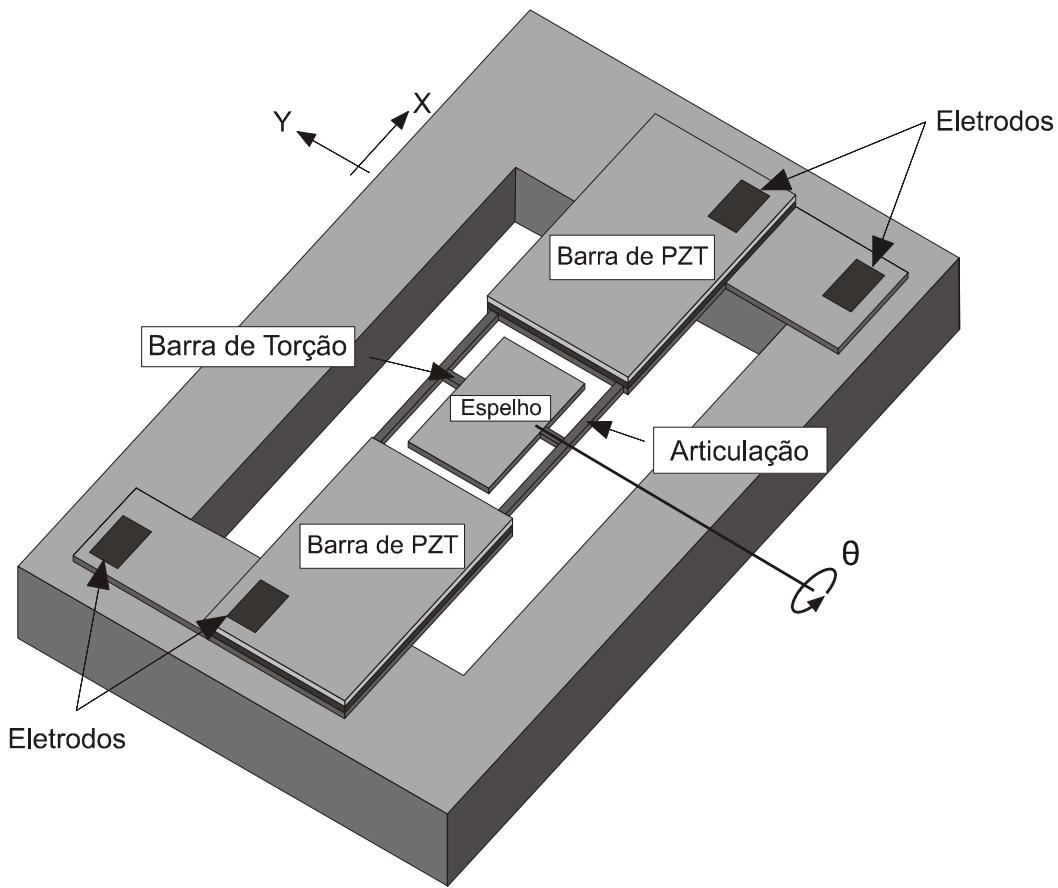
[Figura 1.1 - Reflexão do micro-espelho rotacional (TSAUR *et al.*, 2002)]



[Figura 1.2 - Reflexão do micro-espelho com deslocamento em Z (YEE *et al.*, 2000)]

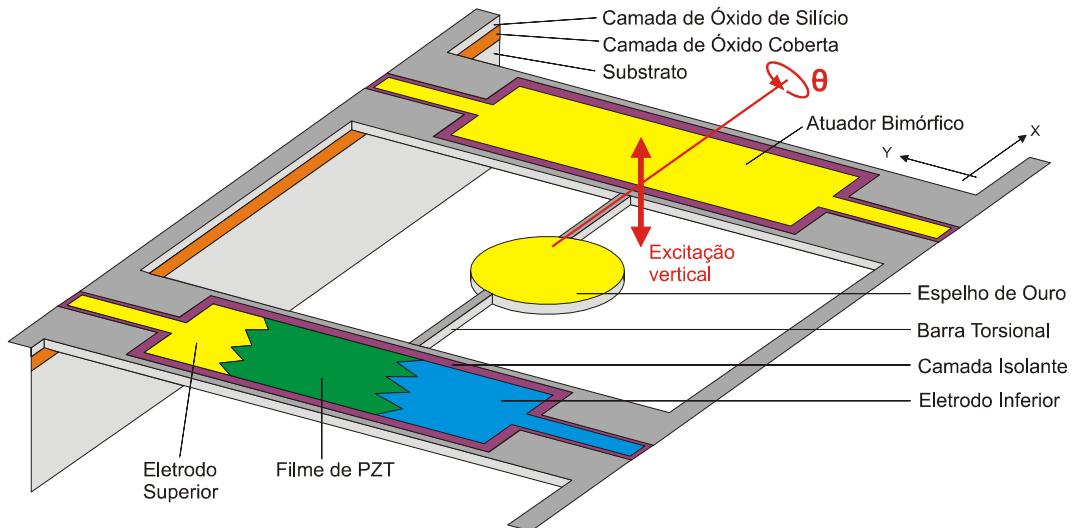
A seguir, alguns micro-espelhos piezelétricos estudados, fabricados e testados são apresentados.

A figura 1.3 ilustra um micro-espelho piezelétrico para “scanner” 1D (uma dimensão). As barras engastadas de PZT são os atuadores que suportam o espelho através das barras de torção e das articulações que ligam o micro-espelho às barras (KOBAYASHI; TSAUR; MAEDA, 2005). Um campo elétrico passa pelas cerâmicas através da excitação dos eletrodos, fazendo com que o espelho rotacione em torno do eixo das barras de rotação. O ângulo θ de varredura chega a 25° dependendo das dimensões das barras e das articulações.



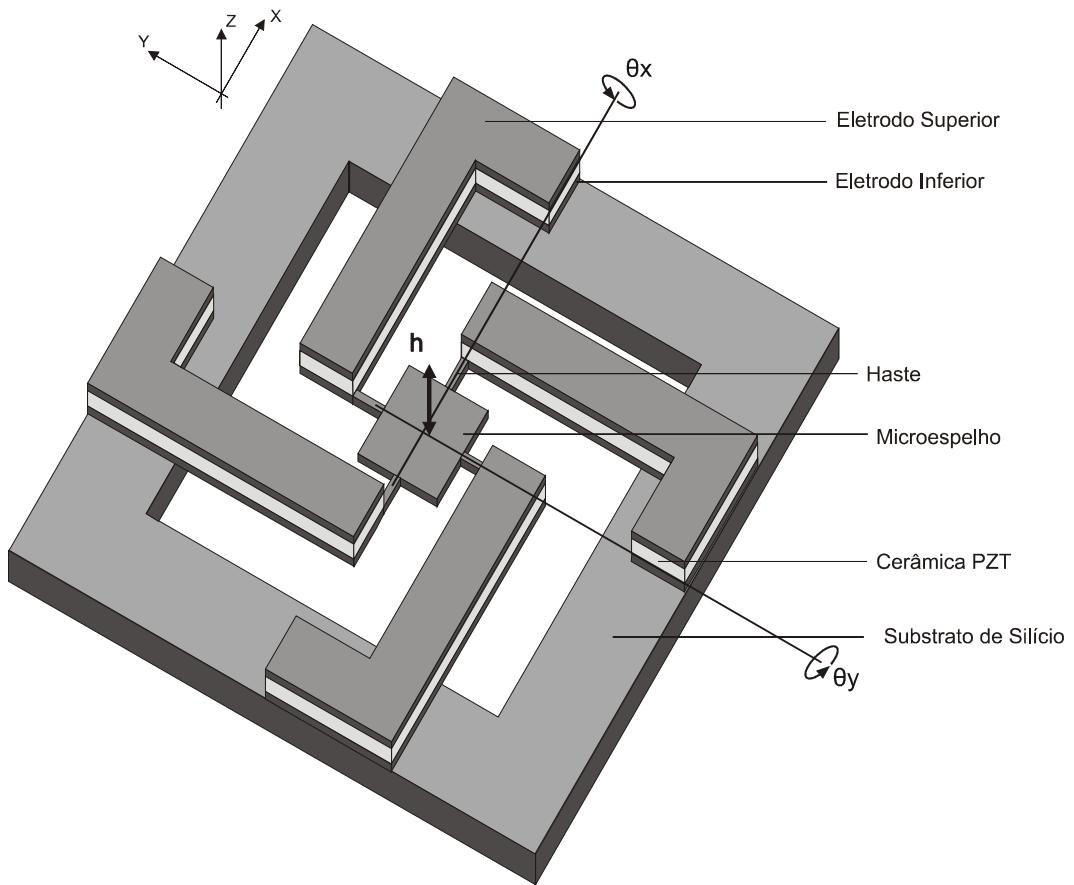
[Figura 1.3 – “Scanner” 1D (KOBAYASHI; TSAUR; MAEDA, 2005)]

A figura 1.4 mostra outro tipo de mecanismo para espelho rotacional. Neste caso, as barras torsionais foram conectadas fora do centro do espelho circular (FILHOL *et al.*, 2005), assim, com uma excitação vertical do atuador piezelétrico o espelho tende a apresentar um movimento oscilatório não mais vertical, mas sim rotacional. Variando o comprimento e a espessura das barras de torção pode-se obter um ângulo de varredura θ de $19,8^\circ$ a $99,1^\circ$.

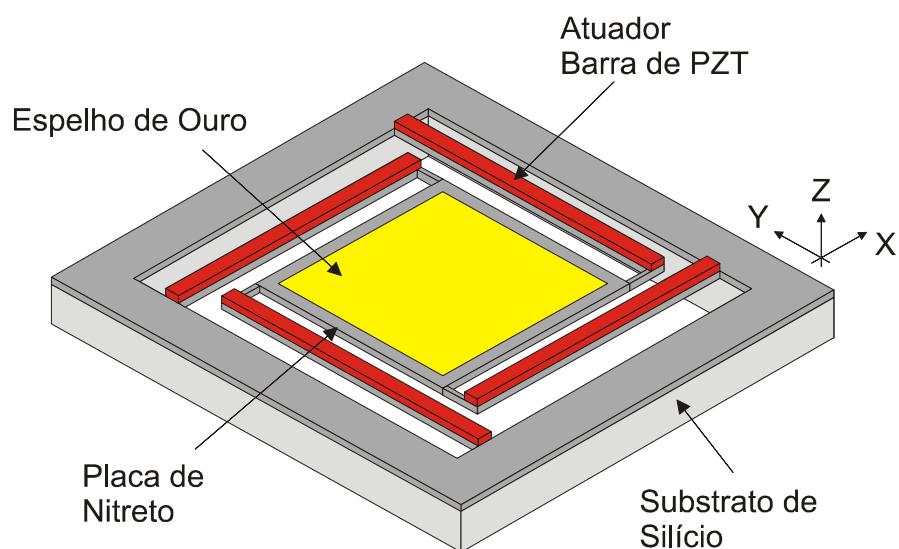


[Figura 1.4 – Micro-espelho rotacional 1D (FILHOL *et al.*, 2005)]

As figuras 1.5 e 1.6 exibem micro-espelhos que podem ser usados para rotação nos eixos X e Y (TSAUR *et al.*, 2002) e para deslocamento no eixo Z (MAEDA *et al.*, 2002). Quatro barras engastadas são utilizadas nesse caso e o micro-espelho é suportado por quatro pequenas articulações. A figura 1.5 é um desenho esquemático deste tipo de espelho, já a figura 1.6 demonstra um espelho com os materiais utilizados para sua fabricação. Para um espelho com rotação nos dois eixos o ângulo de varredura θ obtido foi de 2° . Já no espelho com deslocamento vertical h , este passou de cinco micrômetros.



[Figura 1.5 - Desenho esquemático de micro-espelho piezelétrico (MAEDA *et al.*, 2002)]



[Figura 1.6 - Micro-espelho piezelétrico (YEE *et al.*, 2000)]

Para o espelho acima apresente rotação em torno de um eixo, basta que apenas uma das cerâmicas piezelétricas seja excitada por uma tensão elétrica (TSAUR *et al.*, 2002), ou que elas sejam excitadas em oposição de fase, isto é, uma para baixo e sua oposta para cima. Já para a obtenção de um deslocamento vertical em Z, é preciso excitar duas cerâmicas opostas ou todas as quatro (YEE *et al.*) em fase, isto é, todas para baixo ou todas para cima.

Dentre os tipos de espelhos abordados anteriormente, o de movimento vertical estudado por YEE, *et al.* será melhor estudado nesse projeto, sendo feito o estudo, a simulação e o desenvolvimento de um protótipo, que será controlado por joystick ligado a um computador para analisar as respostas das cerâmicas e do espelho e compará-las com a simulação.

1.1. *OBJETIVO*

Com o avanço da utilização de cerâmicas piezelétricas, surgem mais e mais tipos de atuadores que se valem das propriedades desse material. Esse trabalho tem por objetivo estudar o projeto, a fabricação e o comando de um micro-espelho piezelétrico com movimentação vertical (eixo Z) utilizado para leitura de dados digitais e “scanners” óticos.

O projeto visa à obtenção de um conhecimento sobre os espelhos piezelétricos que estão sendo desenvolvidos, mais precisamente os de deslocamento vertical. Com uma base de conhecimentos firmada, um projeto de um espelho será realizado de acordo com as técnicas disponíveis e limitações impostas.

O espelho será construído por empresa especializada e o controle desenvolvido no MATLAB através de joystick ligado a um computador permitirá o teste do dispositivo e a comparação dos resultados numéricos com os resultados reais obtidos.

1.2. *JUSTIFICATIVA*

A grande utilização de atuadores piezelétricos tem incentivado o estudo dos mesmos. Um projeto desse tipo de atuador envolve várias áreas da Engenharia, principalmente Mecatrônica, como resistência dos materiais, eletrônica analógica, CAE (Engenharia Auxiliada por Computador), metodologia

de projetos, etc. Além disso, promove conhecimentos específicos nas áreas de microeletromecanismos (MEMS), atuadores piezelétricos e simulação numérica por Método dos Elementos Finitos (MEF).

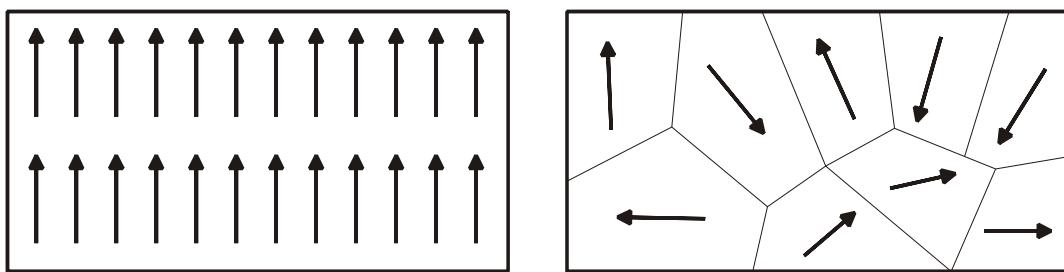
A leitura de dados de um CD, DVD ou HD requer um ajuste fino do raio laser do leitor, pois ele deve posicionar-se exatamente na trilha onde os dados são gravados. Este ajuste pode chegar a um micrômetro ou menor ainda quando um atuador piezelétrico é usado para a movimentação do espelho, podendo-se assim desenvolver uma armazenagem de dados mais compacta.

A figura 1.2 demonstra a relação entre o movimento do espelho e o deslocamento final do raio.

2. Fundamentação Teórica

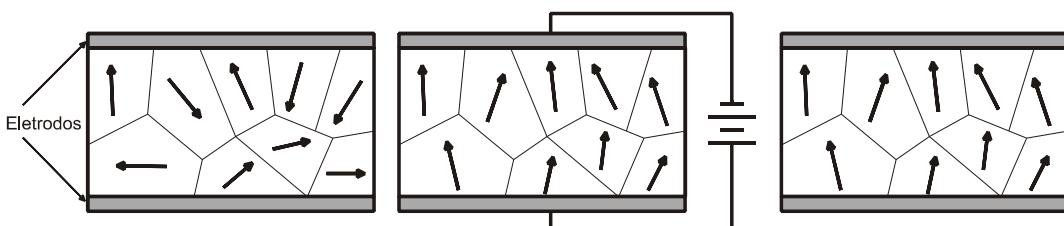
2.1. MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

Um material piezelétrico é assim caracterizado quando produz tensão elétrica ao ser aplicada uma deformação mecânica e quando se deforma ao se aplicar um campo elétrico (AURÉLIEN, 2008). Esse efeito é conhecido como efeito piezelétrico e acontece devido à molécula de material piezelétrico apresentar um dipolo, que consiste em uma divisão bastante definida entre a carga positiva e negativa da molécula. O eixo de polarização, ou eixo polar, é uma linha imaginária que passa pelo centro das duas cargas do dipolo. Em um monocrystal, o eixo de polarização de todos os dipolos está na mesma direção, já num policristal pode-se achar regiões com eixos de polarização em direções variadas. A figura 2.1 demonstra essas duas situações.



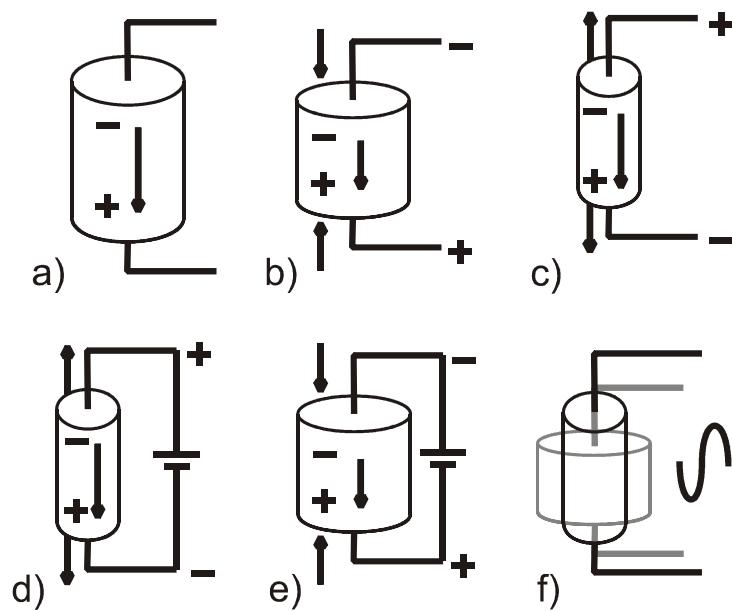
[Figura 2.1 – Eixos de polarização em um monocrystal e um policristal]

Pode-se polarizar um policristal aplicando nele um forte campo elétrico. Durante a aplicação do campo os eixos de polarização se alinharem, após isso, os eixos permanecerão numa configuração próxima à anterior. A figura 2.2 ilustra esse procedimento.



[Figura 2.2 – Polarização de um policristal]

Com o material polarizado, o efeito piezelétrico pode ser observado de várias maneiras. A figura 2.3 (a), (b) e (c) demonstra o efeito piezelétrico numa cerâmica ao se comprimir ou tracionar a mesma. Já a figura 2.3 (d), (e) e (f) apresentam o efeito piezelétrico ao se aplicar uma tensão contínua, reversa e alternada, respectivamente.



[Figura 2.3 – Efeito piezelétrico em cerâmicas]

As equações constitutivas dos materiais piezelétricos (LAMBRECHT, CUNHA, 2007) são:

- $[T] = [c^E][S] - [e]^t\{E\}$
- $\{D\} = [\epsilon^S]\{E\} + [e][S]$

A junção destas duas equações forma o tensor de propriedades piezelétrico. A seguir apresentamos o tensor de propriedades para a classe de simetria 6 mm com polarização na direção Y (LAMBRECHT, CUNHA, 2007).

$$\begin{bmatrix} T'_{xx} \\ T'_{yy} \\ T'_{zz} \\ T'_{xy} \\ T'_{yz} \\ T'_{xz} \\ D'_x \\ D'_y \\ D'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{13}^E & c_{12}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} & 0 \\ c_{13}^E & c_{33}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} & 0 \\ c_{12}^E & c_{13}^E & c_{11}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 & -e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 & 0 & -e_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{33} & e_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_{xx} \\ S'_{yy} \\ S'_{zz} \\ S'_{xy} \\ S'_{yz} \\ S'_{xz} \\ E'_x \\ E'_y \\ E'_z \end{bmatrix}$$

No estado plano de deformações mecânicas, S_{zz} , S_{yz} , S_{xz} e E_z são nulos. Isso quer dizer que não há deformações nem campo elétrico no eixo Z, concentrando-se tudo no plano XY. O tensor se reduz para:

$$\begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{zz} \\ D_x \\ D_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & e_{31} \\ c_{13}^E & c_{44}^E & 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & c_{13}^E & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & e_{15} & -\varepsilon_{11}^S & 0 \\ e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & -\varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{xy} \\ -E_x \\ -E_y \end{bmatrix}$$

O eixo X é representado pela direção 1 e o eixo Y pela direção 3. Essa matriz é usada pelo Método dos Elementos Finitos, e os valores não-nulos devem ser passados como parâmetros.

2.2. FOTOLITOGRÁFIA

A litografia foi descoberta experimentalmente por Nicéphore Niépce em 1822, na França (Madou, 2001). Niépce usou uma figura em papel manteiga sobre uma placa de vidro que cobria asfalto. Depois de algumas horas de exposição ao sol, a parte descoberta do asfalto endureceu, enquanto a outra parte pôde ser lavada, formando a figura em relevo no asfalto.

Esse experimento foi o pioneiro do que viria a ser a fotolitografia, meio muito usado nos dias de hoje para a fabricação de circuitos integrados e MEMS. Esse método é dividido em alguns passos.

O primeiro passo é a aplicação do resist. Resist é um composto químico que é depositado sobre todo o material. Esse composto é curado através de raios ultravioleta (UV). Existem dois tipos de resist, o negativo, que se torna insolúvel em soluções orgânicas ou à base de água quando exposto aos raios UV, e o positivo, que se torna solúvel em soluções extremamente alcalinas quando exposto aos mesmos raios. Este resist protegerá a parte da peça que ficará intacta e será removido da parte da peça que será corroída.

Em seguida é necessária a máscara, que é o que protege parte do resist. A máscara é feita de acordo com o resist, pois, se o resist é positivo, a máscara deve encobrir a parte da peça que não será corroída, enquanto o resto ficará exposto aos raios UV. Feita a máscara, ela deve ser posicionada sobre a peça com alguma distância. Em seguida, todo o aparato é exposto aos raios UV. Feita a cura do resist, deve-se removê-lo com o solvente apropriado.

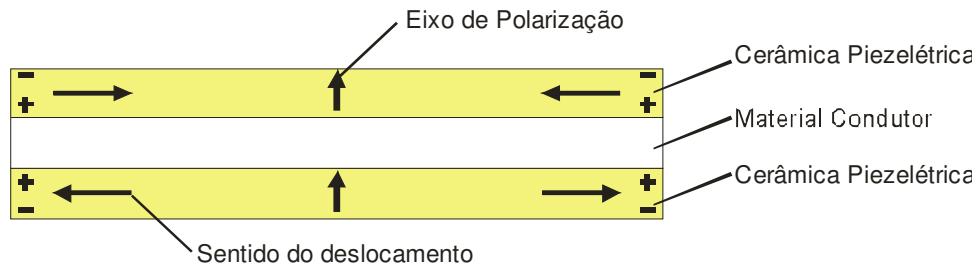
Quando o resist estiver removido, a peça original já pode ser atacada quimicamente através de corrosão úmida ou a seco. Quando a peça estiver no seu formato desejado, remove-se o resist curado e a peça está pronta para uso.

Dependendo da complexidade da peça, várias máscaras e muitas corrosões podem ser feitas.

2.3. ATUADORES BILAMINARES

Um atuador piezelétrico parte do princípio de que quando uma cerâmica piezelétrica é excitada por uma tensão, há um deslocamento como resposta a

essa excitação. Essa cerâmica pode tanto contrair quanto expandir. Num atuador bilaminar, as duas propriedades da cerâmica são utilizadas. A figura 2.4 ilustra as propriedades sendo usadas em conjunto.



[Figura 2.4 – Propriedades da cerâmica piezelétrica em um atuador bilaminar]

O material condutor está sendo usado como material de suporte além de ser o eletrodo intermediário. Este material suporte, quando colado a uma cerâmica que se expande ou se contrai, se deforma junto com a cerâmica. A presença de outra cerâmica, colada no lado oposto ao da primeira, permite que a amplitude do deslocamento proporcionado seja maior.

3. Análise pelo Método dos Elementos Finitos

3.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PIEZELÉTRICO

As equações que serão resolvidas pelo MEF são obtidas a partir da equação de equilíbrio obtida através da segunda lei de Newton (LAMBRECHT, CUNHA, 2007):

$$\nabla\{T\} = \rho \frac{\partial^2\{u\}}{\partial t^2}$$

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

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

A equação que descreve o comportamento elétrico é descrita através da equação de Maxwell (LAMBRECHT, CUNHA, 2007) como:

$$div\{\mathbf{D}\} = 0$$

onde o divergente é:

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

Considerando-se um material (domínio) piezelétrico, deve-se determinar o deslocamento \mathbf{u} e o campo elétrico potencial Φ . Estes dois parâmetros satisfazem o sistema de equações matriciais da vibração (UCHINO, 2003):

$$\begin{cases} [\mathbf{M}_{uu}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}_{uu}]\{\mathbf{u}\} + [\mathbf{K}_{u\Phi}]\{\Phi\} = \{\mathbf{F}\} \\ [\mathbf{K}_{u\Phi}]^t\{\mathbf{u}\} + [\mathbf{K}_{\Phi\Phi}]\{\Phi\} = \{\mathbf{Q}\} \end{cases}$$

Essas equações dificilmente poderiam ser calculadas pela teoria de resolução de sistemas de equações diferenciais. O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica de aproximação para achar a solução do sistema. Este método divide o domínio em pequenas partes (elementos), todos de tamanho finito. Esses elementos são conectados por pontos, chamados de nós. A solução do sistema é aproximada para cada um desses nós. Como a divisão desses elementos é arbitrária, vários tipos de malhas podem ser criados. Os mais comuns são elementos quadrados e triangulares. Obtido o resultado ponto a ponto pode-se plotar um gráfico com as soluções obtidas, permitindo a visualização e o entendimento da solução obtida pelo MEF.

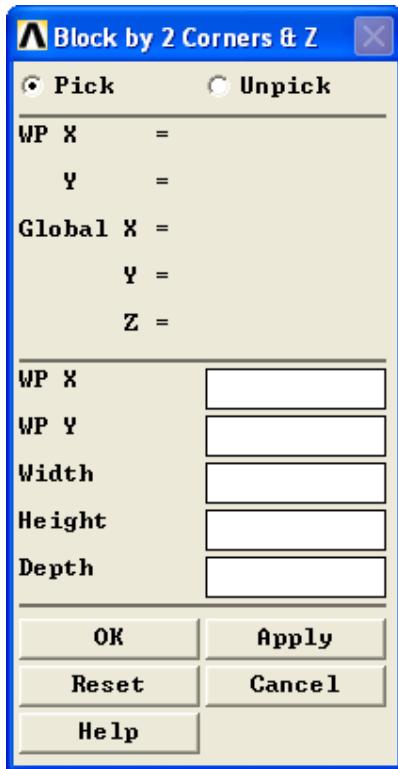
Para fazer a análise pelo MEF, devem-se seguir alguns passos que compreendem a modelagem, a discretização, a simulação e, por fim, a verificação e análise dos resultados. Foi utilizado o software ANSYS, desenvolvido para estudos em MEF, para realizar todas as etapas desta análise.

3.2. MODELAGEM

Como visto anteriormente, o objetivo deste trabalho é estudar um micro-espelho piezelétrico que siga os princípios do espelho estudado por YEE *et al*, 2000, apresentado na figura 1.6. No entanto, com fins didáticos, para estudar melhor a rotação proporcionada por esse tipo de espelho, algumas alterações nas dimensões e na configuração do micro-espelho foram feitas. O micro-espelho será preso por apenas duas regiões, ao invés de quatro, e estas regiões, chamadas articulações, serão dispostas no ponto médio de duas laterais opostas do espelho. As articulações serão presas por barras engastadas, e nestas barras serão coladas as cerâmicas piezelétricas, tanto em cima quanto em baixo, formando um atuador bilaminar. Esse atuador bilaminar será a peça chave da simulação feita a seguir.

Para a modelagem é preciso notar que não existem unidades nos dados fornecidos ao programa. Portanto, deve-se atentar em colocar todos os valores numéricos seguindo o mesmo sistema de padronização. Neste trabalho, todos os dados estarão seguindo o sistema internacional (SI).

Para começar a modelagem, os sólidos que serão utilizados na simulação devem ser criados. Esta simulação utiliza apenas blocos retangulares, e, para construí-los, utiliza-se o caminho *Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By 2 Corners & Z*. Os blocos utilizados são de 10 x 10 x 0,1 mm para o micro-espelho, 7 x 2 x 0,1 mm para as articulações e 5 x 36 x 0,2 mm para as barras engastadas e para as cerâmicas piezelétricas. A janela que se abre para a criação de um bloco tem como dados de entrada a posição do canto superior direito da face de baixo e a largura, a altura e a profundidade do bloco, como mostra a figura 3.1.



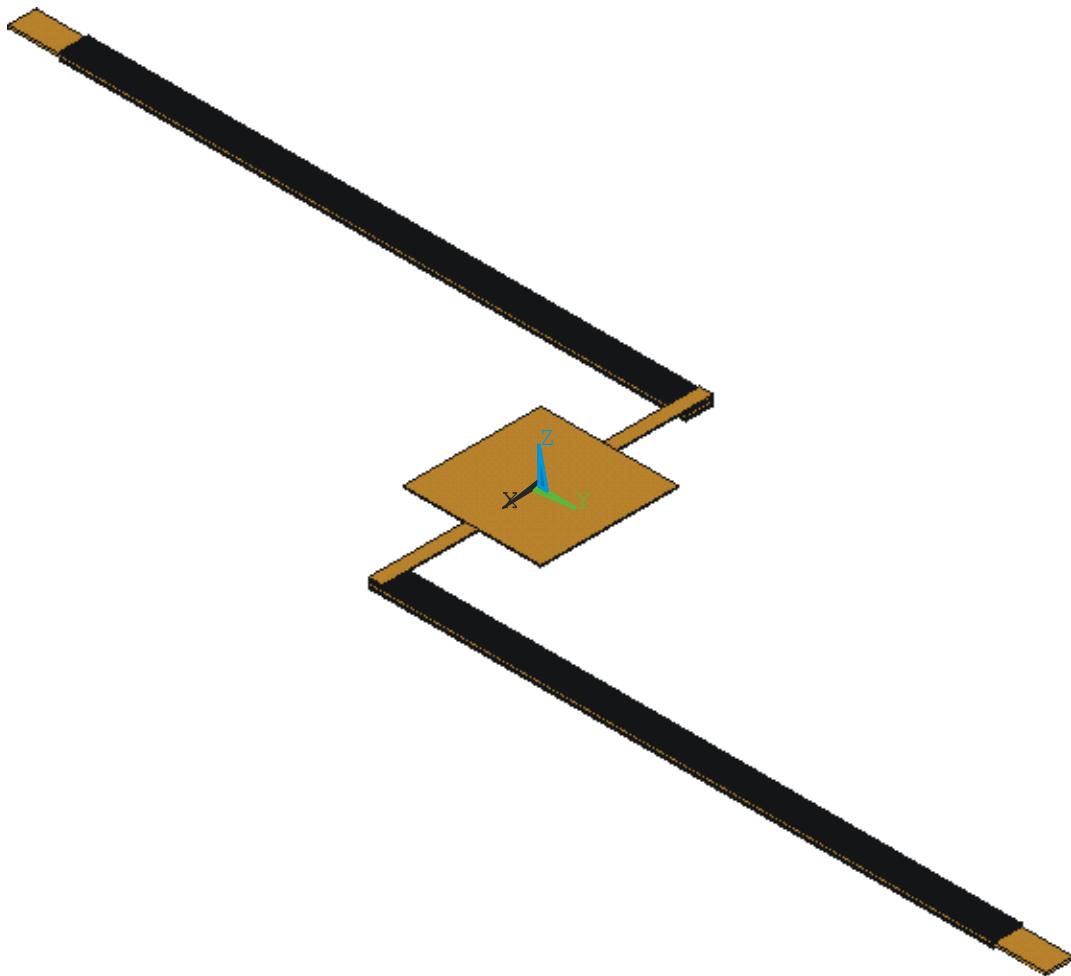
[Figura 3.1 – Criação dos sólidos]

Para posicionar os sólidos na configuração desejada, se necessário, deve-se usar o caminho *Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Volume*.

Como cada sólido é desenhado separadamente a partir de figuras básicas deve-se criar um vínculo entre eles. Para isso utiliza-se *Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Volumes > Pick all*. Assim, todas as faces dos sólidos que forem coincidentes serão “coladas”.

Terminados esses passos, todos os sólidos estarão da mesma cor, e, para facilitar a visualização dos diferentes materiais, pode-se definir a cor dos sólidos usando *Menu > PlotCtrls > Style > Colors > Picked Entity Colors > Volumes*.

A figura 3.2 mostra o resultado da modelagem.

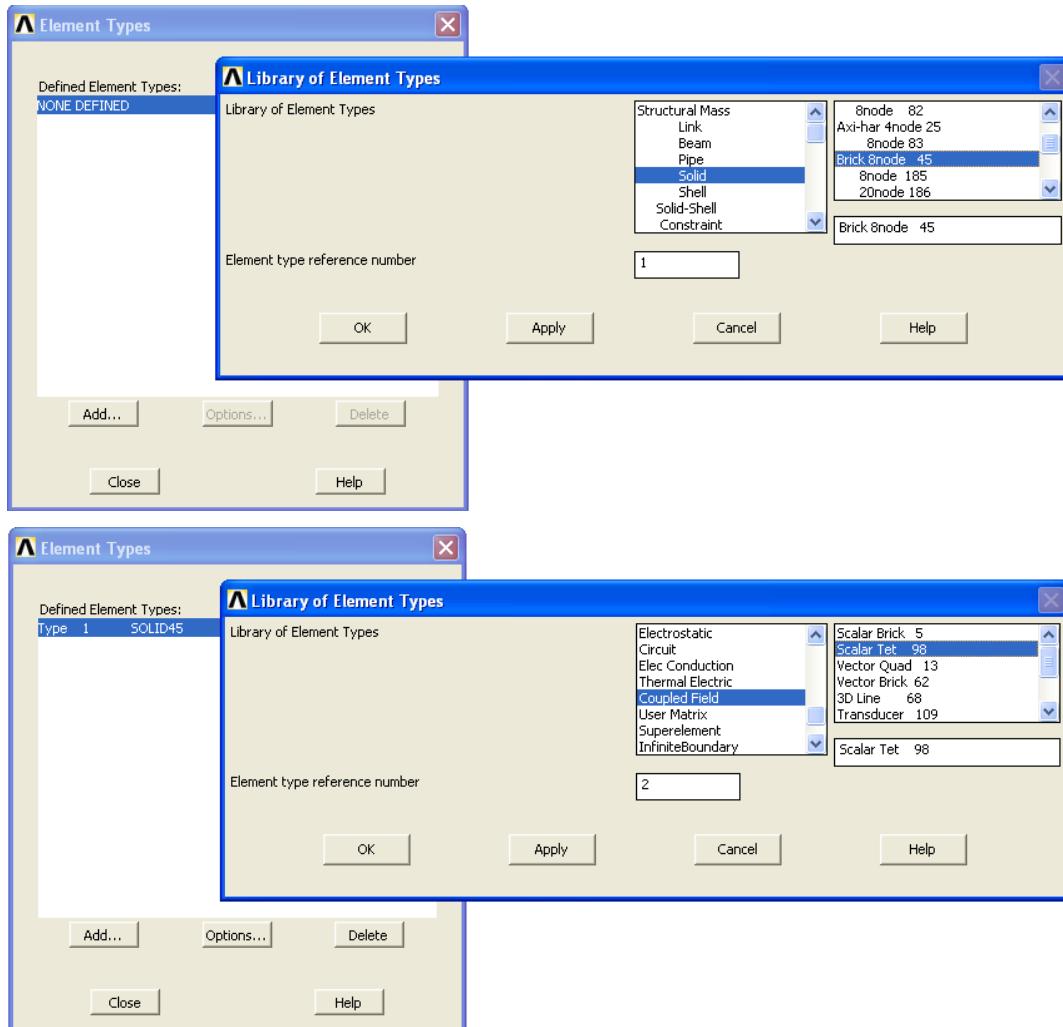


[Figura 3.2 – Modelagem do micro-espelho]

3.3. DISCRETIZAÇÃO DO MODELO

A discretização compreende a formação da malha na qual se define o tamanho e o tipo dos elementos que serão utilizados na análise. O primeiro passo é a definição dos tipos de elementos que serão utilizados e sua configuração. Para adicionar um tipo de elemento à análise utiliza-se o

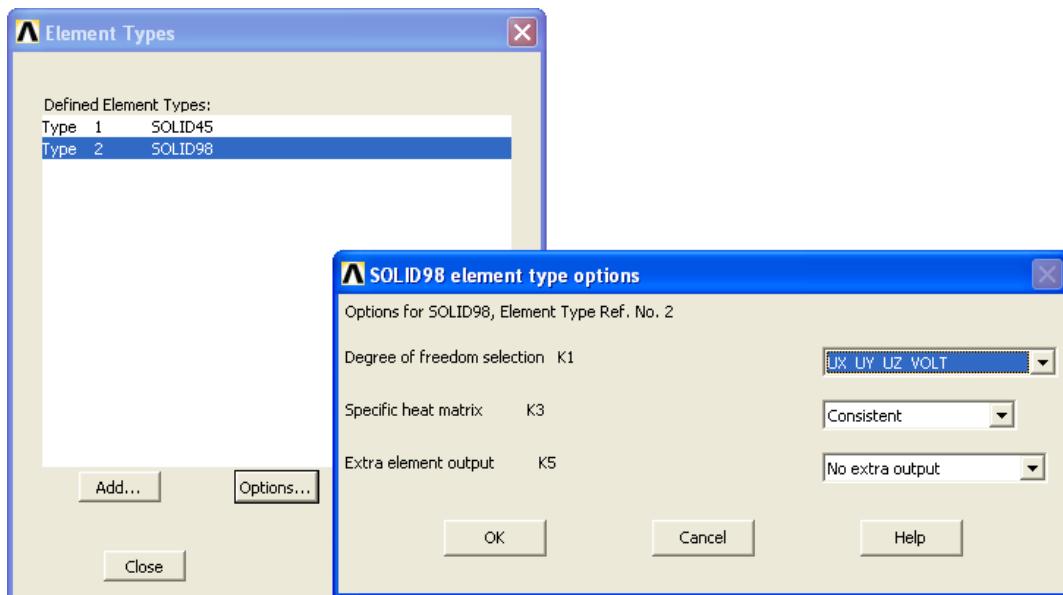
caminho *Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete*. A figura 3.3 apresenta os elementos selecionados.



[Figura 3.3 – Definição dos tipos de elementos]

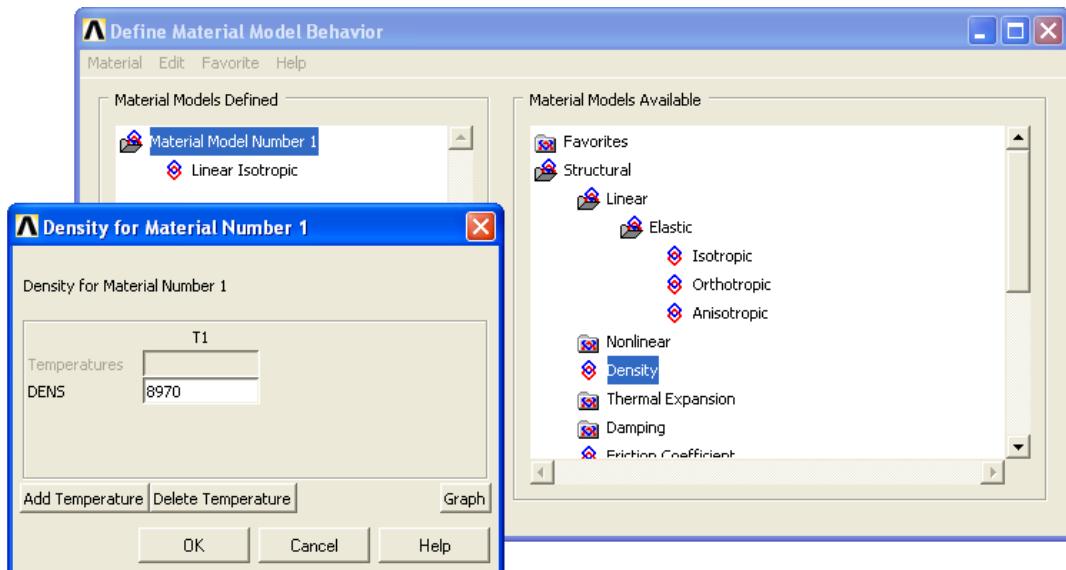
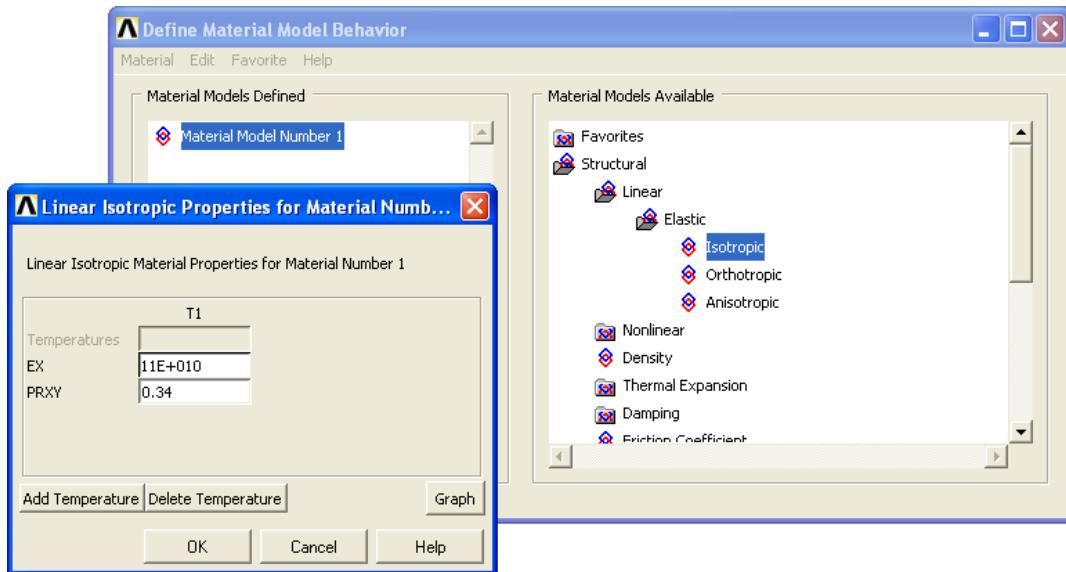
Cada um desses elementos será usado para um tipo de material diferente. O elemento 1 será usado para simular as propriedades do cobre, material adotado na simulação do espelho, das articulações e das barras engastadas, e o elemento 2 será usado para a cerâmica piezelétrica. O elemento 2 (*Scalar Tet 98*) deve ser alterado para que seus graus de liberdade sejam deslocamentos em todas as dimensões (X, Y e Z) e tensão elétrica. No mesmo caminho anterior, para mudar a configuração inicial de um dos tipos de elementos, utiliza-se o botão *Options...*. Nesta opção, uma janela, mostrada na

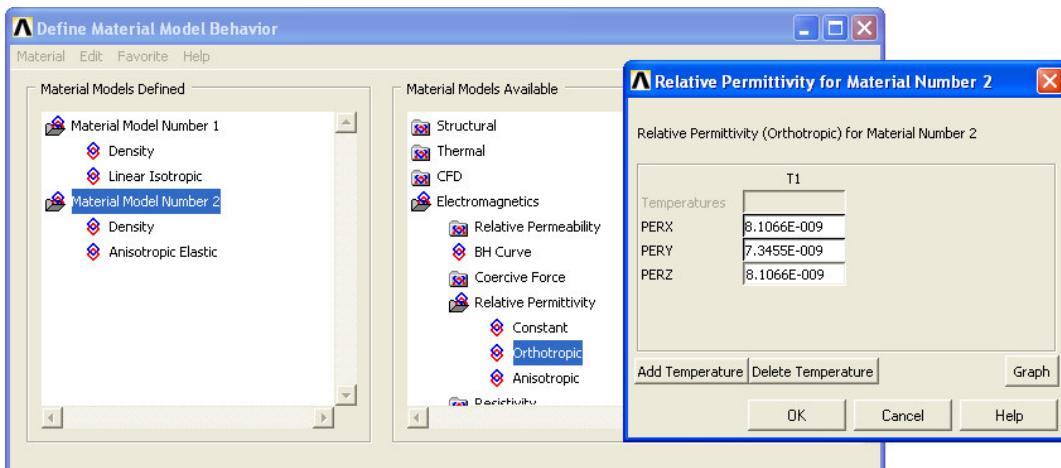
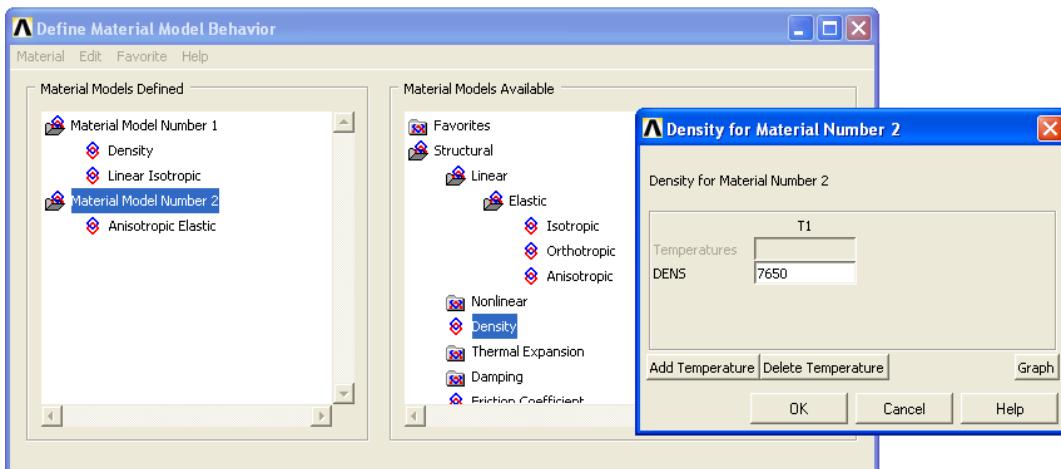
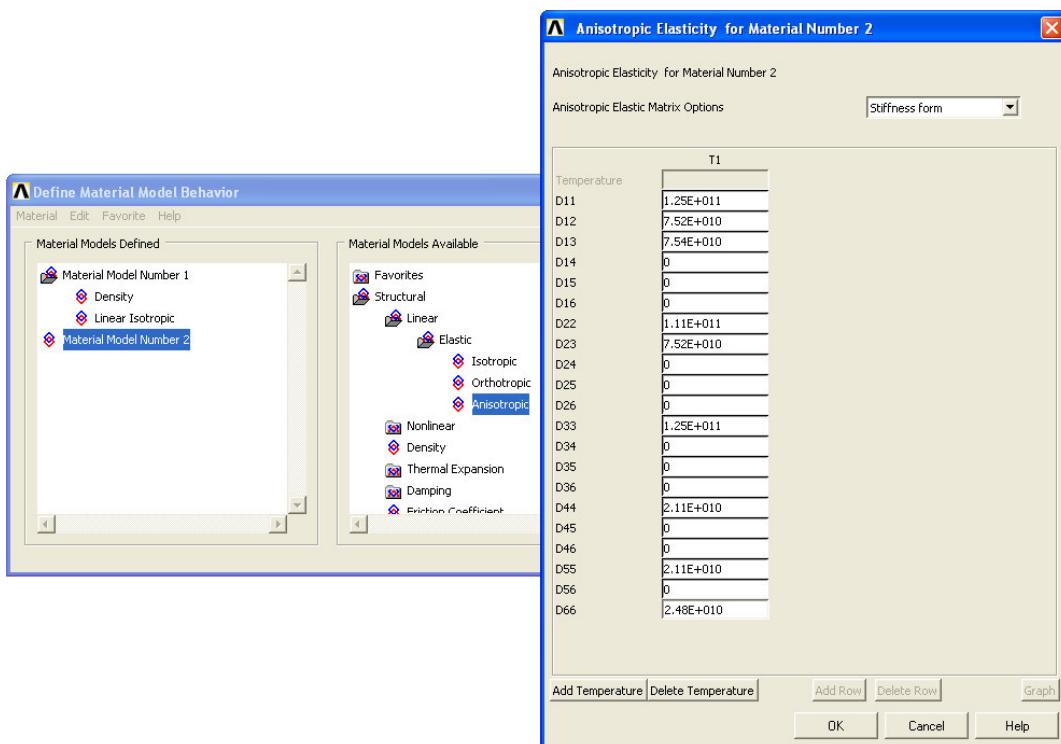
figura 3.4, é aberta, onde se pode determinar os graus de liberdade dos elementos deste tipo de material.

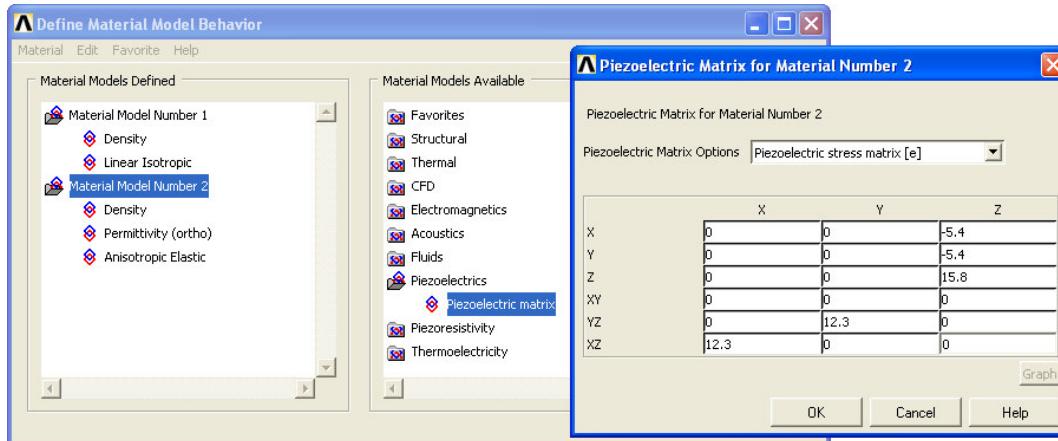


[Figura 3.4 – Graus de liberdade do elemento 2]

Os materiais a serem utilizados devem ser adicionados e suas propriedades devem ser fornecidas ao programa. Além da cerâmica piezelétrica (material 2) este protótipo conta com duas barras de cobre, duas articulações e um espelho também de cobre (material 1). As barras engastadas serão simuladas como cobre para simplificação da análise. As propriedades dos materiais e as janelas usadas no programa para o fornecimento desses dados estão na figura 3.5. O caminho para chegar à janela é *Preprocessor > Material Props > Material Models* e, para se adicionar um novo material, basta seguir o caminho *Material > New Model*.

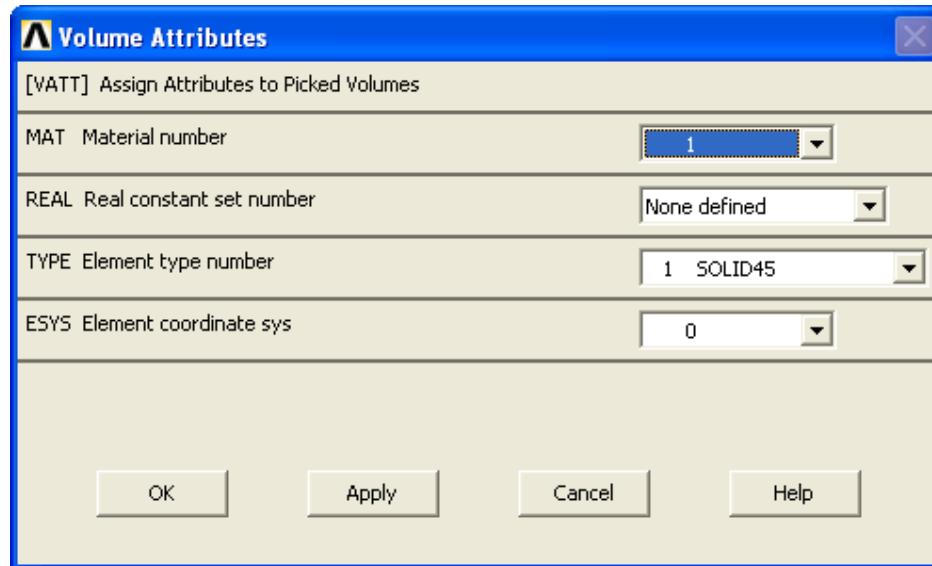


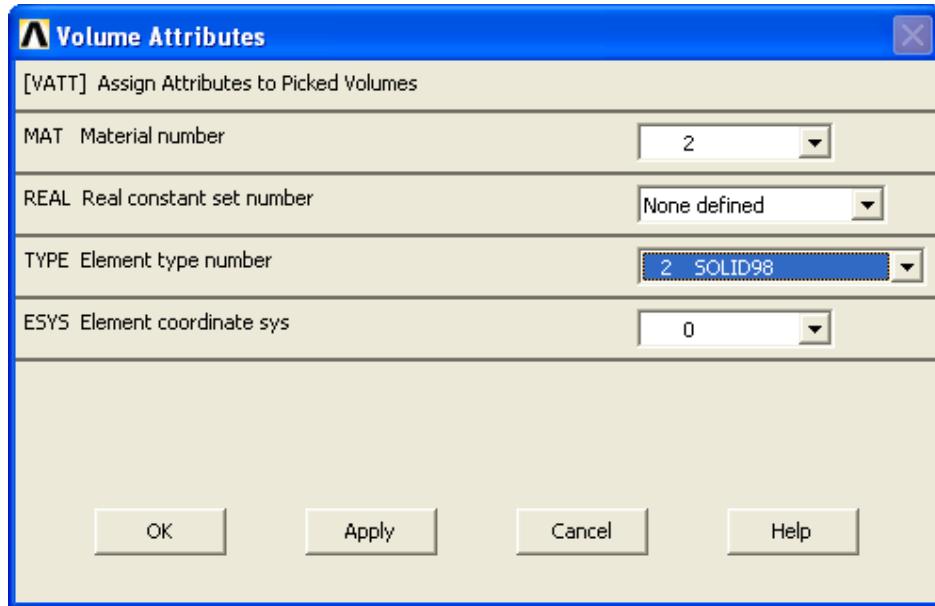




[Figura 3.5 – Propriedades dos materiais]

Estando os elementos e os materiais definidos, é preciso vinculá-los, ou seja, determinar qual elemento será usado para a discretização de um determinado material. Para isso utiliza-se *Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Volumes*. Seleciona-se todos os blocos que são de cobre e escolhe-se o material e o elemento a ser utilizado, e em seguida, escolhe-se as cerâmicas piezelétricas e repete-se o procedimento. A figura 3.6 apresenta o material e o elemento escolhido.





[Figura 3.6 – Escolha do elemento para discretização de um material]

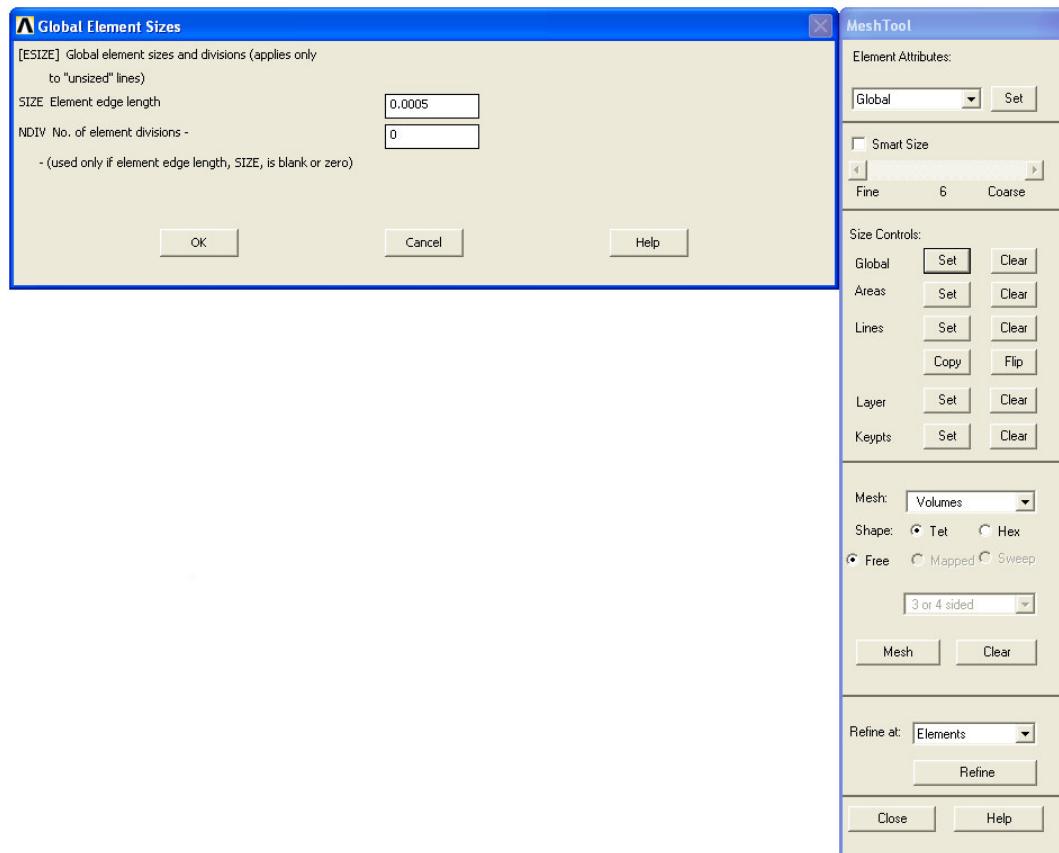
Os elementos utilizados foram o “SOLID45” para o cobre e o “SOLID98” para as piezocerâmicas.

Com todos estes dados fornecidos, o programa já possui todas as informações necessárias para fazer a malha dos sólidos. Como a espessura deste protótipo já é pequena, a escolha das dimensões dos elementos baseou-se nela. Cada bloco foi discretizado com elementos de dimensões iguais à metade da sua espessura, portanto, 0,0005 mm para o micro-espelho e para as articulações e 0,0001 mm para as barras engastadas e as piezocerâmicas. Através do caminho *Preprocessor > Meshing > Mesh Tool* abre-se a janela da figura 3.7, onde na opção *Size Controls > Global > Set* escolhe-se o comprimento de cada uma das fronteiras dos elementos. Primeiro entramos com a dimensão escolhida para a malha do micro-espelho e das articulações.

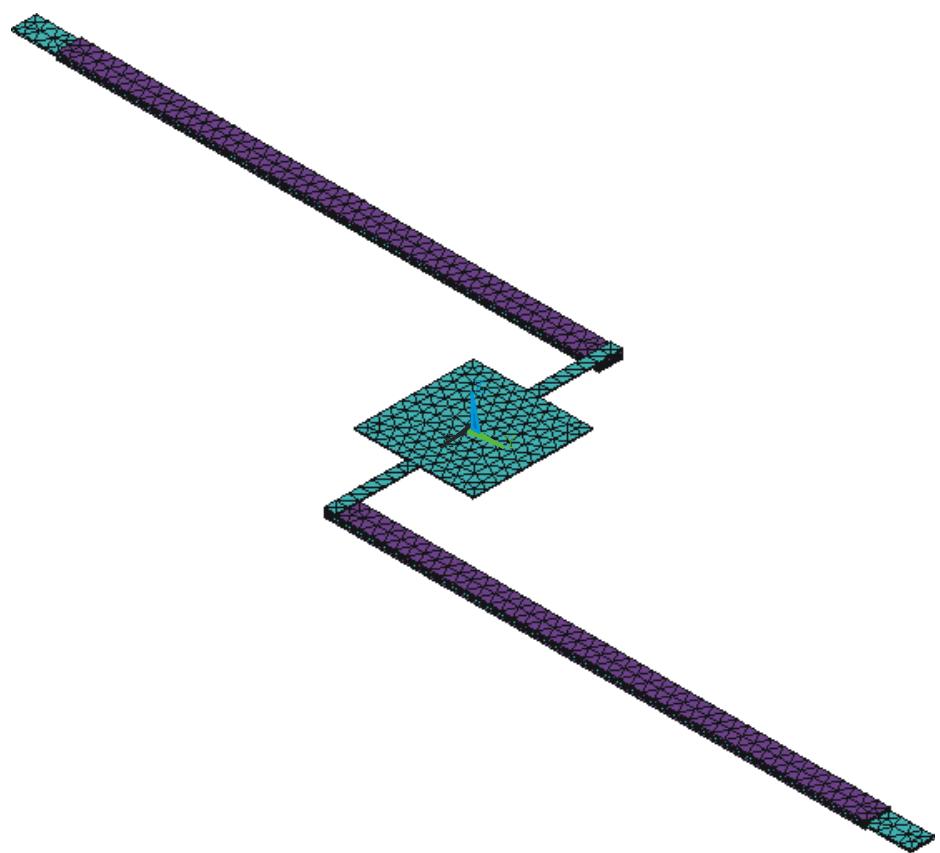
A seguir, escolhendo-se a opção *Mesh* na mesma janela e selecionando-se os blocos de mesma espessura, o programa fará a malha de todos os blocos escolhidos, cada um conforme os elementos pré-estabelecidos.

Em seguida, novamente no caminho *Size Controls > Global > Set*, muda-se para a dimensão escolhida para o atuador e repete-se o procedimento.

O resultado da discretização é apresentado na figura 3.8.



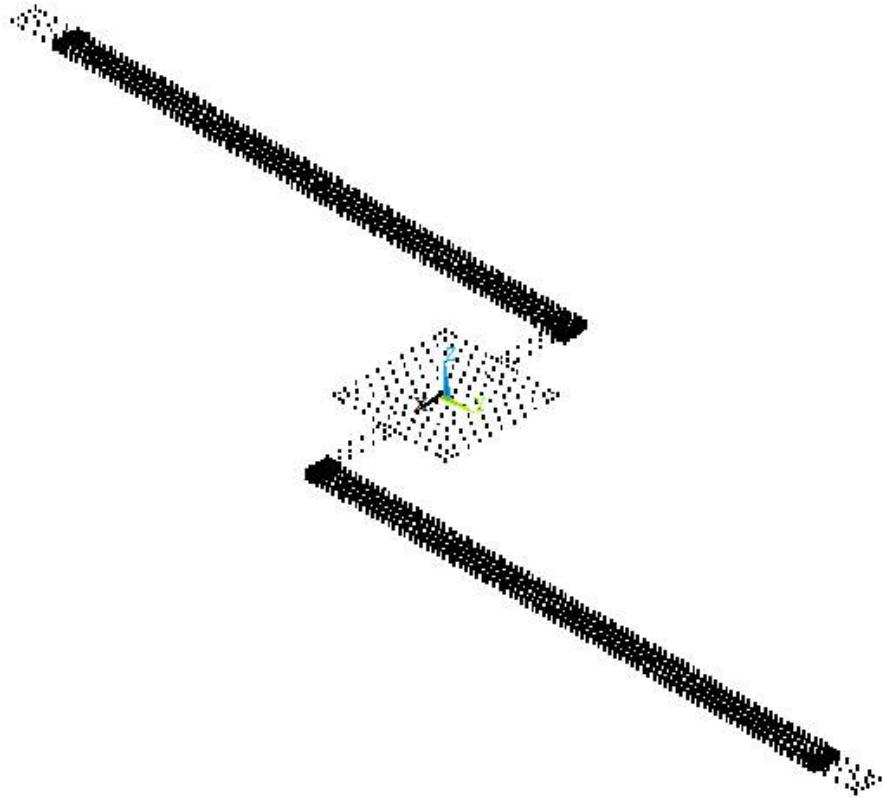
[Figura 3.7 – Determinação do tamanho dos elementos]



[Figura 3.8 – Resultado da discretização]

Como a extremidade das barras que suportam as cerâmicas é considerada engastada, não houve necessidade de representar o resto do protótipo no programa.

A figura 3.9 ilustra a posição dos nós distribuídos pela malha.



[Figura 3.9 – Nós da Malha]

3.4. SIMULAÇÃO

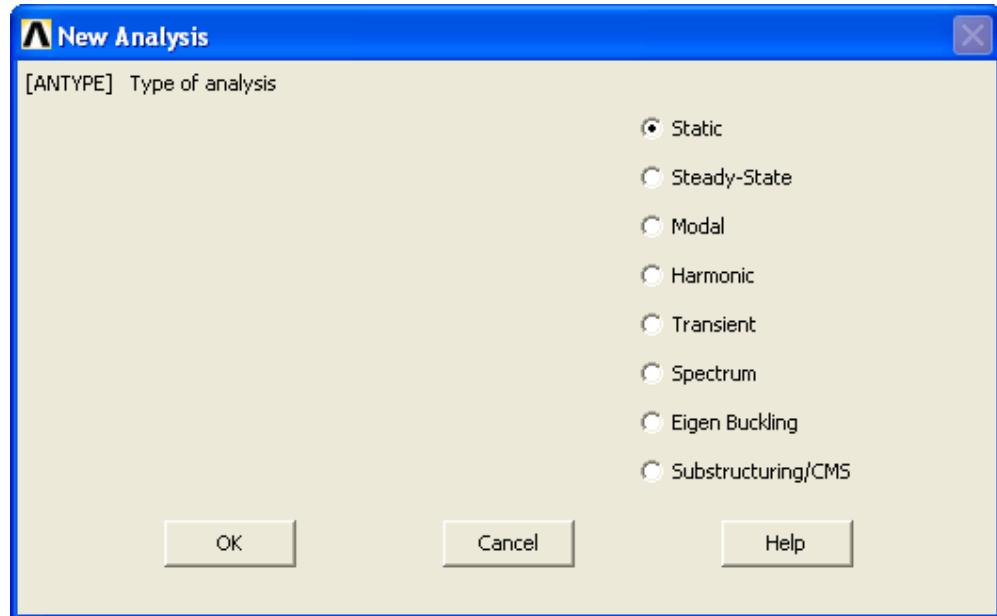
Três tipos de simulação foram feitos no programa ANSYS, a análise estática, análise modal e análise harmônica.

A análise estática compreende a simulação do comportamento do micro-espelho quando se excita as faces da cerâmica com uma dada tensão elétrica, criando um campo elétrico no interior da cerâmica, e verificando-se o deslocamento do micro-espelho.

A análise modal tem como objetivo verificar a freqüência de ressonância e os modos de vibrar do micro-espelho.

A análise harmônica determina qual modo de vibrar corresponde a um modo piezelétrico, isto é, qual dos modos é oriundo de uma excitação de um campo elétrico.

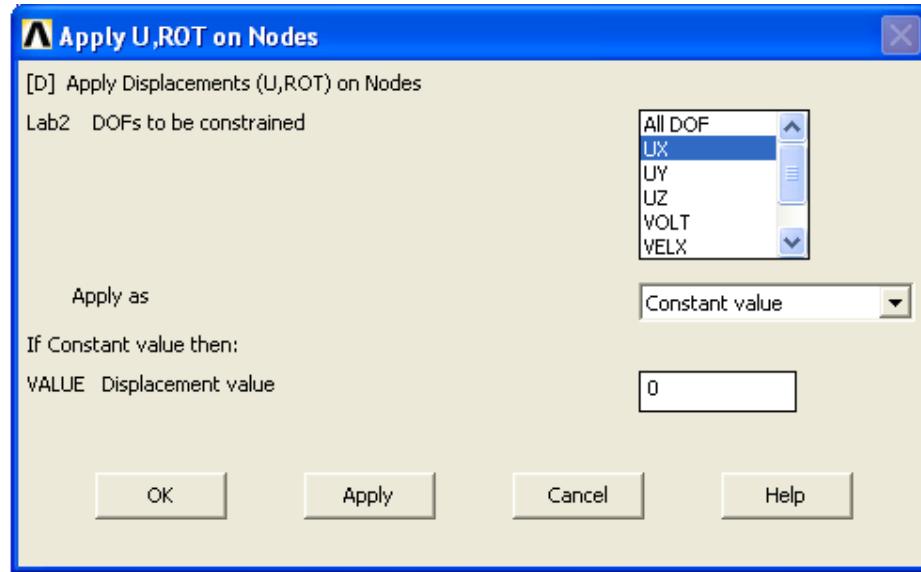
Para selecionar o tipo de análise a ser feito utiliza-se o caminho *Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis* e na janela ilustrada na figura 3.10 escolhe-se o tipo desejado de análise.



[Figura 3.10 – Seleção do tipo de análise]

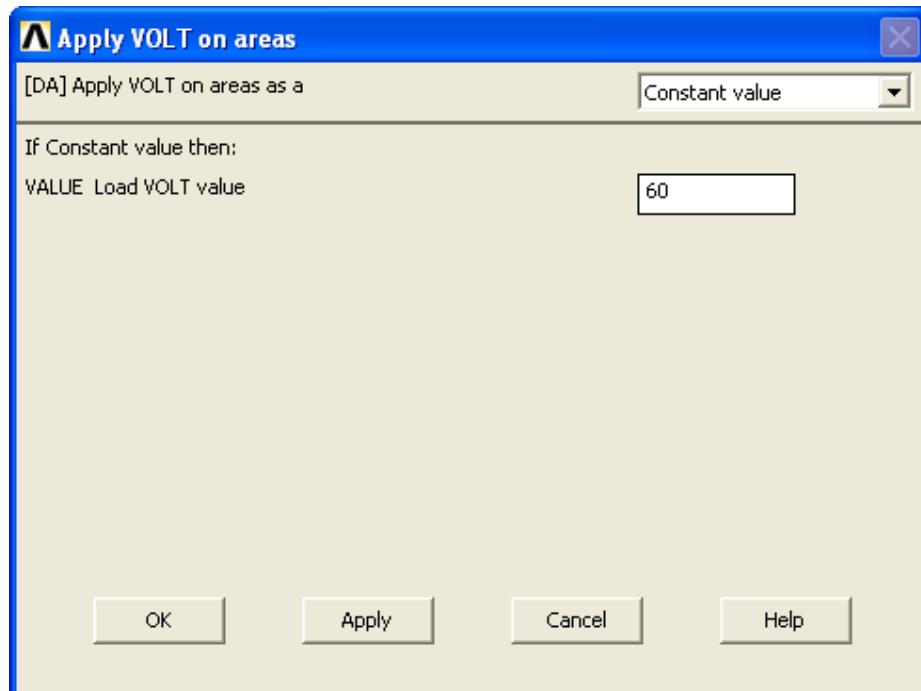
3.4.1. Análise Estática

Sendo definida a análise estática como primeira análise, é necessário definir as condições de contorno do problema. Para isso, em *Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes*, podemos definir que a extremidade das barras que suportam as cerâmicas é engastada, ou seja, tem deslocamento igual a zero. Para isso basta selecionar todos os nós desejados e aplicar o valor do deslocamento igual a zero em todas as direções (UX, UY e UZ), como mostrado na figura 3.11.



[Figura 3.11 – Condições de contorno de deslocamento]

A seguir, as condições de contorno elétricas podem ser definidas em *Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Electric > Boundary > Voltage > On Areas*, conforme a figura 3.12, selecionando-se as áreas desejadas e escolhendo o valor das tensões.



[Figura 3.12 – Condições de contorno elétricas]

Aterrando-se as faces externas das cerâmicas e colocando uma tensão maior que zero nas faces em contato com o cobre, a cerâmica de cima tende a contrair-se, enquanto a de baixo tende a expandir-se, elevando a barra à qual ela está colada e consequentemente o micro-espelho.

Feito isso, o programa está pronto para resolver o problema proposto e usando *Solve > Solution > Current LS* o programa inicia a resolução do problema. Os resultados desta análise serão discutidos na seção 3.5.1.

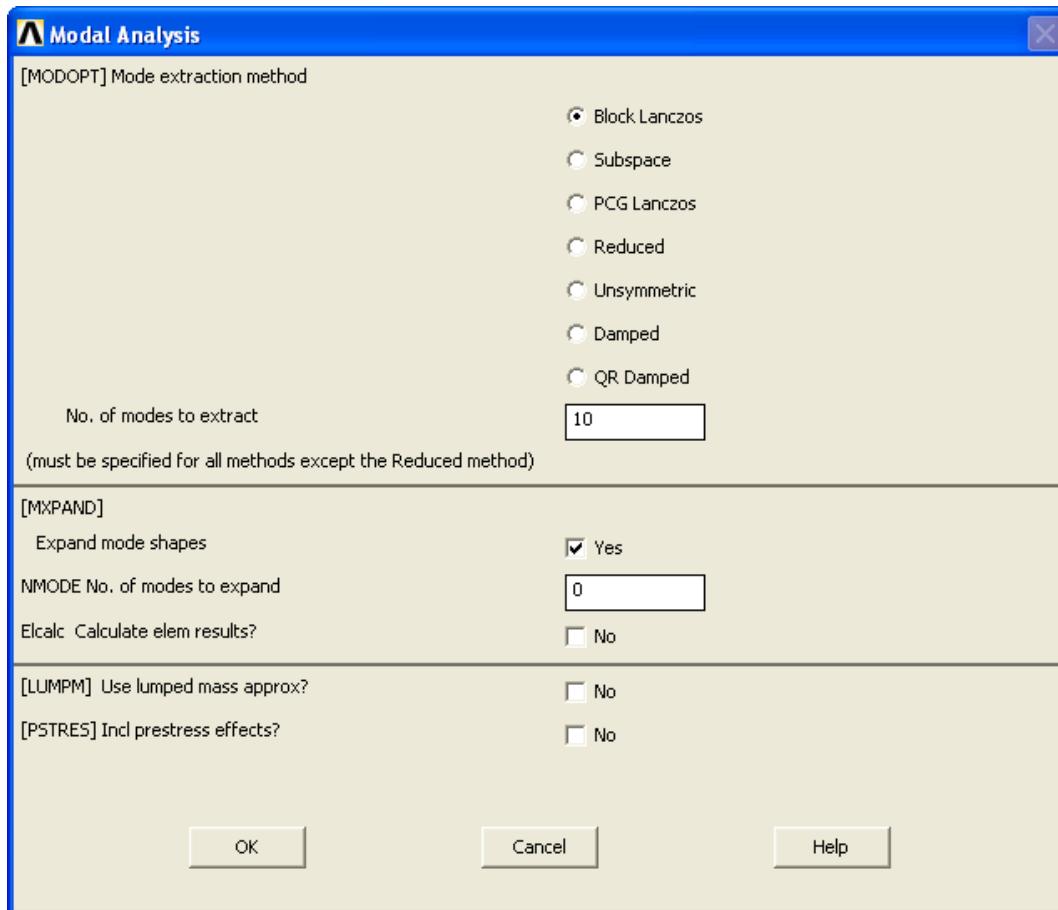
3.4.2. Análise Modal

Para fazer análise modal, seleciona-se na janela ilustrada na figura 3.10 a opção *Modal*.

As condições de contorno são ligeiramente diferentes. As mesmas áreas são engastadas, sendo assim, não é necessário alterar as condições de contorno de deslocamento. No entanto, como o objetivo é verificar as freqüências de ressonância e os modos de vibrar do micro-espelho, todas as áreas da cerâmica devem ser aterradas, isto é, estar em curto-círcuito, para que não haja nenhuma força externa sendo exercida no sistema.

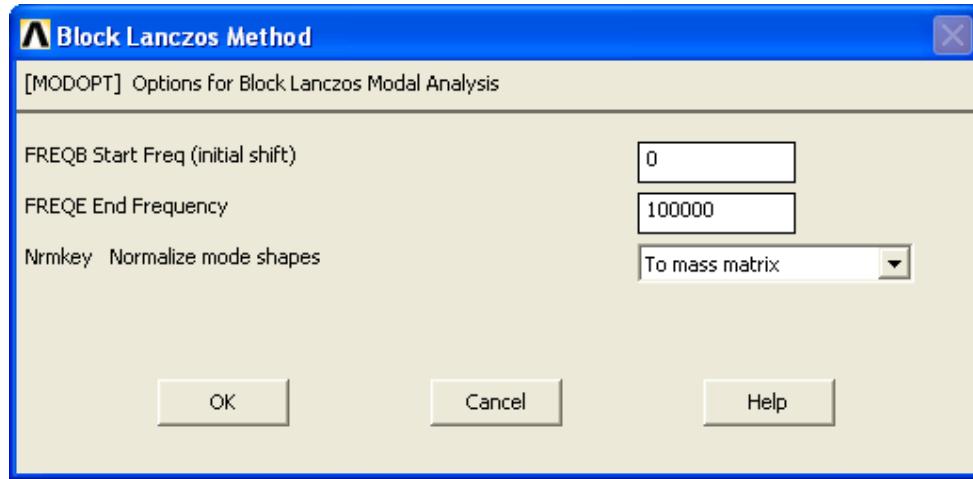
Determinadas as novas condições de contorno, deve-se configurar a análise modal que se pretende fazer. Para isso, em *Preprocessor > Loads > Analysis Type > Analisys Options*, a janela mostrada na figura 3.13 permite essa configuração.

Primeiramente deve-se selecionar a opção *Block Lanczos* e determinar o número de modos de vibrar a serem extraídos. Neste trabalho serão analisados os dez primeiros modos de vibrar.



[Figura 3.13 – Configuração da análise modal]

Quando o botão *OK* for selecionado, outra janela, apresentada na figura 3.14, se abrirá. Esta janela é a janela de configuração do método Block Lanczos, e permitirá escolher o intervalo de freqüências a serem analisadas para os modos de vibrar.



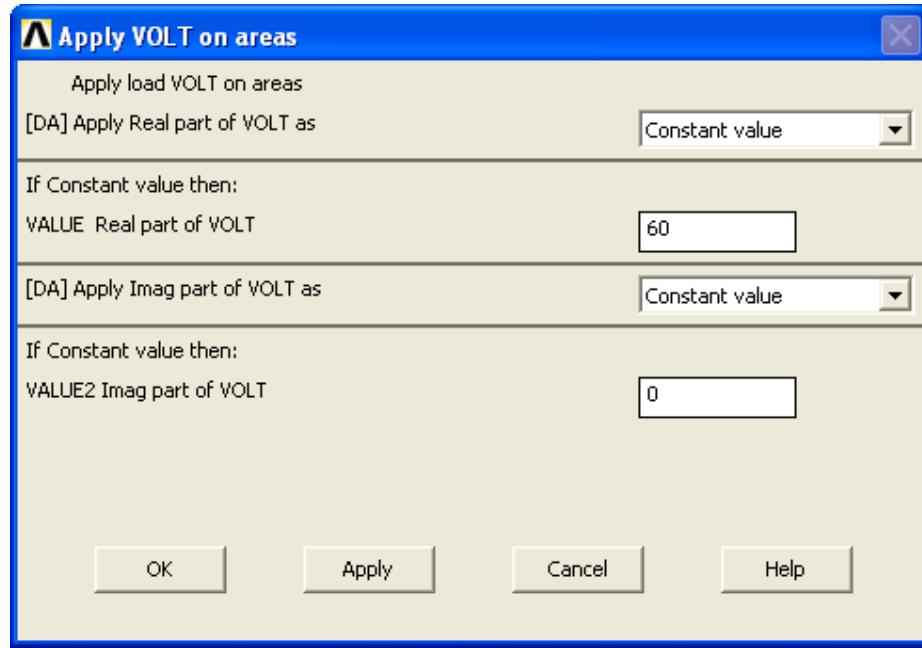
[Figura 3.14 - Configuração do método Block Lanczos]

Terminados estes passos, basta agora resolver o problema com *Solution* > *Solve* > *Current LS*. Os resultados dessa análise são apresentados na seção 3.5.2.

3.4.3. Análise Harmônica

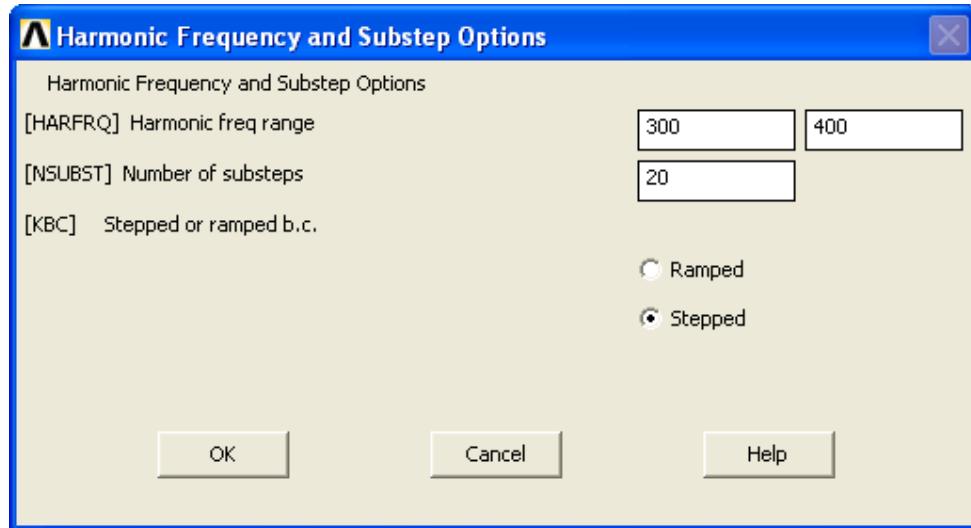
Finalmente, para fazer a análise harmônica, deve-se selecionar na janela ilustrada na figura 3.10 a opção *Harmonic*.

As condições de contorno de deslocamento continuam inalteradas, enquanto as condições elétricas precisam ser redefinidas. Isso porque o programa pede agora uma tensão elétrica real e uma imaginária. As tensões elétricas imaginárias são todas iguais a zero devido a não estarmos considerando nenhum amortecimento e a todas as tensões aplicadas estarem em fase. Enquanto isso, as reais devem simular um deslocamento qualquer do espelho, para cima, ou para baixo. O caminho utilizado para inserir as condições de contorno elétricas é o mesmo dos casos anteriores. Neste caso, as tensões elétricas usadas foram de 60 volts para simular um deslocamento para cima. A figura 3.15 mostra a nova janela de condição de contorno elétrica.



[Figura 3.15 – Condição de contorno elétrica real e imaginária]

Deve-se também configurar as opções da análise harmônica. No caminho *Solution > Load Step Opts > Time/Freqency > Freq and Substeps* encontra-se a janela da figura 3.16. Nesta janela pode-se inserir o intervalo de freqüências a serem analisadas, o número de passos e como será a análise. A análise feita foi por passos (*stepped*), o que significa que em cada passo o programa determina o deslocamento do espelho para uma freqüência, fazendo com que o tempo computacional desta análise seja bastante elevado.



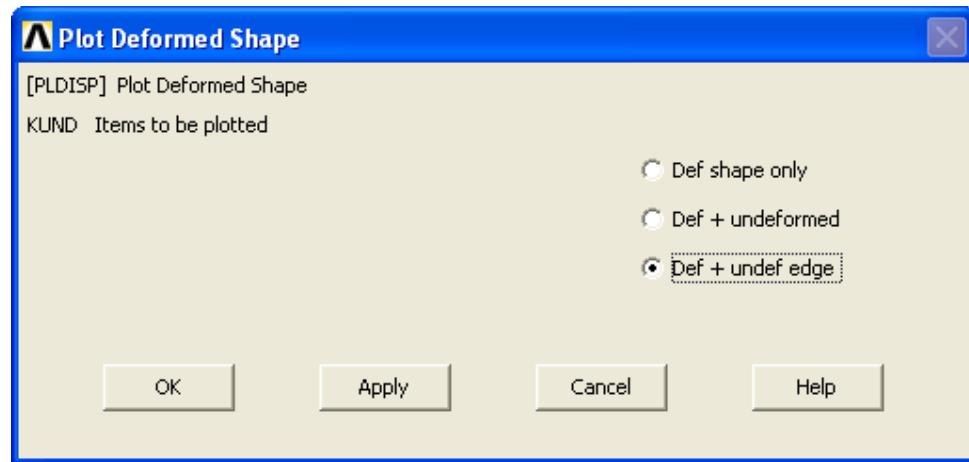
[Figura 3.16 – Opções da análise harmônica]

Por fim, com todas as opções configuradas, pode-se começar a análise utilizando o caminho *Solution > Solve > Current LS*. Os resultados dessa análise podem ser vistos na seção 3.5.3.

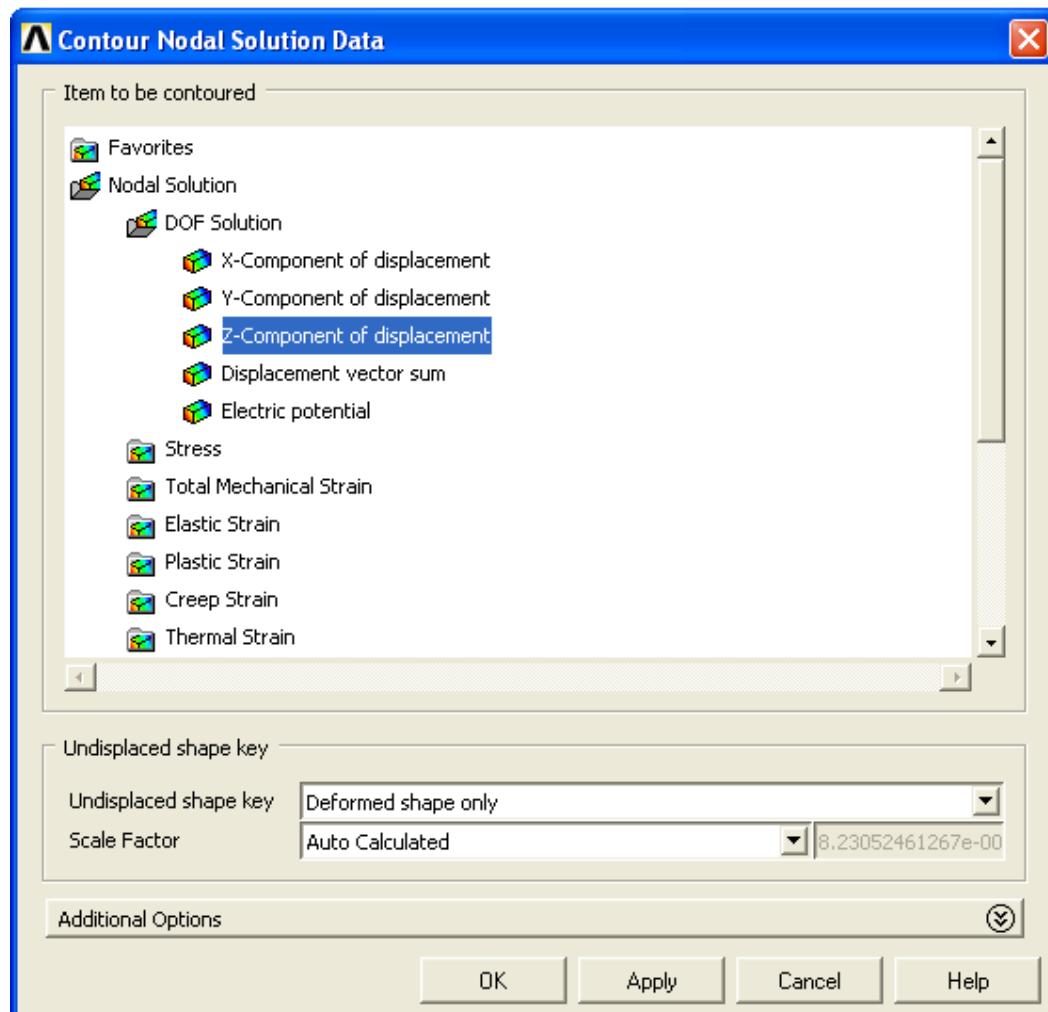
3.5. VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

3.5.1. Resultados da Análise Estática

Para verificar os resultados encontrados pelo programa, basta seguir o caminho *General Postproc > Read results > First Set*, para a leitura dos dados encontrados, e, em seguida, plotá-los pelos caminhos *General Postproc > Plot Results > Deformed Shape* ou *General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solution*. A figura 3.17 mostra as opções usadas do primeiro modo de plotar os resultados e a figura 3.18 as do segundo.

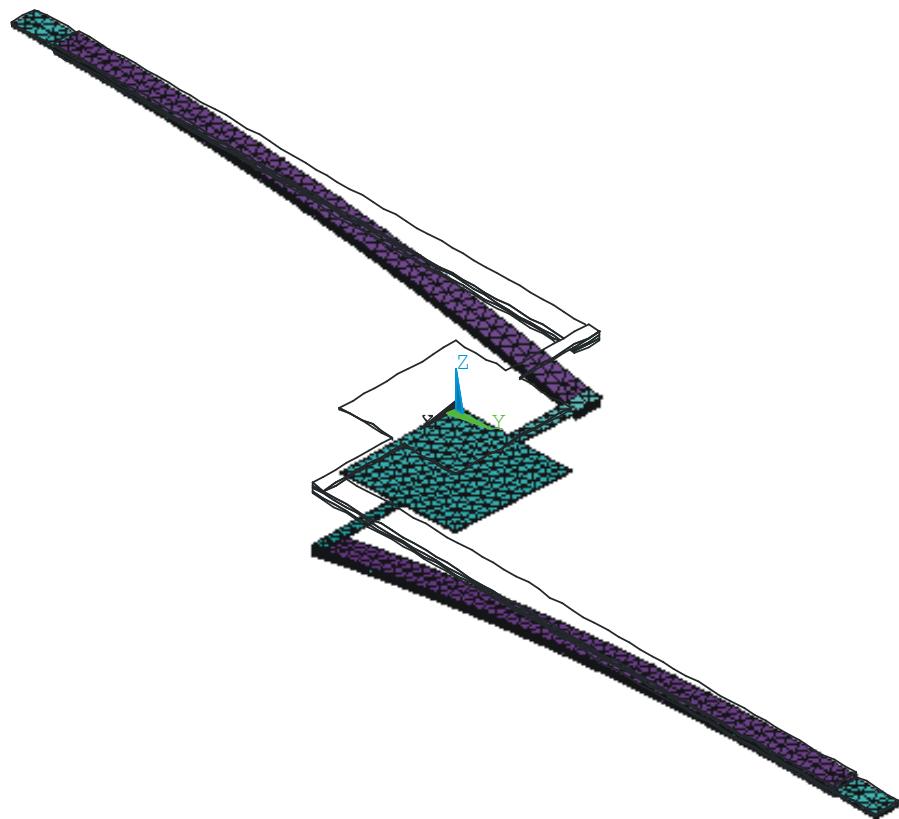


[Figura 3.17 – Plotando forma deformada mais bordas não deformadas]

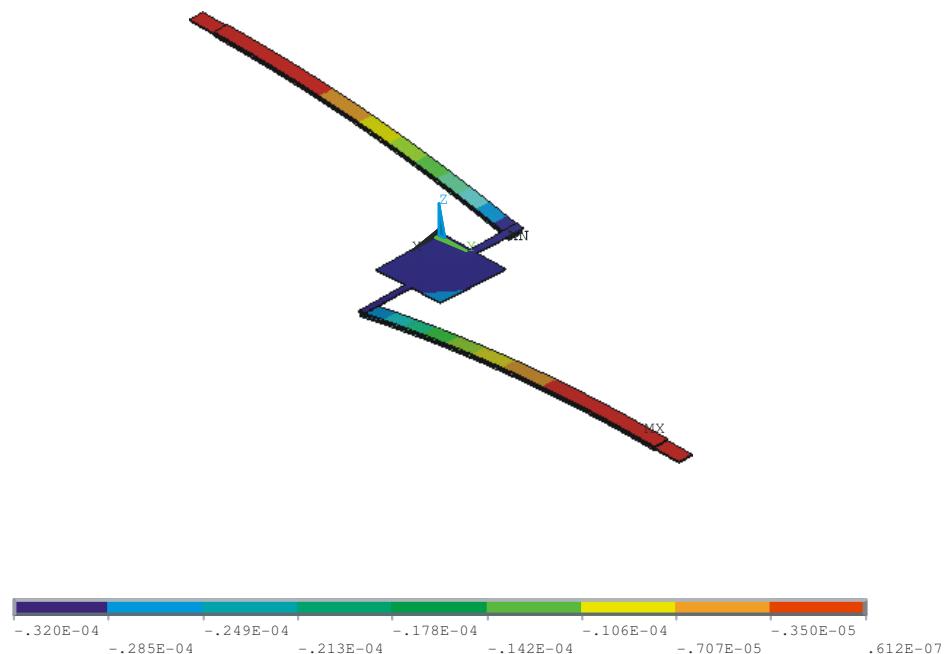


[Figura 3.18 – Plotando o deslocamento no Eixo Z]

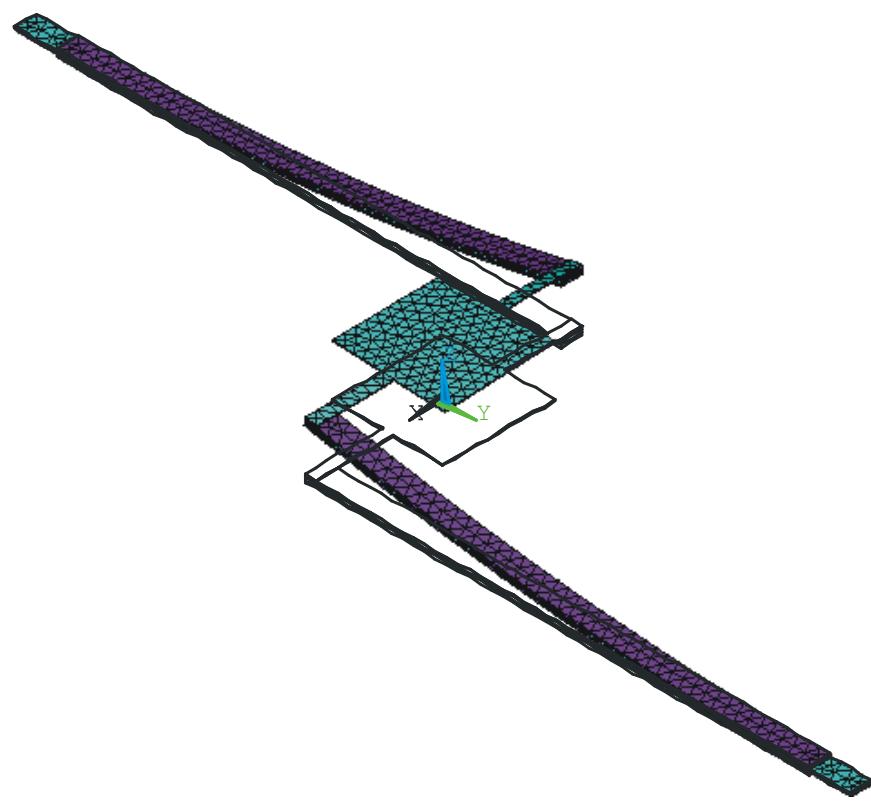
Os resultados dessas plotagens são apresentados a seguir. Foram analisados os casos em que as duas barras se deslocam para baixo (figuras 3.19 e 3.20), para cima (figuras 3.21 e 3.22) e uma para cada lado (figuras 3.23 e 3.24). Em todos os casos, a primeira figura mostra o estado deformado com as bordas do estado não-deformado e a segunda mostra o estado deformado com os valores das deformações.



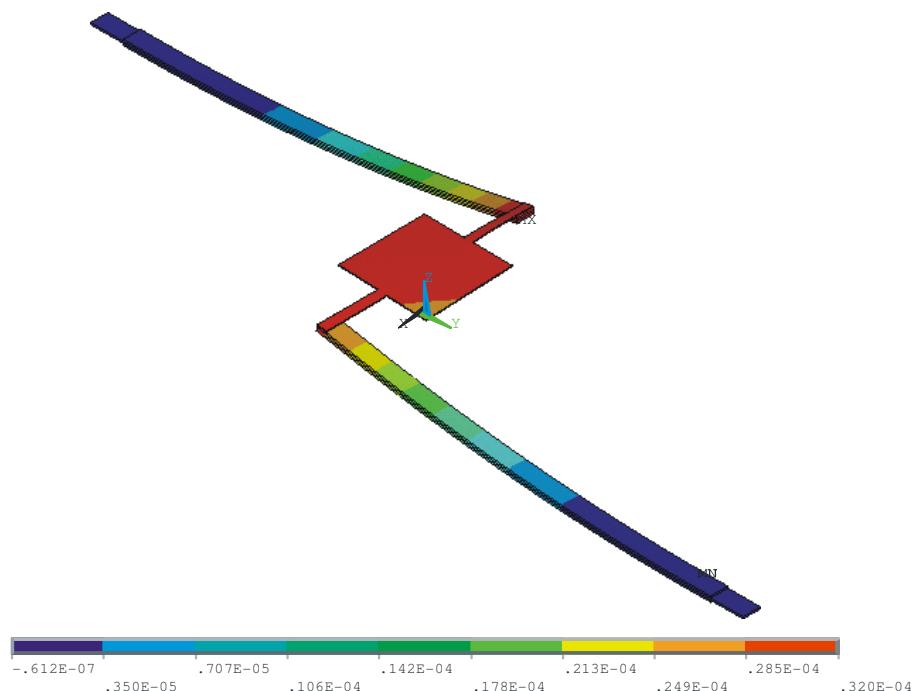
[Figura 3.19 – Deformação com cerâmicas em fase para baixo]



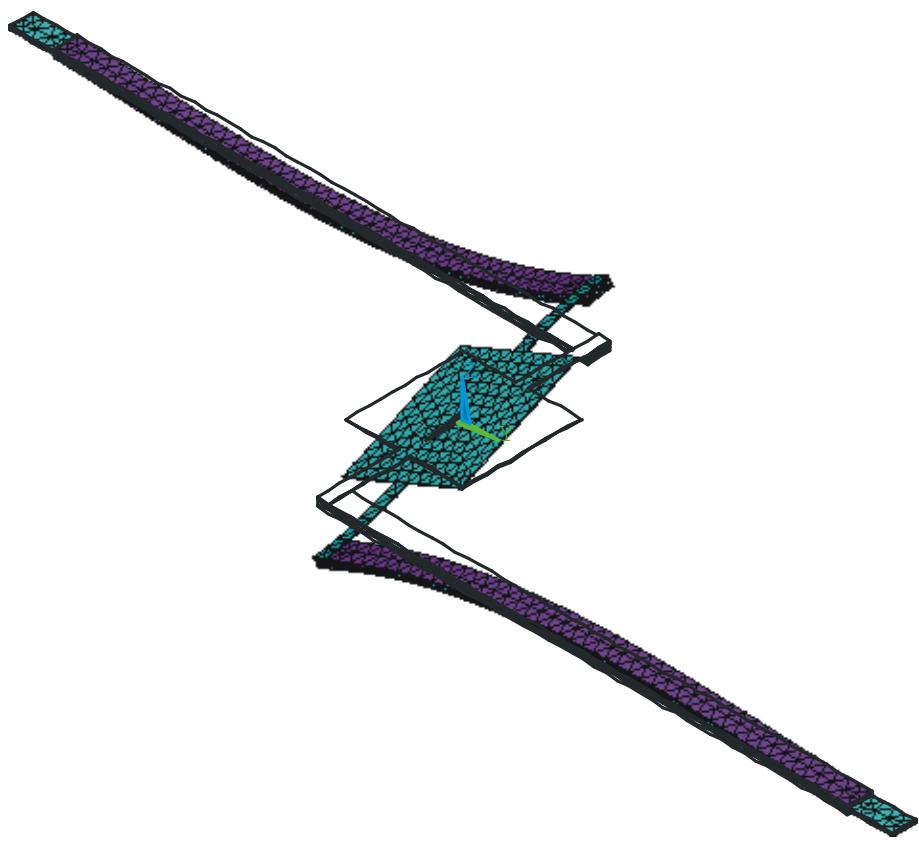
[Figura 3.20 - Deslocamento com cerâmicas em fase para baixo]



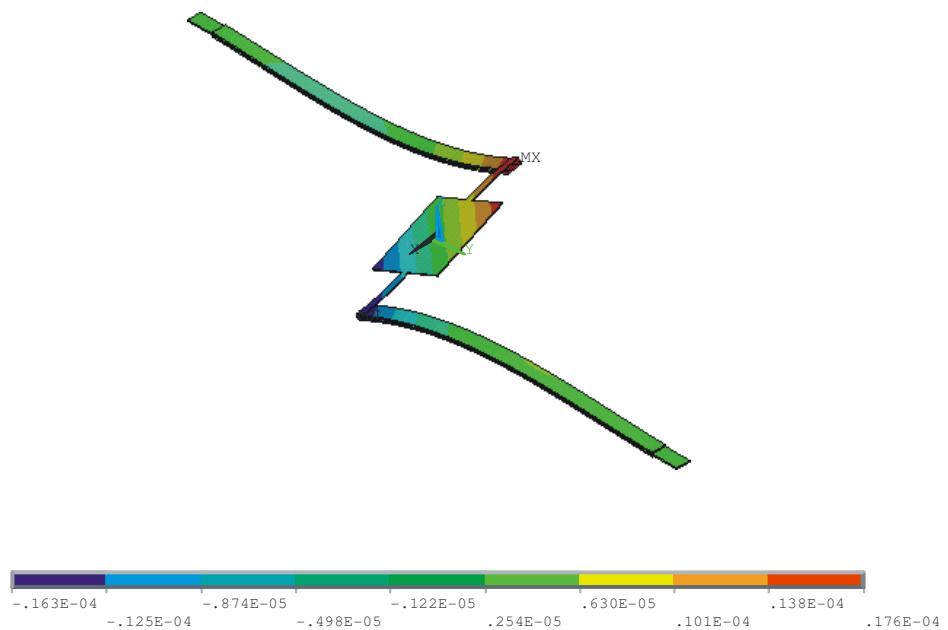
[Figura 3.21 - Deformação com cerâmicas em fase para cima]



[Figura 3.22 - Deslocamento com cerâmicas em fase para cima]



[Figura 3.23 - Deformação com cerâmicas em oposição de fase]



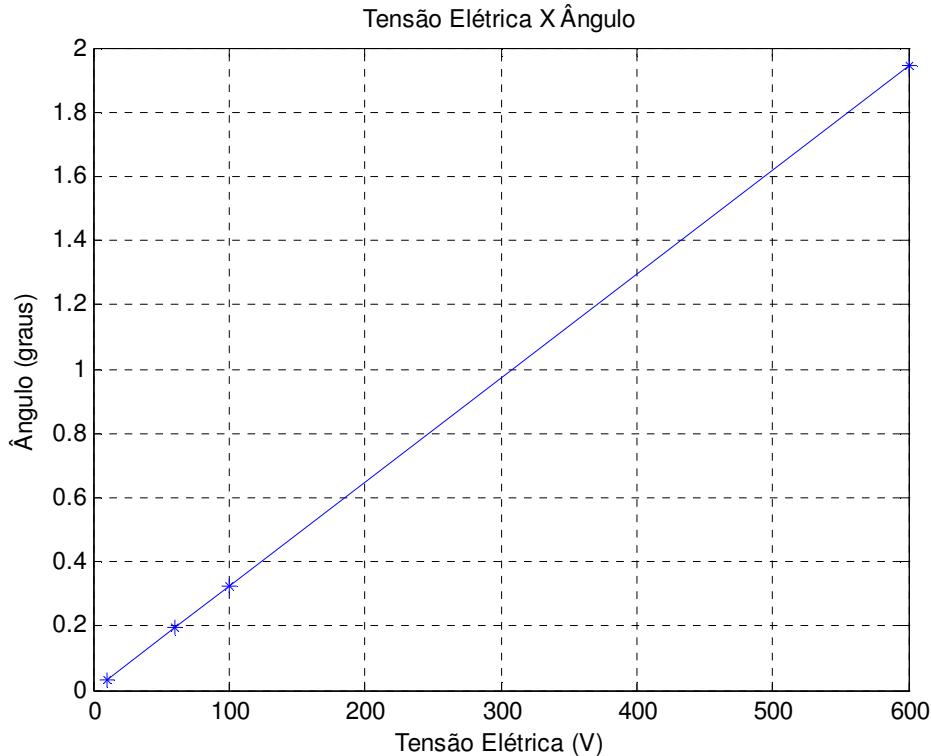
[Figura 3.24 - Deslocamento com cerâmicas em oposição de fase]

Várias análises foram feitas para o caso em que cada uma das barras se desloca para um lado e para o caso em que as duas barras se deslocam para cima. Os resultados mostrados acima (figuras 3.20, 3.22 e 3.24) são para os casos em que foram aplicados 0 volts e 60 volts nas faces das cerâmicas. As análises realizadas em seguida foram feitas para 10, 100, 600 volts. A seguir, apresenta-se a tabela 3.1 com os resultados obtidos.

Resultados das Simulações Estáticas		
Volts (V)	Ângulo ($^{\circ}$)	Deslocamento (μm)
10	$3,2315 \times 10^{-2}$	5,34
60	$1,9423 \times 10^{-1}$	32,0
100	$3,2314 \times 10^{-1}$	53,4
600	1,9416	320

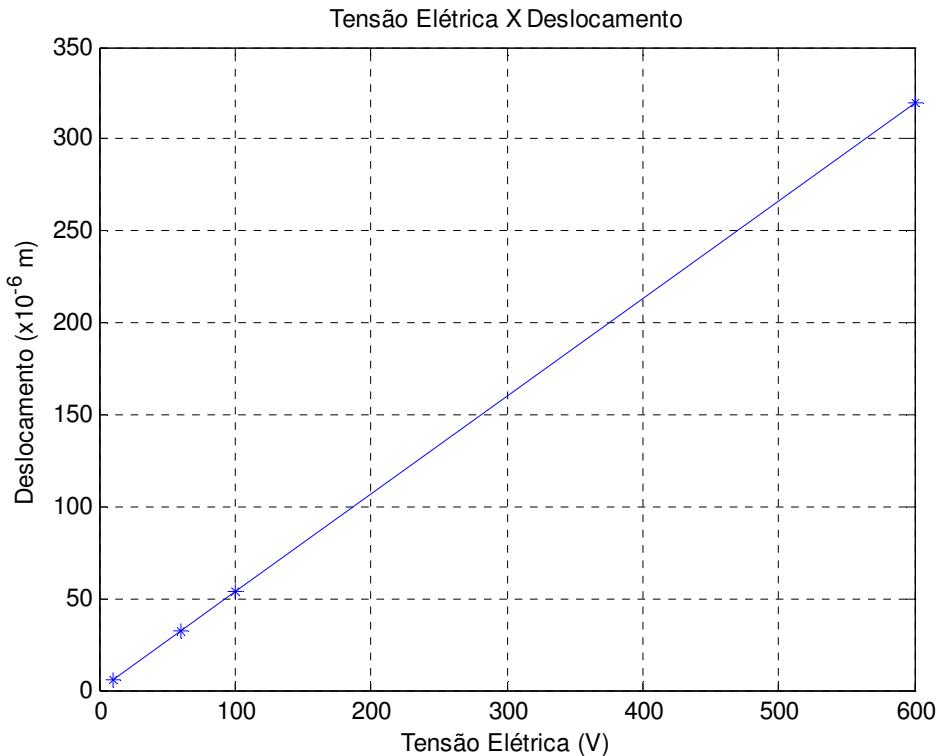
[Tabela 3.1 – Resultados das simulações estáticas]

O gráfico 3.1 demonstra a curva obtida de tensão elétrica versus ângulo para o caso em que o micro-espelho rotaciona.



[Gráfico 3.1 – Tensão Elétrica X Ângulo para o micro-espelho rotacionado]

O gráfico 3.2 apresenta a curva de tensão elétrica versus deslocamento no eixo Z para o caso em que o micro-espelho se desloca para cima.



[Gráfico 3.2 – Tensão Elétrica X Deslocamento do micro-espelho]

Pode-se notar claramente que as duas curvas configuram uma reta, concluindo-se então que a deformação de uma cerâmica piezelétrica é linearmente proporcional à tensão aplicada em suas faces.

3.5.2. Resultados da Análise Modal

A análise modal demonstra a capacidade da velocidade de operação do micro-espelho, isto é, quanto maior a primeira freqüência de ressonância, mais rápido o espelho poderá trabalhar sem entrar em ressonância.

Neste caso, o programa gera um número de resultados igual ao número de modos de vibrar encontrado. Para ler os resultados encontrados referentes ao primeiro modo de vibrar utiliza-se *General Postproc > Read results > First Set*, já para a leitura dos dados referentes ao próximo modo de vibrar o caminho *General Postproc > Read results > Next Set* deve ser utilizado. Antes de ler os dados do próximo modo de vibrar deve-se plotar as figuras utilizando

General Postproc > Plot Results > Deformed Shape como mostrado anteriormente. Para mostrar as freqüências de ressonância encontradas o caminho é *General Postproc > Results Summary*. A tabela 3.2 apresenta os resultados da análise modal e as figuras do Anexo A demonstram os modos de vibrar do primeiro ao quinto.

Resultados da Simulação Modal	
Modos de Vibrar	Freqüência (Hz)
1° Modo	222,84
2° Modo	448,71
3° Modo	525,49
4° Modo	1222,0
5° Modo	1256,8

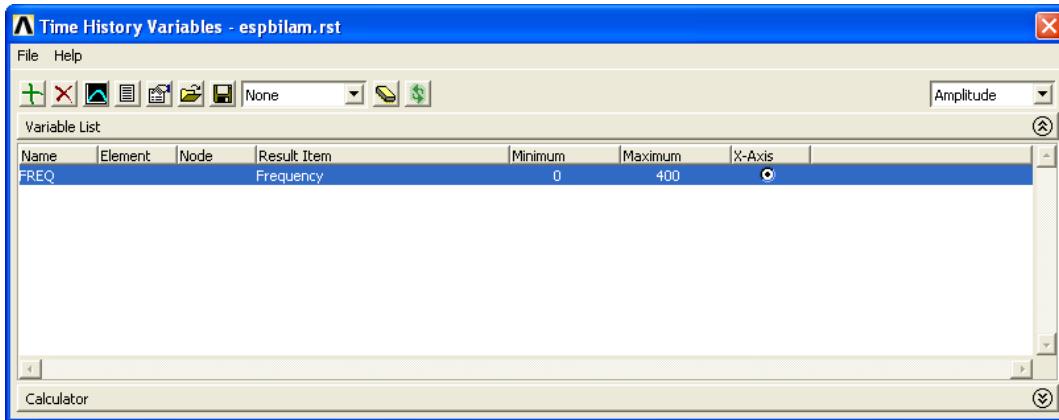
[Tabela 3.2 – Resultados da simulação modal]

Nota-se que as freqüências dos modos de vibrar são altas o bastante para que o dispositivo trabalhe fazendo uma grande quantidade de movimentos por segundo, permitindo uma leitura de dados bastante rápida no que diz respeito ao micro-espelho.

3.5.3. Resultados da Análise Harmônica

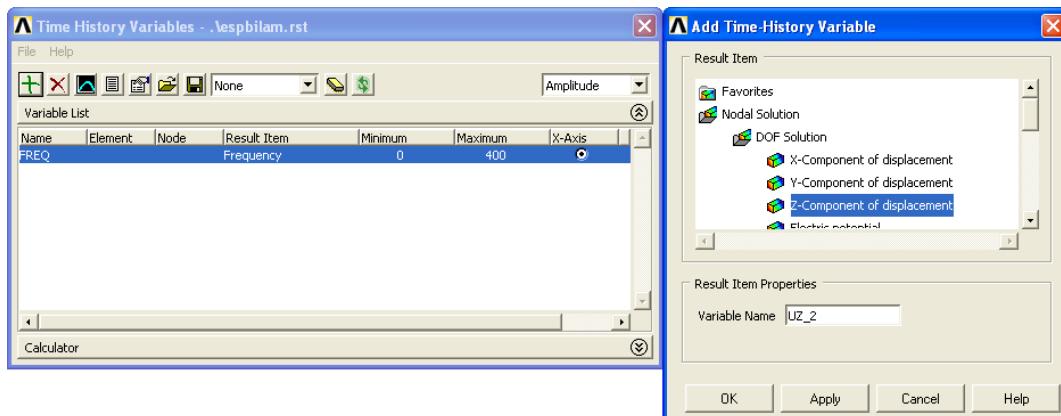
A análise harmônica demonstra quais modos de vibrar são piezelétricos, ou seja, são obtidos pela excitação das cerâmicas piezelétricas através de um campo elétrico.

Para fazer a leitura dos dados de maneira conveniente para a análise harmônica, o caminho a ser utilizado é *TimeHist Postpro > Variable Viewer*. A janela ilustrada na figura 3.25 se abre com uma variável já estabelecida, a freqüência. Esta janela propicia ao usuário gerar gráficos com os resultados das análises feitas, como seu próprio nome diz, Visualizador de Variáveis, do inglês, *Variable Viewer*.



[Figura 3.25 – Visualizador de Variáveis]

Estamos interessados no deslocamento vertical do micro-espelho em cada freqüência. Portanto, no primeiro ícone da janela da figura 3.25, chamado *Add Data* e simbolizado por um sinal de mais, outra janela, a da figura 3.26, se abre. Nesta janela podemos escolher qual outra variável queremos adicionar à análise. A variável escolhida, como dito anteriormente, é a que representa o deslocamento vertical U_z .



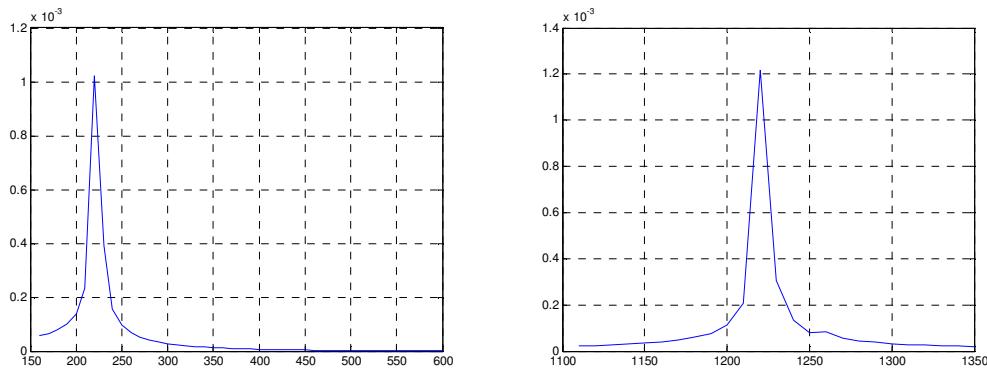
[Figura 3.26 – Adicionar Variável ao Visualizador de Variáveis]

Para alterar as propriedades, como o intervalo de freqüências exibidas no gráfico, basta utilizar o quarto ícone da janela da figura 3.25, *Data Properties*. Utilizando o terceiro ícone da mesma janela, o *Graph Data*, um

gráfico é gerado com as variáveis determinadas e pode ser visualizado na tela de interface gráfica do ANSYS.

Neste trabalho, duas análises harmônicas foram feitas, uma com um intervalo de freqüências que englobasse os três primeiros modos de vibrar, e outra com um intervalo englobando os dois modos seguintes. Apenas os cinco primeiros modos foram analisados, pois os modos seguintes não caracterizam mais a freqüência de operação do micro-espelho, que é determinada pelo primeiro modo de vibrar piezelétrico. Além disso, as freqüências de ressonância dos cinco últimos modos são muito altas, não sendo necessárias suas análises.

O gráfico 3.3 a e b obtido por essas análises são apresentados a seguir.

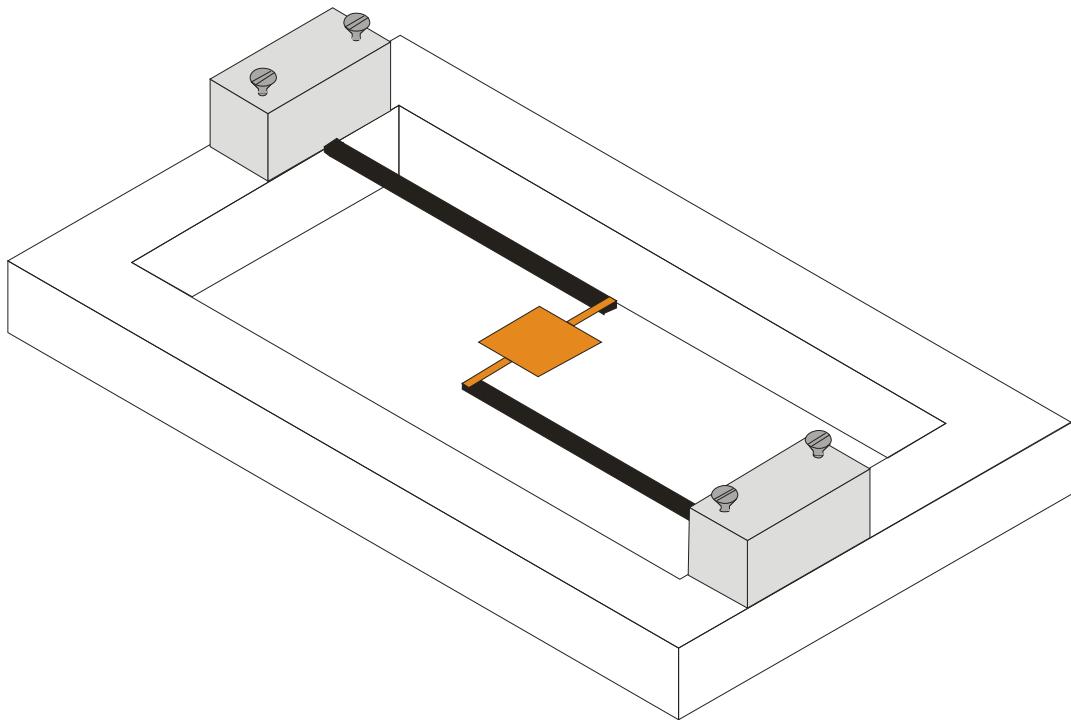


[Gráfico 3.3 – Análise Harmônica no intervalo de 150 a 600 Hz (a) e de 1100 a 1350 Hz (b)]

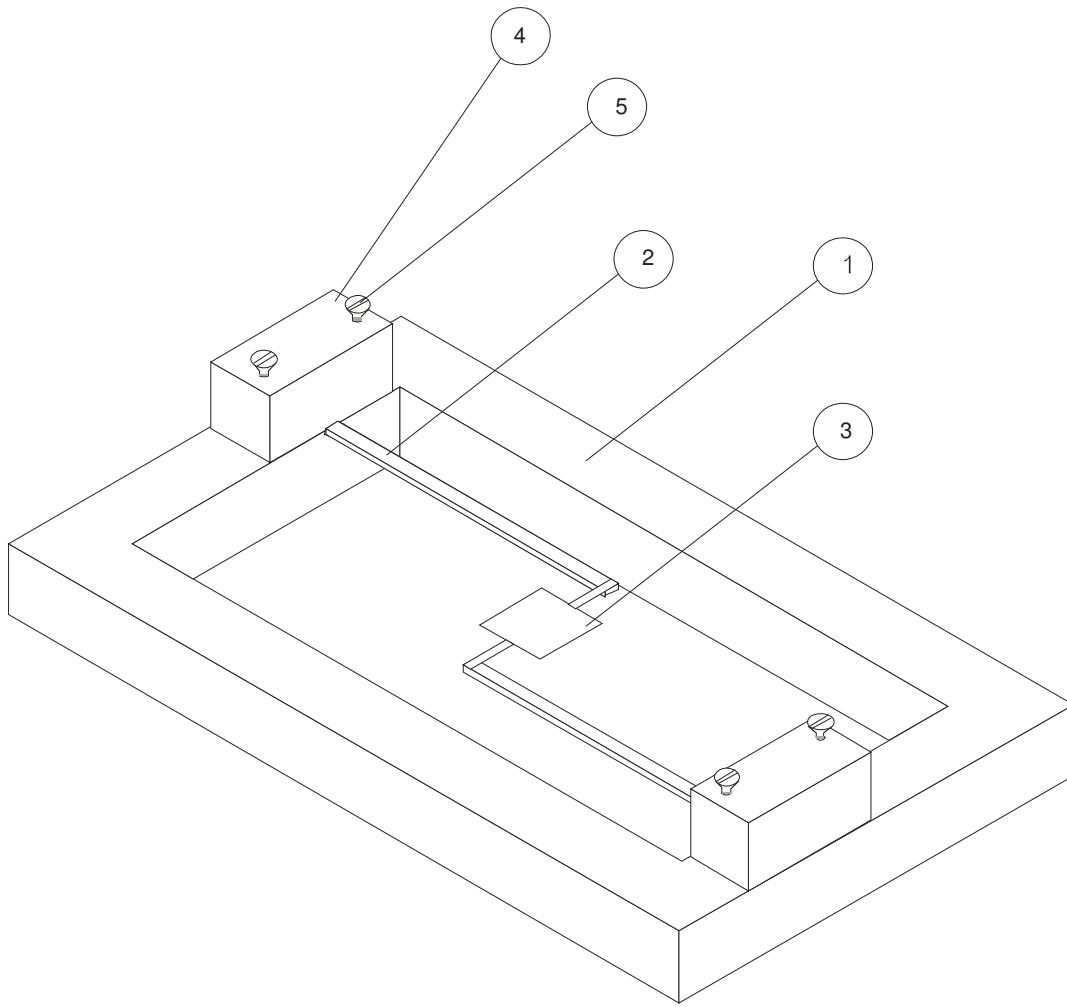
A leitura dos gráficos permite identificar como modos de vibrar piezelétricos o 1º (222,84) e o 4º (1222,0) modo. Sendo assim, o regime de trabalho do micro-espelho deve ser menor que 222,84 Hz.

4. Projeto do Protótipo Experimental

A partir das análises feitas no software ANSYS e com base nas dimensões do espelho projetado por YEE, *et al*, 2000, obteve-se o projeto do protótipo do micro-espelho e seus componentes. A seguir, na figura 4.1, encontra-se o modelo em CAD do micro-espelho, na figura 4.2, o seu desenho de conjunto e, na tabela 4.1, a lista de materiais.



[Figura 4.1 – Desenho em CAD do protótipo]



[Figura 4.2 – Desenho de conjunto do protótipo]

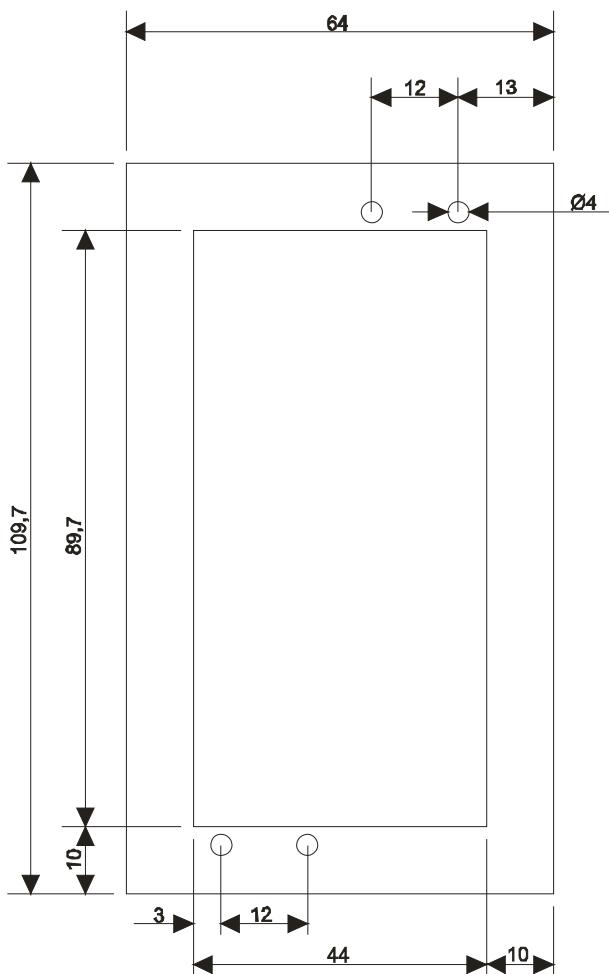
Nº	Descrição	Material	Quantidade
1	Base do micro-espelho	Acrílico	1 peça
2	Atuador piezelétrico	Cobre, fibra de carbono e cerâmica piezelétrica	2 peças
3	Micro-espelho	Cobre	1 peça
4	Engaste	Alumínio	2 peças
5	Parafuso M2,5 x 25	Aço	4 peças
6	Bucha	Nylon	4 peças

[Tabela 4.1 – Lista de materiais do protótipo]

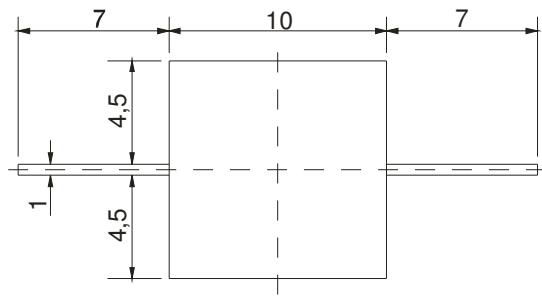
A base de acrílico serve para dar sustentação ao micro-espelho e para isolar um atuador do outro, pois os eletrodos das faces internas do atuador são

as próprias extremidades do atuador. Aproveitando esse mesmo fato, os engastes de alumínio servem para fixar os atuadores na base e servem como eletrodos, pois fazem contato com estes. Os parafusos e as buchas fixam os engastes na base.

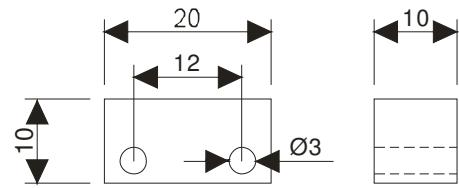
Terminado o desenho de conjunto, os desenhos de fabricação da base, do micro-espelho e dos engastes, foram obtidos e estão dispostos nas figuras 4.3, 4.4, e 4.5, respectivamente.



[Figura 4.3 – Desenho de fabricação da base]



[Figura 4.4 – Desenho de fabricação do micro-espelho]



[Figura 4.5 – Desenho de fabricação do engaste]

5. Fabricação do Protótipo

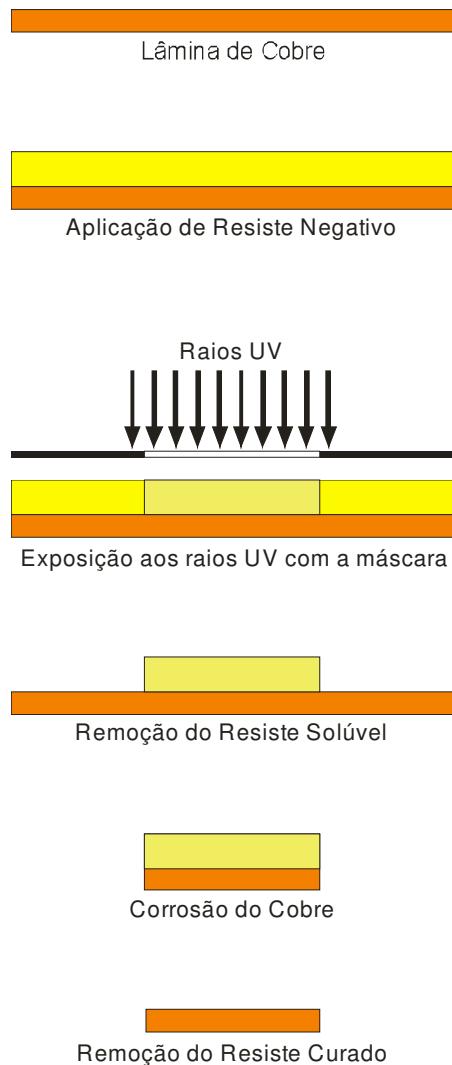
O protótipo é dividido em partes bastante distintas, por isso, a fabricação de cada parte será tratada separadamente.

5.1. FABRICAÇÃO DO MICRO-ESPELHO

O micro-espelho e as articulações, como dito anteriormente, serão de uma chapa de cobre de 0,1 mm de espessura. Sendo assim, sua fabricação é trabalhosa e delicada, devendo ser feita por uma empresa especializada.

A empresa que fabricará esta parte do protótipo será a Metalfoto, situada em Cotia, interior de São Paulo. O processo de fabricação utilizado será a fotolitografia.

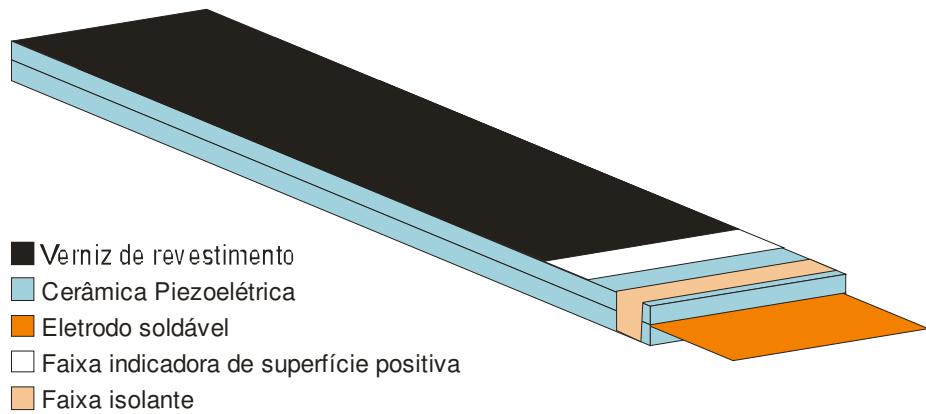
No caso deste trabalho, o micro-espelho e as articulações possuem um desenho simples, necessitando de apenas uma máscara e uma corrosão úmida. A figura 5.1 ilustra esquematicamente as etapas de produção do micro-espelho feito por fotolitografia.



[Figura 5.1 – Etapas de produção do micro-espelho]

5.2. FABRICAÇÃO DOS ATUADORES

Os atuadores foram adquiridos de uma empresa especializada, a APC International. O material intermediário usado foi a fibra de carbono por ser flexível e isolante. O cobre foi usado como eletrodo nas faces internas da cerâmica. A seguir, a figura 5.2 ilustra cada componente do atuador.



[Figura 5.2 – Componentes do atuador]

Esse atuador possui o nome de Stripe (faixa em inglês), e leva esse nome devido à faixa branca que indica a superfície positiva. As propriedades desse atuador são (APC International, Ltd., 2006):

- Tecnologia de camadas aumenta a flexibilidade, permitindo maiores deflexões (da ordem de milímetros)(<http://www.americanpiezo.com/products_services/stripe_actuators.html/>);
- Configuração elétrica paralela das camadas de cerâmica garante alta sensibilidade à tensão de excitação;
- Camada de verniz isola a superfície, protege o atuador da umidade, poeira e outros agentes que podem danificá-lo;
- Eletrodo soldável colado entre as placas de cerâmica piezelétrica;
- Força de blocagem de 0,05 N;

5.3. FABRICAÇÃO DA BASE

A Base do protótipo foi fabricada em acrílico. Como sua medida externa não necessita precisão, foi usado o corte por serra e a lixa para obter o bloco de acrílico inicial. O espaço interno, por sua vez, exige alta precisão para que a montagem dos atuadores possa ser feita precisamente, por isso foi usada a operação de fresamento.

A furação foi usada para abrir os orifícios para o encaixe do suporte. Nestes orifícios foram inseridas buchas plásticas para possibilitar que o parafuso aplique o torque necessário para pressionar o engaste contra a base e engastar o atuador.

5.4. FABRICAÇÃO DO ENGASTE

O material usado para o engaste é o alumínio, pois além de engastar os atuadores na base, é nele que se liga o acionamento elétrico, utilizando-o como eletrodo.

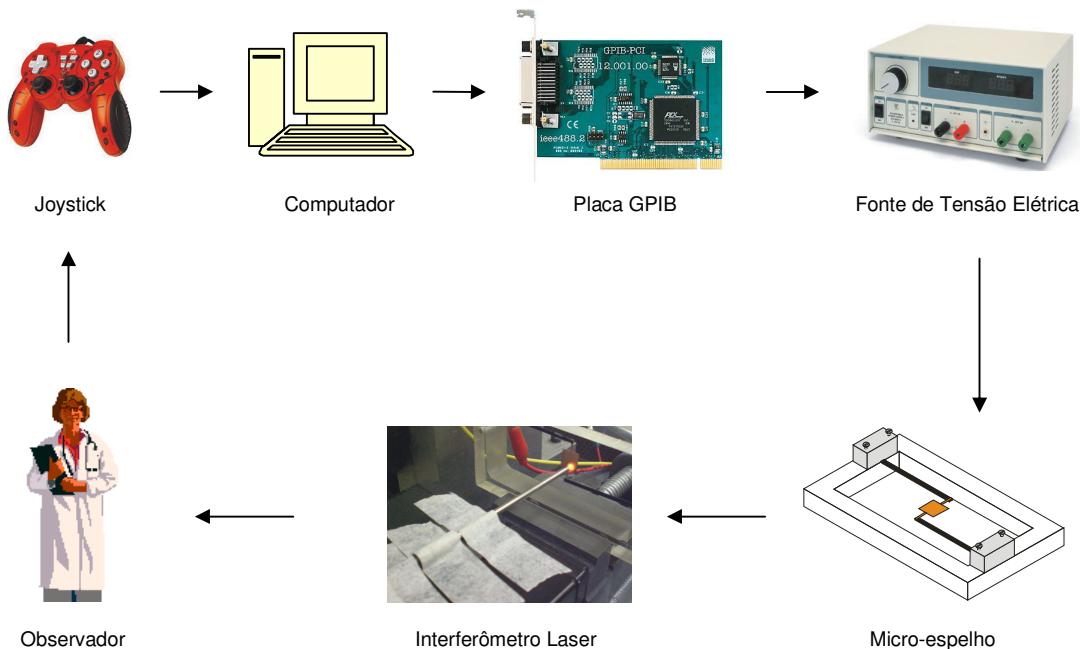
O bloco inicial de alumínio foi fresado para que a rugosidade seja baixa para ter maior contato com o atuador e para atingir dimensões precisas para a montagem. Terminado o fresamento, a peça foi cortada e lixada na dimensão necessária e foram feitos os furos através de furação.

6. Comando do Micro-espelho

6.1. FLUXO DE COMANDO

O comando de um atuador piezelétrico é feito através de uma tensão elétrica aplicada que resulta na deformação da cerâmica e, assim, no deslocamento do atuador. Este comando pode ser feito diretamente, ajustando manualmente a fonte de tensão elétrica para fornecer a tensão desejada. O comando adotado neste trabalho, no entanto, é o comando remoto, onde, através de um controle e de uma interface, é feito o acionamento do atuador.

O controle utilizado neste caso é um *joystick*. Ele fornecerá os dados para o computador através de uma entrada USB (*Universal Serial Bus*, Barramento Serial Universal). Estes dados serão tratados pelo computador através do software MATLAB, e este também fará o acionamento da fonte através de uma placa GPIB (*General Purpose Interface Bus*, Barramento de Interface para Propósitos Gerais). Os terminais da fonte são ligados à cerâmica piezelétrica que aciona o micro-espelho. O deslocamento obtido pelo micro-espelho será verificado e medido através de um interferômetro laser. A figura 6.1 ilustra o esquema do fluxo de comando.



[Figura 6.1 – Esquema do fluxo de comando]

6.2. INTERFACE GPIB

O MATLAB possui uma *toolbox* (caixa de ferramenta) desenvolvida especialmente para comunicação com diversos dispositivos de entrada e saída, a “*Instrument Control Toolbox*” (Caixa de Ferramenta de Controle de Instrumentos).

O GPIB é um barramento usado para transferência de dados entre computadores e dispositivos. Suas principais características são:

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

Os dispositivos são vistos pelo barramento como controladores, que gerenciam as tarefas e evitam conflitos entre dispositivos, “ouvidores”, que apenas escutam mensagens, e “faladores”, que apenas enviam mensagens. Neste caso o computador é o controlador e a fonte de tensão é o ouvidor.

6.3. INTERFACE ENTRE O MATLAB E O JOYSTICK

O MATLAB pode se comunicar com um *joystick* instalado no sistema operacional do computador através de uma biblioteca *dll* (*Dynamic-link Library*, Biblioteca de Ligação Dinâmica) que recebe os dados de entrada do *joystick* e os transforma em valores binários. O MATLAB recebe 6 variáveis de dados com as seguintes informações:

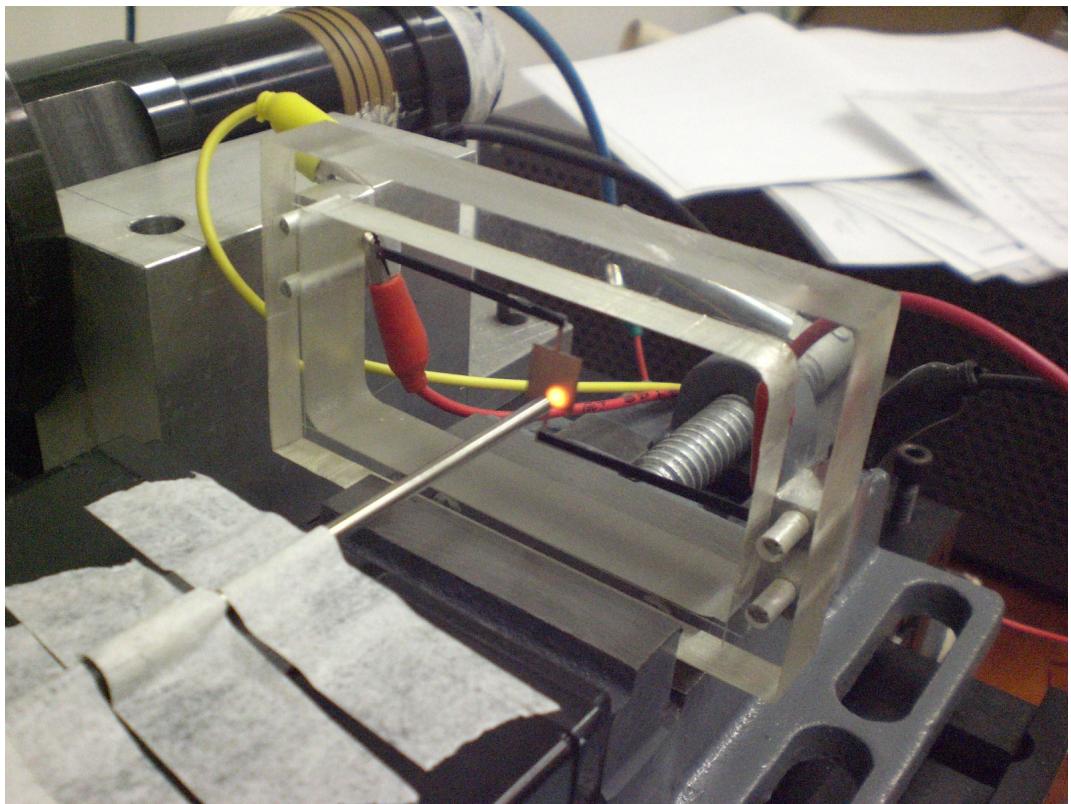
- Posição em X1 (eixo 1);
- Posição em Y1 (eixo 1);
- Posição em X2 (eixo 2);
- Posição em Y2 (eixo 2);
- Botão primido;
- Número de botões primidos;

Neste trabalho foram usadas as variáveis do eixo 1, e a variável que define qual botão foi premido. A biblioteca usada para fazer essa comunicação do MATLAB com dispositivos externos é a “*Data Acquisition Toolbox*” (Caixa de Ferramenta de Aquisição de Dados), que fornece um conjunto de ferramentas para controlar e adquirir dados a partir de placas de *hardware*. O código fonte do programa usado para tratar as informações recebidas pelo *joystick* e comandar a fonte através da placa GPIB está no Anexo B.

6.4. *INTERFERÔMETRO LASER*

O interferômetro laser é um dispositivo usado para medir distâncias a partir da interferência entre os raios laser. O menor deslocamento que ele pode medir equivale a um quarto do comprimento de onda do laser.

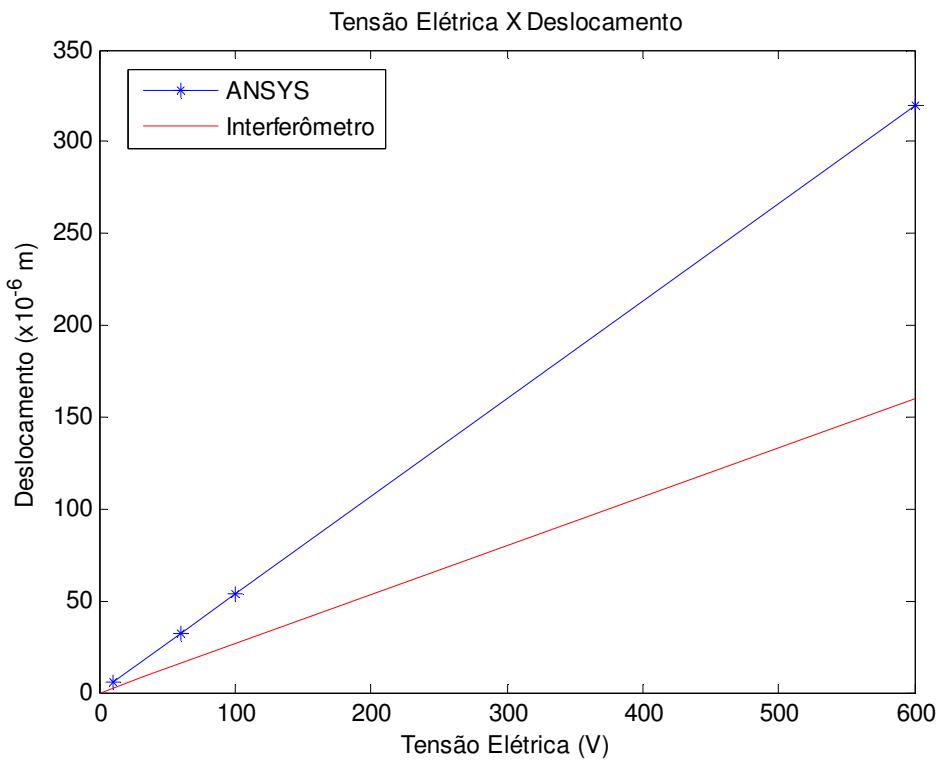
Neste trabalho o interferômetro foi posicionado em frente ao micro-espelho, como mostra a figura 6.2, e uma fonte de tensão elétrica alternada foi ligada ao micro-espelho. Como indica a figura 2.3 f, quando uma cerâmica é excitada por uma tensão elétrica alternada ela vibra. Assim, quando o micro-espelho é excitado por uma tensão elétrica alternada, ele vibra com a mesma frequência da tensão elétrica. A amplitude do deslocamento é medida pelo interferômetro laser.



[Figura 6.2 – Interferômetro Laser ligado ao micro-espelho]

7. Resultados

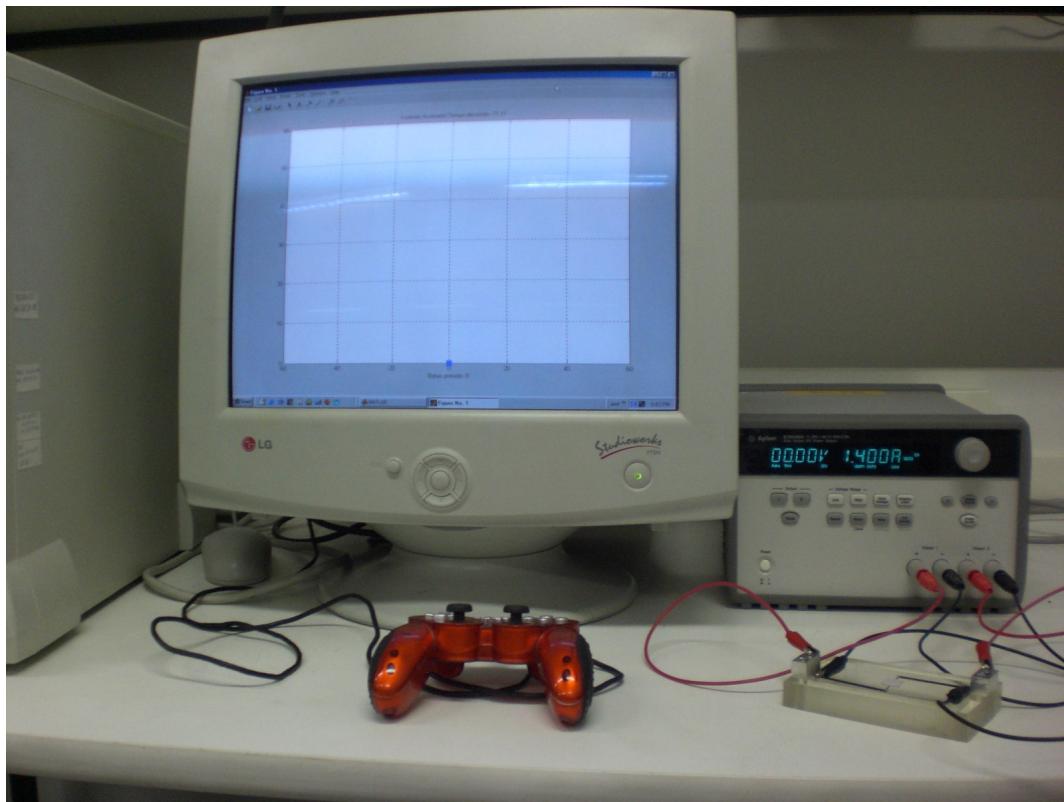
O gráfico 7.1 mostra a reta da tensão elétrica versus deslocamento obtida pelo interferômetro laser, comparada com a reta obtida nas simulações do software ANSYS.



[Gráfico 7.1 – Tensão Elétrica X Deslocamento do micro-espelho]

Nota-se que o deslocamento obtido pelo micro-espelho construído é equivalente à metade do obtido pelo micro-espelho simulado no ANSYS. Isso se deve a alguns fatores que amortecem ou dificultam o movimento do espelho, como a cola usada entre as cerâmicas e a barra engastada, o verniz de acabamento dos atuadores, as falhas ou irregularidades na construção do protótipo e etc.

A figura 7.1 apresenta o comando do micro-espelho construído. Os deslocamentos obtidos pelo micro-espelho podem ser vistos a olho nu com uma tensão elétrica aplicada de 60 V.



[Figura 7.1 – Aparelhos de comando do micro-espelho]

Como a fonte de tensão elétrica permite apenas tensões positivas, o comando do micro-espelho é feito do seguinte modo: movimentação do cursor do *joystick* para frente faz com que os dois atuadores sejam excitados por uma tensão elétrica, deslocando o micro-espelho verticalmente; a movimentação do cursor para um dos lados faz com que apenas um atuador seja excitado, rotacionando o micro espelho.

8. Conclusão

O projeto do protótipo do micro-espelho proposto mostrou-se viável devido a compatibilidade dos resultados obtidos pela simulação e os resultados esperados. O deslocamento esperado para as piezocerâmicas são da ordem de micrômetros (10^{-6} m) para uma tensão elétrica da ordem de 60 Volts (YEE *et al.*, 2000).

Os deslocamentos deste protótipo podem ser mensurados a partir de um interferômetro laser e a tensão a ser utilizada é da ordem de 60 Volts, o que tornou os testes do protótipo, depois de fabricado, possíveis de acordo com os aparelhos disponíveis.

Ainda que menores, os deslocamentos obtidos pelo protótipo são da mesma ordem de grandeza da simulação de MEF feita no ANSYS. Isso mostra a eficiência desse tipo de avaliação na fase de projeto de um microeletromecanismo.

O comando do micro-espelho se mostrou eficiente e com uma resposta rápida ao acionamento do *joystick*. Ainda que o *joystick* não proporcione grande precisão em seu acionamento, foi possível observar a variação gradual da tensão conforme se movimentava o cursor, e assim, a movimentação do micro-espelho de acordo com a tensão elétrica fornecida.

9. Referências Bibliográficas

YEE, Y. *et al.* **PZT actuated micromirror for nano-tracking of laser beam for high-density optical data storage.** The 13th Annual International Conference on MEMS. Seoul, 2000.

TSAUR, J. *et al.* **Design and fabrication of 1D and 2D micro “scanners” actuated by double layered Lead Zirconate Titanate (PZT) bimorph beams.** Japanese Journal of Applied Physics. Tsukuba, 2002.

KOBAYASHI, T.; TSAUR, J.; MAEDA, R. **Fabrication of Optical Micro “scanner” driven by PZT actuators.** Japanese Journal of Applied Physics. Tsukuba, 2005.

KOBAYASHI, T.; MAEDA, R. **Piezoelectric optical micro “scanner” with built-in torsion sensors.** Japanese Journal of Applied Physics. Tsukuba, 2007.

MAEDA, R. *et al.* **Preparation and application of Lead Zirconate Titanate (PZT) films deposited by hybrid process: Sol-Gel method and Laser Ablation.** Japanese Journal of Applied Physics . Tsukuba, 2002.

FILHOL, F. *et al.* **Resonant micro-mirror excited by a thin-film piezoelectric actuator for fast optical beam scanning.** Elsevier Science. Grenoble Cedex, 2005.

CARBONARI, Ronny Calixto; SILVA, Emílio Carlos Nelli; NISHIWAKI, Shinji. **Optimum placement of piezoelectric material in piezoactuator design.** Smart Materials Structures, Bristol, v. 16, n. 1, p. 207-220, Feb., 2007.

LAMBRECHT, A.; CUNHA, I. **Simulação, fabricação e comando de um micromanipulador piezelétrico.** Monografia apresentada no Trabalho de Formatura da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2007.

PERRUD, A.; SILVA, S. **Estudo e desenvolvimento de bisturi piezelétrico.** Monografia apresentada no Trabalho de Formatura da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2006.

UCHINO, K.; GINIEWICZ, J. **Micromechatronics.** Ed. Marcel Dekker, New York, 2003.

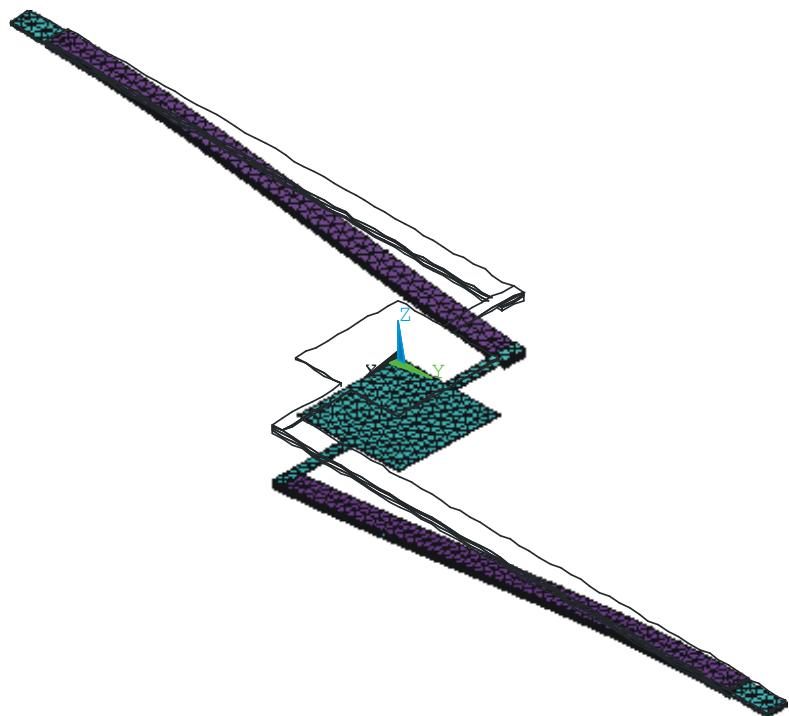
AURÉLIEN, R. **PZT Application Manual: The piezoelectric effect.** 2001. Disponível em: <<http://www.aurelienr.com/electronique/piezo/>> Acesso em: 28 de Abril de 2008.

MADOU, M. **Fundamentals of Microfabrication: The Scince of Miniaturization.** Ed. CRC Press, Boca Raton, 2001.

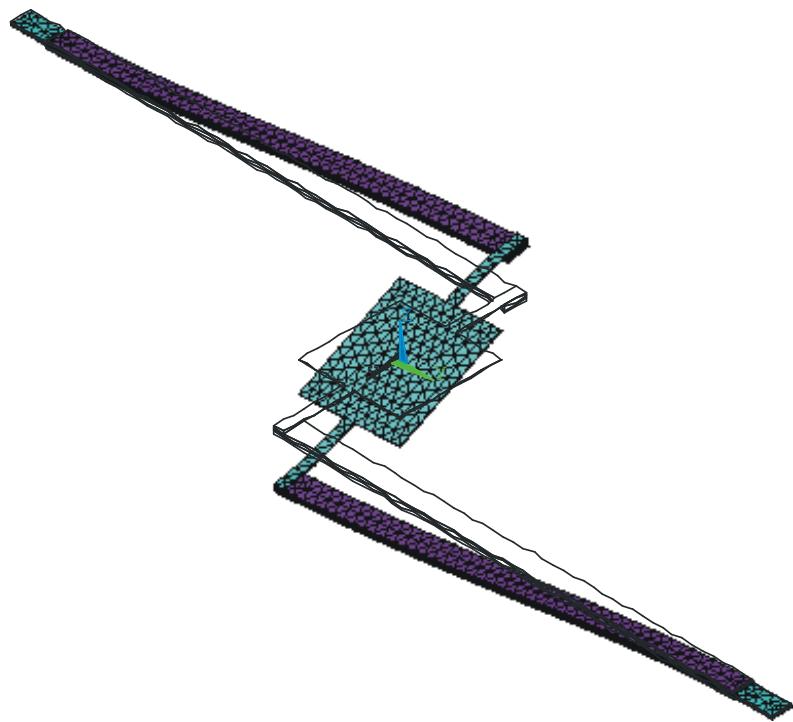
APC International, Ltd. **StripeTM Actuators.** 2006. Disponível em: <http://www.americanpiezo.com/products_services/stripe_actuators.html/> Acesso em: 21 de Novembro de 2008.

Anexo A – Resultados da Análise Modal

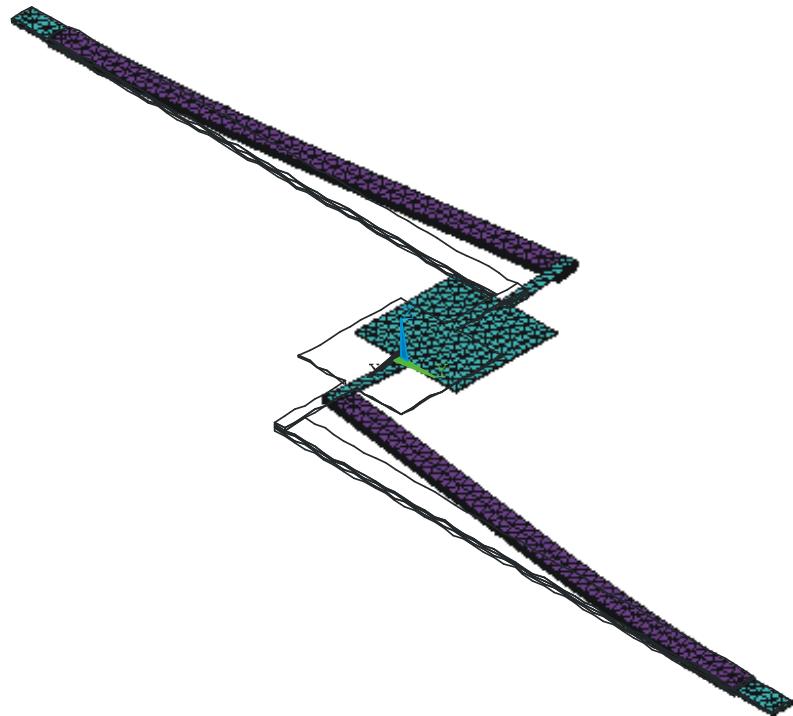
A seguir encontram-se as ilustrações dos modos de vibrar acompanhados de suas freqüências de ressonância correspondentes. Os modos de vibrar são determinantes para se definir a freqüência de operação dos atuadores, bem como do micro-espelho. Essa freqüência é determinada pelo menor modo de vibrar piezelétrico, ou seja, a menor freqüência de ressonância que apresenta um modo de vibrar compatível com o acionamento dos atuadores.



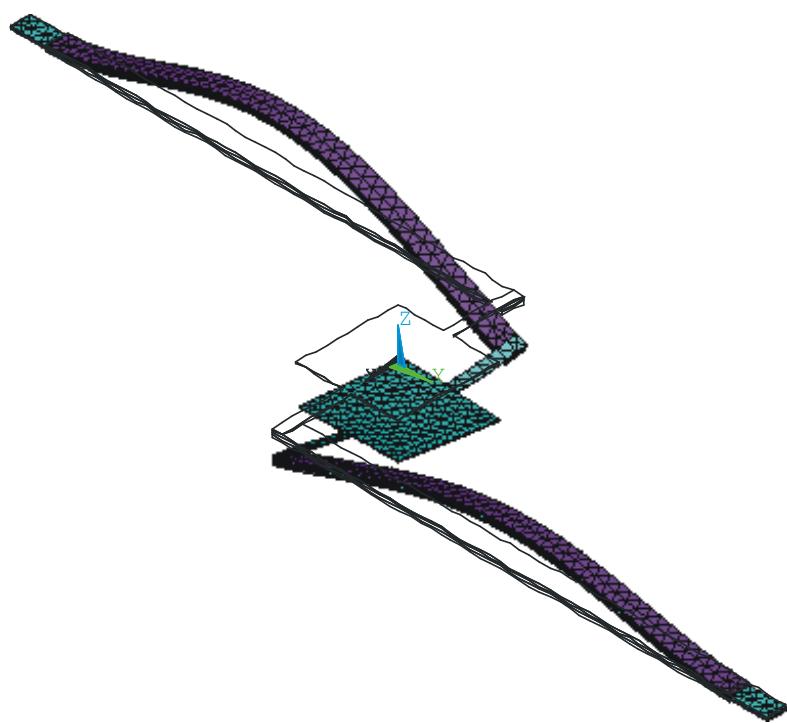
[1º Modo de Vibrar – 222,84 Hz]



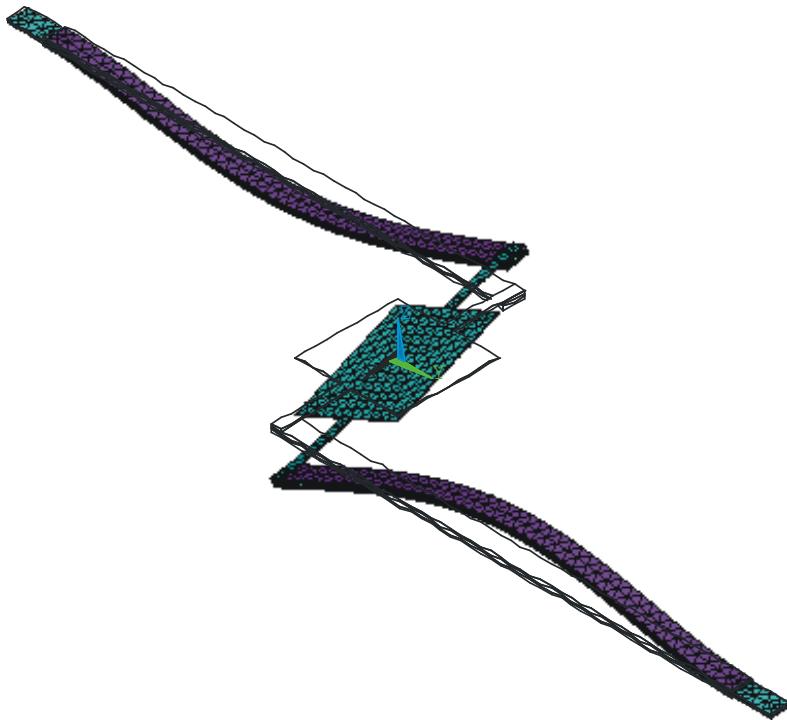
[2º Modo de Vibrar – 448,71 Hz]



[3º Modo de Vibrar – 525,49 Hz]



[4º Modo de Vibrar – 1222,0 Hz]



[5º Modo de Vibrar – 1256,8 Hz]

Anexo B – Código Fonte do Programa em MATLAB

```
daqregister('joz.dll');
ai=analoginput('joy',1); % ID do joystick (painel de controle)
%channels: 1=X1; 2=Y1; 3=X2; 4=Y2; 5=no do botao primido; 6=no de
botoes primidos
addchannel(ai,[1 2 3 4 5 6]);

% Inicializando o 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 = [];

%Criando um objeto GPIB
obj1 = instrfind('Type', 'gpib', 'BoardIndex', 7, 'PrimaryAddress',
10, 'Tag', '');

%Criando um objeto GPIB se ele não existe
if isempty(obj1)
    obj1 = gpib('AGILENT', 7, 10);
else
    fclose(obj1);
    obj1 = obj1(1);
end

%Conectando ao objeto, obj1.
fopen(obj1);

% Comunicando com o objeto, obj1.
data1 = query(obj1, '*IDN?');
% Iniciando com tensões elétricas iguais a zero
Tensao_1=0;
Tensao_2=0;

fprintf (obj1, 'INST:SEL OUT1');
fprintf (obj1, 'VOLT %d', Tensao_1);
fprintf (obj1, 'INST:SEL OUT2');
fprintf (obj1, 'VOLT %d', Tensao_2);
fprintf (obj1, 'OUTPUT ON');

bP = 0;

% Loop principal
while bP ~= 1 % mantém a tensão constante se o botão 1 for primido
    % obtenção dos dados
    d = getsample(ai)

    d(2) = -6*d(2);
    d(1) = 6*d(1);

    % Definindo as tensões elétricas de saída
    if d(2) > 0.5
        d(1)=0;
```

```

Tensao_1 = d(2);
Tensao_2 = d(2);
end

if d(2) < 0.5
    d(2)=0;
    if d(1) > 0
        Tensao_1 = d(1);
        Tensao_2 = 0;
    elseif d(1) < -0.5
        Tensao_1 = 0;
        Tensao_2 = -d(1);
    else
        d(1) = 0;
        d(2) = 0;
        Tensao_1 = 0;
        Tensao_2 = 0;
    end
end

% Evitar que dê erro na fonte
if Tensao_1 < 0
    Tensao_1=0;
end
if Tensao_2 < 0
    Tensao_2=0;
end

% decodificando os dados dll: JoyIn.cpp
ButtonsPressed = round((10+d(5))*32768/10); %normalização do dado
bP = ButtonsPressed;
set(hJoy,'XData',d(1),'YData',d(2));
set(hJoy2,'XData',-10,'YData',-10); % O eixo 2 não é utilizado
set(hTitle,'String',['Controle Acionado! Tempo decorrido: '
num2str(etime(clock,t0))]);
set(hXAxis,'String',['Botão primido: ',num2str(bP)]);
tt = [tt; etime(clock,t0)];
axis([-60 60 0 60])
drawnow;
grid on;

% Zera a fonte e sai do programa se o botão 2 for primido
if bP == 2
    Tensao_1 = 0;
    Tensao_2 = 0;
    bP = 1;
end

fprintf (obj1, 'INST:SEL OUT1');
fprintf (obj1, 'VOLT %d', Tensao_1);
fprintf (obj1, 'INST:SEL OUT2');
fprintf (obj1, 'VOLT %d', Tensao_2);
end

% desconectando do objeto, obj1.
fclose(obj1);

% limpando o objeto.
delete(obj1);

```