

SANDRA TIE CARVALHO

note final

9 (nove)

NB

PROJETO, FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM  
NANOPOSICIONADOR XY  $\theta_z$  PIEZELÉTRICO

TRABALHO DE FORMATURA  
APRESENTADO À ESCOLA  
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO  
DO TÍTULO DE ENGENHEIRA

SÃO PAULO

2007

SANDRA TIE CARVALHO

PROJETO, FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM  
NANOPOSICIONADOR XY  $\theta_z$  PIEZELÉTRICO

TRABALHO DE FORMATURA  
APRESENTADO À ESCOLA  
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO  
DO TÍTULO DE ENGENHEIRA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:  
ENGENHARIA MECATRÔNICA

ORIENTADOR:  
PROF. DR. EMÍLIO CARLOS NELLI  
SILVA

SÃO PAULO

2007

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva, pelas importantes orientações recebidas durante a condução deste trabalho, e por inspirar grande confiança e motivação em seus alunos.

Agradeço aos amigos Sandro Watanabe, Andres Choi e Ronny Calixto Carbonari pela ajuda prestada para a realização desse trabalho.

Agradeço a meus pais e amigos que indiretamente me ajudaram na conclusão deste trabalho de formatura.

## **RESUMO**

Nanoposicionadores piezelétricos são dispositivos capazes de prover deslocamentos precisos em escala de nanômetros. Na atualidade são utilizados em diversas aplicações como em microscópios de tunelamento, máquinas de microfabricação e microalinhamento que necessitam deste tipo de precisão. Existem três tipos de nanoposicionadores piezelétricos mais comuns: posicionador por atrito induzido pelo efeito “stick-slip”, posicionador tipo minhoca e o posicionador por amplificação mecânica. Neste trabalho abordaremos o que se utiliza do efeito de amplificação mecânica. A geometria do dispositivo e a configuração específica em que se apresentam as cerâmicas é que caracterizam o perfil de deslocamento a ser produzido pelo mesmo. O seu acionamento se dá através da excitação das cerâmicas piezelétricas. As combinações de aplicação de diferentes padrões de tensão nas cerâmicas geram uma gama de deslocamentos. O nanoposicionador a ser estudado possui quatro cerâmicas piezelétricas, duas atuando em X e duas em Y, que permitem a realização dos movimentos de translação e rotação. O presente trabalho visa estudar a viabilidade de um modelo de nanoposicionador piezelétrico através de simulações computacionais que utilizam o Método de Elementos Finitos (MEF), da fabricação e caracterização de protótipos.

## ABSTRACT

Piezoelectric nanopositioners are capable of providing motion in nanometer scale with high accuracy. In the present, it is used in a variety of applications that require high precision such as scanning tunneling microscope, microalignment and microfabrication machines. In general, there are three types of nanopositioners: the friction drive stage induced by stick-slip effect, the clamp-release inchworm-type stage and the mechanical amplification stage. In this graduation project the former will be the main subject. The design geometry of the device and the piezoelectric ceramics position are responsible for its generated displacement range. Its motion occurs due to applied voltage to the piezoelectric ceramic electrodes. By combining different piezoecericamical electrical excitations, different kinds of motion can be generated. The nanopositioner discussed in this project has four piezoelectric ceramics, two for generating the X direction motion and two for generating the Y direction motion, that can provide translation and rotational movements. The main objective of this project is the study of viability of a piezoelectric nanopositioner through simulation by using Finite Element Method (FEM), prototype construction and characterization.

## **Sumário**

### **LISTA DE FIGURAS**

### **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

### **LISTA DE SÍMBOLOS**

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>5</b>
<b>3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Fundamentos da Piezelectricidade .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2 Método de Elementos Finitos (MEF) .....</b>	<b>10</b>
<b>3.2.1 MEF Piezelétrico .....</b>	<b>11</b>
<b>3.3 Métodos de Fabricação .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3.1 Eletroerosão a Fio.....</b>	<b>17</b>
<b>3.3.2 Fotofabricação.....</b>	<b>20</b>
<b>4 DESCRIÇÃO DO NANOPOSICIONADOR IMPLEMENTADO .....</b>	<b>21</b>
<b>5 MODELAGEM COMPUTACIONAL.....</b>	<b>24</b>
<b>5.1 Modelagem e simulação no ANSYS .....</b>	<b>24</b>
<b>6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>28</b>
<b>6.1 Modelo I .....</b>	<b>28</b>
<b>6.1.1 Configuração 1: todas as cerâmicas sendo atuadas em fase .....</b>	<b>29</b>
<b>6.1.2 Configuração 2: as cerâmicas em X e Y sendo atuadas para um movimento de rotação</b>	<b>31</b>
<b>6.1.3 Configuração 3: somente as cerâmicas em X sendo atuadas .....</b>	<b>33</b>
<b>6.1.4 Configuração 4: somente as cerâmicas em Y sendo atuadas .....</b>	<b>35</b>
<b>6.1.5 Análise Harmônica .....</b>	<b>37</b>
<b>6.2 Modelo II .....</b>	<b>39</b>
<b>6.2.1 Configuração 1: todas as cerâmicas sendo atuadas em fase .....</b>	<b>39</b>

6.2.2	Configuração 2: as cerâmicas em X e Y sendo atuadas para um movimento de rotação	41
6.2.3	Configuração 3: somente as cerâmicas em X sendo atuadas .....	43
6.2.4	Configuração 4: somente as cerâmicas em Y sendo atuadas .....	45
6.2.5	Análise Harmônica .....	47
<b>7</b>	<b>MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>49</b>
7.1	<b>Medição por Interferometria a Laser.....</b>	<b>49</b>
7.2	<b>Manuseio das Cerâmicas Piezelétricas .....</b>	<b>51</b>
7.3	<b>Protótipo do Modelo I Fabricado por Eletroerosão a Fio .....</b>	<b>54</b>
7.3.1	Resultados Experimentais da Configuração 1 .....	57
7.3.2	Resultados Experimentais da Configuração 2.....	59
7.3.3	Resultados Experimentais da Configuração 3.....	60
7.3.4	Resultados Experimentais da Configuração 4 .....	61
7.4	<b>Protótipo do Modelo II Fabricado por Fotofabricação .....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

#### **APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS DO MODELO I**

#### **APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DO MODELO II**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Posicionadores do tipo: (A) Atrito induzido, (B) Minhoca e (C) Amplificação Mecânica.....	2
Figura 2 – Exemplos de nanoposicionadores baseados em amplificação mecânica.....	4
Figura 3 – Efeito Longitudinal (a) e Transversal (b). ....	6
Figura 4 – Estrutura de uma célula unitária de PZT: não - polarizado (a) e polarizado (b). ....	6
Figura 5 – Processo de polarização: antes (a); polarização total (b) e polarização permanente (c). ....	7
Figura 6 – (a) Estado plano de tensões mecânicas (EPTM); (b) Estado plano de deformações mecânicas (EPDM). ....	9
Figura 7 – Princípio de funcionamento da eletroerosão a fio. ....	19
Figura 8 – Esquema de uma máquina de eletroerosão a fio. ....	19
Figura 9 – Processo de fotofabricação. ....	21
Figura 10 – Modelo do nanoposicionador. ....	22
Figura 11 – Esquema do movimento de translação. ....	23
Figura 12 – Esquema do movimento de rotação. ....	23
Figura 13 – Identificação das cerâmicas. ....	28
Figura 14 – Deslocamentos totais (m) em XY para as todas as cerâmicas excitadas em fase.....	29
Figura 15 – Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas piezelétricas excitadas em fase.....	30
Figura 16 – Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas excitadas em fase. ....	30
Figura 17 – Deslocamentos totais (m) em XY para o movimento de rotação....	31
Figura 18 – Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas para o movimento de rotação.....	32
Figura 19 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento de rotação. ....	32
Figura 20 - Deslocamentos totais (m) em XY com as cerâmicas em X sendo atuadas. ....	33
Figura 21 - Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas para o deslocamento em X.....	34
Figura 22 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento em X. ....	34
Figura 23 - Deslocamentos totais (m) em XY com as cerâmicas em Y sendo atuadas. ....	35
Figura 24 - Distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas para o deslocamento em Y.....	36
Figura 25 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento em Y. ....	36
Figura 26 – Resultado da análise harmônica. ....	38
Figura 27 – Deslocamentos totais (m) em XY para as todas as cerâmicas excitadas em fase.....	40
Figura 28 – Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas piezelétricas excitadas em fase.....	40

Figura 29 – Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas excitadas em fase.....	41
Figura 30 – Deslocamentos totais (m) em XY para o movimento de rotação....	42
Figura 31 – Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas para o movimento de rotação.....	42
Figura 32 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento de rotação. ....	43
Figura 33 - Deslocamentos totais (m) em XY com as cerâmicas em X sendo atuadas.....	44
Figura 34 - Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas para o deslocamento em X.....	44
Figura 35 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento em X. ....	45
Figura 36 - Deslocamentos totais (m) em XY com as cerâmicas em Y sendo atuadas.....	46
Figura 37 - Distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas para o deslocamento em Y.....	46
Figura 38 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento em Y. ....	47
Figura 39 – Resultado da análise harmônica.....	48
Figura 40 - Interferômetro em quadratura do tipo Mach-Zhender.....	51
Figura 41 - Preparação da cerâmica para o corte. ....	52
Figura 42 - Corte da cerâmica. ....	53
Figura 43 - Fixação da cerâmica para corte. ....	53
Figura 44 - Fixação das cerâmicas para o lixamento. ....	53
Figura 45 – Protótipo do Modelo I. ....	55
Figura 46 – Montagem do interferômetro para a medição. ....	55
Figura 47 – Fixação da fita reflexiva. ....	56
Figura 48 – Figura de “Lissajou” para configuração 1 na direção X. ....	57
Figura 49 – Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 1 em X. ....	57
Figura 50 - Figura de “Lissajou” para configuração 1 na direção Y. ....	58
Figura 51 - Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 1 em Y. ....	58
Figura 52 – Figura de “Lissajou” para configuração 2 na direção Y. ....	59
Figura 53 – Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 2 em Y. ....	59
Figura 54 – Figura de “Lissajou” para configuração 3 na direção X. ....	60
Figura 55 – Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 3 em X. ....	61
Figura 56 – Figura de “Lissajou” para configuração 4 na direção Y. ....	62
Figura 57 – Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 4 em Y. ....	62
Figura 58 - Protótipo do Modelo II. ....	63
Figura 59 – Comparação entre os modelos I e II.....	63

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>STM</b>	“Scanning Tunneling Microscope”
<b>AFM</b>	“Atomic Force Microscope”
<b>MFM</b>	“Magnetic Force Microscope”
<b>MEMS</b>	Sistemas Micro-eletromecânicos
<b>PZT</b>	Titanato Zirconato de Chumbo
<b>EPTM</b>	Estado Plano de Tensão Mecânica
<b>EPDM</b>	Estado Plano de Deformação Mecânica
<b>MEF</b>	Método de Elementos Finitos
<b>MDF</b>	Método de Diferenças Finitas
<b>CAD</b>	“Computer Aided Design”

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>T</b>	vetor tensão elétrica
<b>D</b>	vetor deslocamento elétrico
<b>S</b>	vetor deformação
<b>E</b>	vetor campo elétrico
$\epsilon^S$	matriz de constantes dielétricas para deformação constante
$c^E$	matriz de rigidez elástica para campo elétrico constante
<b>e</b>	matriz de coeficientes piezelétricos
<b>u</b>	vetor deslocamento
<i>t</i>	tempo (s)
<i>x</i>	coordenada x
<i>y</i>	coordenada y
$\rho$	densidade do material
<b>Φ</b>	vetor potencial elétrico
<b>N</b>	vetor da função de forma do deslocamento
<b>U</b>	vetor de deslocamento nodal
<b>B<sub>u</sub></b>	matriz deformação-deslocamento
<b>B<sub>Φ</sub></b>	matriz campo elétrico-deslocamento
<b>F</b>	vetor de esforços mecânicos
<b>Q</b>	vetor de cargas elétricas
<b>[M]</b>	matriz de massa
<b>[K]</b>	matriz de rigidez
$\omega$	freqüência de excitação
<b>E</b>	módulo de elasticidade
<b>I</b>	vetor de corrente elétrica
<b>Z</b>	vetor da impedância elétrica
<b>V</b>	vetor da diferença de potencial elétrico
<b>E</b>	módulo de elasticidade
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\lambda$	comprimento de onda

## **1 INTRODUÇÃO**

Recentes avanços em Engenharia de Precisão e o desenvolvimento concomitante de avançadas técnicas de manufatura, levaram ao resultado de que componentes manufaturados ou usinados não estão mais restritos a dimensões microscópicas e podem ser fabricados agora em nano escala. Estes avanços na tecnologia levaram a uma necessidade urgente de se desenvolver sistemas de posicionamento de precisão capazes de executar movimentos com resolução em nano escala. Enquanto isso, o desenvolvimento de microscópios de tunelamento (“scanning tunneling microscope – STM”) resultou na inovação de outros métodos de medição similares como o microscópio de força atômica (“atomic force microscope - AFM”) e o microscópio de força magnética (“magnetic force microscope - MFM”). Essas técnicas são capazes de fornecer micro e nano medições de superfícies topográficas 3D de amostras. Para explorar todo o potencial desses microscópios é preciso o desenvolvimento de nanoposicionadores de alta precisão [1].

Há uma tendência no setor de tecnologia nos EUA para o desenvolvimento de menores, mais rápidos, mais densamente empacotados, estruturas mais precisamente controladas e dispositivos que integrem propriedades mecânicas com elétricas ou magnéticas, com uma vasta aplicação comercial e militar. Diversos exemplos existem em eletrônica, óptica, sistemas micro-eletromecânicos “MEMS”, armazenagem magnética e equipamentos médicos. Muitas dessas tecnologias dependem em algum ponto da manufatura de precisão. Os processos de manufatura de precisão que serão desenvolvidos num futuro próximo irão precisar de dispositivos atuados por cerâmicas piezelétricas. Elementos piezelétricos podem estabilizar a ferramenta de corte e mover a peça usinada. Conforme dispositivos mecânicos ou elétricos atingem seu limite, os elementos piezelétricos vão tomar o seu lugar. Os elementos piezelétricos possuem uma precisão sem comparação. O uso de ferramentas atuadas por piezelétricos satisfaz a necessidade de rugosidade superficial menor que um

nanômetro e precisão e controle na usinagem de perfis da ordem de 10 nm ou menos. As combinações dessas características com a necessidade de altas taxas de remoção de material demandam uma ferramenta que possa executar movimentos rápidos e precisos. Nanoposicionadores piezelétricos que utilizam o princípio de amplificação mecânica são usados para translações lineares de alta resolução e servem para este propósito [2].

Tecnologia de alta precisão em posicionamento é essencial em aplicações como microscópio de tunelamento, máquinas de microalinhamento e microfabricação. Tais microposicionadores precisam proporcionar um movimento em escala nanométrica com alta acuracidade, velocidade e capacidade de carga. Em geral, existem três tipos de nanoposicionadores piezelétricos para este propósito: posicionador por atrito induzido pelo efeito “stick-slip”, posicionador tipo minhoca e o posicionador por amplificação mecânica, como na Figura 1.

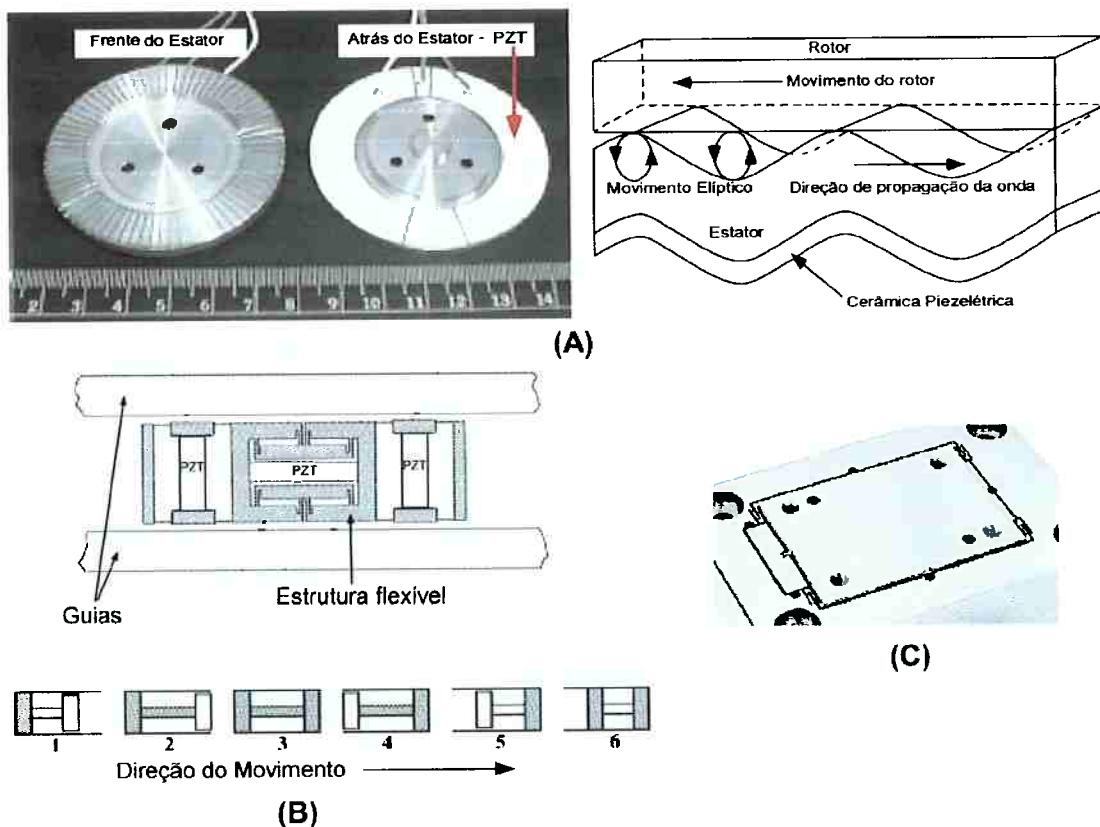


Figura 1 – Posicionadores do tipo: (A) Atrito induzido, (B) Minhoca e (C) Amplificação Mecânica.

O primeiro tem problemas de confiabilidade no teste de vida e o segundo apresenta dificuldade para a implantação do sistema de controle para o conjunto de atuadores piezelétricos que envolve. O terceiro tipo é baseado na fina expansão do efeito piezelétrico e no desenho para a amplificação mecânica. Este tipo de posicionador utiliza mecanismos flexíveis para atingir uma resolução de 1 nm num deslocamento de 50  $\mu\text{m}$ . Outro posicionador que utiliza articulações do tipo "Scott-Russell" atingiu 100  $\mu\text{m}$  de deslocamento com resolução de 40 nm [3].

Nanoposicionadores piezelétricos baseados em amplificação mecânica (Figura 2) são superiores a posicionadores que se baseiam em sistemas de guias em termos de resolução, reprodução do movimento e alinhamento. Por não terem atrito e devido a precisão do seu movimento, nanoposicionadores piezelétricos baseados em sistemas com amplificação mecânica, podem atingir repetibilidade e um mínimo de incremento na escala de nanômetros. Eles também são capazes de acelerar até 10.000 g e devido a sua massa pequena são capazes de prover movimentos muito mais rápidos que sistemas motorizados. O sistema de amplificação mecânica se baseia na deformação elástica do material, assim atrito e desgaste são descartados e a flexão exibe alta rigidez, capacidade de carga e resistência a choques e vibração. O sistema também não exige manutenção, não está sujeita ao desgaste, pode ser utilizado no vácuo, não precisa de lubrificantes e nem de ar comprimido para a sua operação. O efeito piezelétrico é relacionado com campos elétricos e não produzem campo magnético, também não são afetados por eles. Dispositivos piezelétricos são recomendados para aplicações nas quais os campos magnéticos não são tolerados.



Figura 2 – Exemplos de nanoposicionadores baseados em amplificação mecânica.

Outras aplicações para nanoposicionadores piezelétricos são:

- Armazenagem de dados: teste de discos e cancelamento de vibração ativa;
- Semicondutores e microeletrônica: nano e microlitografia, nanometrologia, posicionamento de máscara e “wafer” e teste de dimensionamento crítico;
- Mecânica de precisão: servo de máquinas rápidas, torneamento e furação não - circular, ajuste de ferramentas, compensação de desgaste e microbombas;
- Ciências médicas: microscópio de varredura, manipulação de genes, micromanipulação e penetração em células;
- Ótica e nanometrologia: espelhos de varredura, estabilização de imagens, sistemas com autofocus, interferometria e alinhamento de fibras ópticas [4].

## **2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA**

Este trabalho de formatura tem como objetivo a modelagem, fabricação e caracterização de um nanoposicionador XY $\theta$ , piezelétrico. Na simulação será utilizado o software ANSYS e as análises feitas visam detectar se o modelo funciona de acordo com o previsto. Em seguida, serão fabricados dois protótipos utilizando os métodos de fabricação por eletroerosão a fio e fotofabricação.

A motivação deste trabalho é o domínio completo do ciclo de desenvolvimento destes nanoposicionadores e também o entendimento desta nova tecnologia, que é vastamente aplicada e faz parte da área de estudos da Mecatrônica.

## **3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

A seguir estão descritos brevemente os principais conceitos utilizados para a realização deste trabalho.

### **3.1 Fundamentos da Piezelectricidade**

O efeito piezelétrico é a conversão de energia elétrica para energia mecânica através da aplicação de campo elétrico em cerâmicas especificamente polarizadas. Este efeito foi primeiramente descoberto em quartzo no ano de 1880 pelos irmãos Jacques e Pierre Curie. Eles constataram que quando certos tipos de cristais sofrem a ação de tensão mecânica, a carga resultante causa um estado polarizado no cristal e um campo elétrico é criado. O inverso também é verdadeiro, se aplicado um campo elétrico no cristal, ocorre o aparecimento de tensões mecânicas e forças. Este fenômeno é chamado de efeito piezelétrico. Esse efeito pode ocorrer de dois modos: longitudinal e transversal. Na direção longitudinal, aplica-se a força de tração ou compressão paralelamente ao eixo de polarização, obtendo-se tensão elétrica nessa direção (Figura 3 a). Na direção transversal, a força é aplicada perpendicular à polarização, o que também resulta no aparecimento de voltagem elétrica (Figura 3 b).

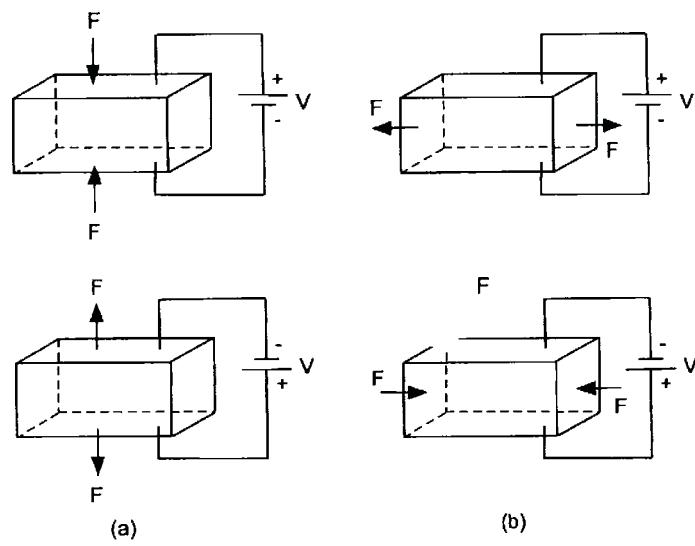


Figura 3 – Efeito Longitudinal (a) e Transversal (b).

Os efeitos piezelétricos são características de todos os cristais ferroelétricos. Entretanto, o efeito piezelétrico exibido por materiais naturais como o quartzo era muito fraco e por isso foram desenvolvidas novas cerâmicas ferroelétricas policristalinas como o BaTiO<sub>3</sub> e o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) que aumentam suas propriedades após passarem pelo processo de polarização e se transformarem em cerâmicas piezelétricas. Durante o processo de polarização, as cerâmicas PZT passam de sua forma natural Cúbica de Face Centrada (estrutura isotrópica) para Tetragonal (estrutura anisotrópica), como na Figura 4 [4].

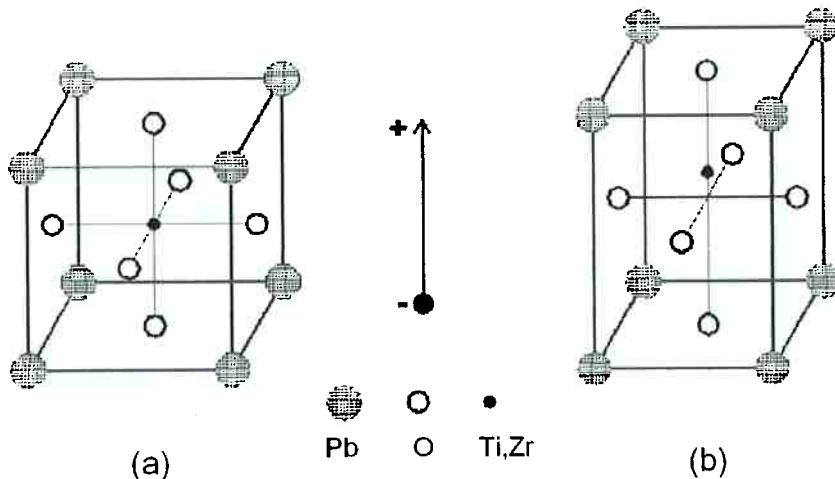


Figura 4 – Estrutura de uma célula unitária de PZT: não - polarizado (a) e polarizado (b).

A separação entre as cargas positivas e negativas gera o comportamento de dipolo elétrico. Grupos de células unitárias com mesma orientação são chamados de Domínios de Weiss. Os Domínios de Weiss são aleatórios no estado natural do material PZT antes do tratamento de polarização (Figura 5 a). O principal objetivo desse processo é produzir uma polarização permanente na cerâmica, uma vez que esses dipolos podem ser facilmente orientados com aplicação de tensão. Primeiramente aplica-se uma diferença de potencial gradualmente progressiva na direção e sentido desejados da polarização. 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. Quando todos os dipolos estiverem alinhados, o material não se expandirá mais (Figura 5 b) e, após a retirada da tensão, para qualquer tensão que gere um campo menor que o campo elétrico necessário para a polarização completa, a cerâmica terá uma polarização permanente (Figura 5 c), caracterizando-a como um material piezelétrico.

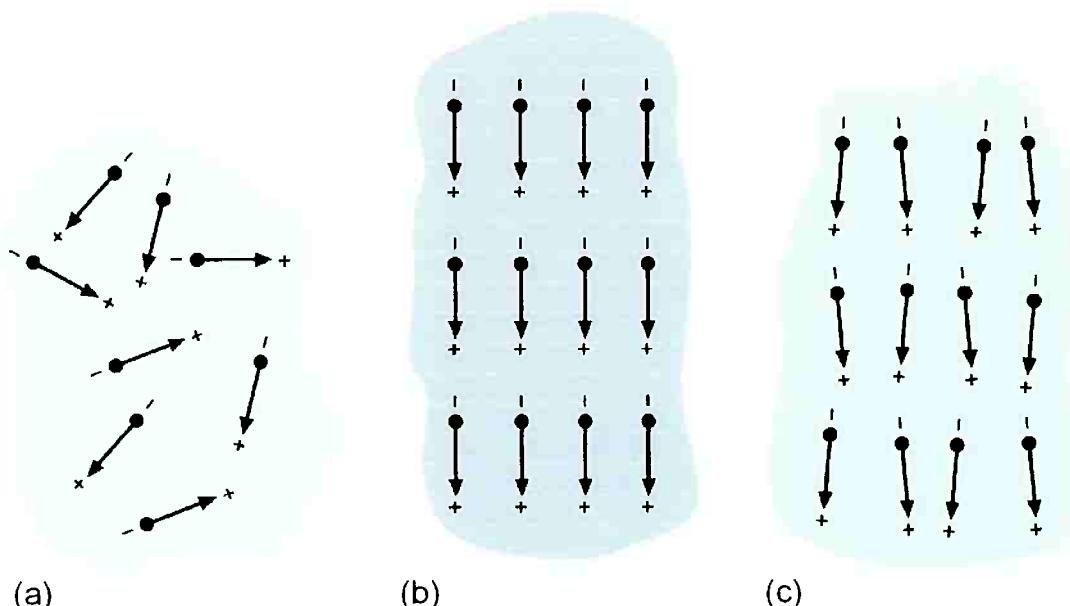


Figura 5 – Processo de polarização: antes (a); polarização total (b) e polarização permanente (c).

Após adquirir a polarização permanente, a mesma pode ser degradada se o material for exposto a tensões mecânicas, térmicas e elétricas superiores as do limite do material. No entanto existem exceções e

algumas cerâmicas precisam de elevadas temperaturas para o processo de polarização se completar.

As equações constitutivas do efeito piezelétrico são [5]:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e} \mathbf{E} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}^T \mathbf{S} + \mathbf{\epsilon}^S \mathbf{E} \quad (3.2)$$

Onde:

$\mathbf{T}$  = vetor tensão elétrica;

$\mathbf{D}$  = vetor deslocamento elétrico;

$\mathbf{S}$  = vetor deformação;

$\mathbf{E}$  = vetor campo elétrico;

$\mathbf{\epsilon}^S$  = matriz de constantes dielétricas para deformação constante;

$\mathbf{c}^E$  = matriz de rigidez elástica para campo elétrico constante;

$\mathbf{e}$  = matriz de coeficientes piezelétricos.

As componentes dessas matrizes são descritas em função dos eixos x,y e z como mostrado abaixo:

$$\mathbf{T} = \begin{Bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{zz} \\ T_{yz} \\ T_{xz} \\ T_{xy} \end{Bmatrix}; \mathbf{S} = \begin{Bmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{zz} \\ S_{yz} \\ S_{xz} \\ S_{xy} \end{Bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{Bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{Bmatrix}; \mathbf{E} = \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Para cerâmicas piezelétricas da classe 6 mm, definem-se as matrizes  $\mathbf{c}^E$ ,  $\mathbf{\epsilon}^S$  e  $\mathbf{e}$  conforme abaixo:

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Para este trabalho, as equações 3.1 e 3.2 podem ser descritas para casos bidimensionais. Estes problemas podem ser divididos em: estado plano de tensão mecânica (EPTM) e estado plano de deformação mecânica (EPDM). O primeiro se refere a corpos com geometria em que a largura e o comprimento são muito maiores que a espessura e o segundo para a largura muito maior que o comprimento e a espessura (Figura 6).

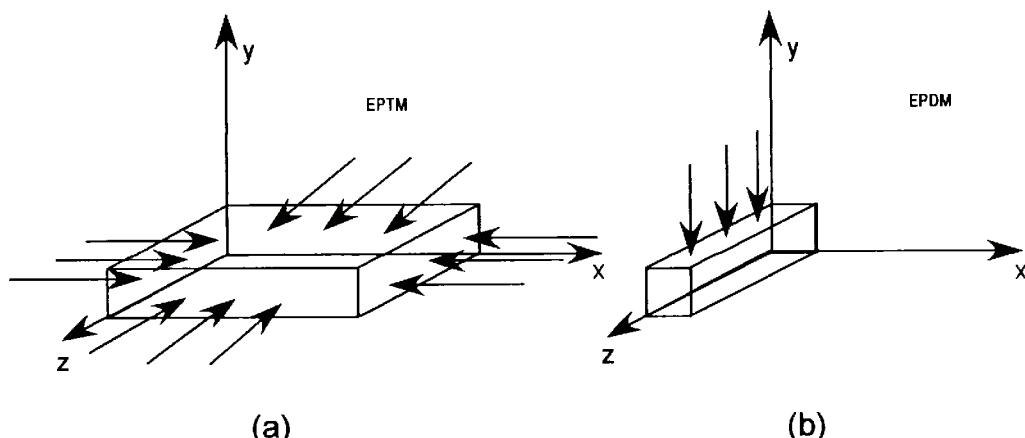


Figura 6 – (a) Estado plano de tensões mecânicas (EPTM); (b) Estado plano de deformações mecânicas (EPDM).

Neste trabalho, utiliza-se somente o EPTM, em que se pode fazer as seguintes considerações:

$$T_{zz} = 0, \quad T_{yz} = 0, \quad T_{xz} = 0$$

No caso dos materiais piezelétricos da classe 6 mm no estado plano de tensão, a componente do deslocamento elétrico na direção z também é considerada nula:

$$D_z = 0$$

Dessa forma, as equações constitutivas piezelétricas 3.1 e 3.2, juntamente com as equações 3.4 a 3.6, são reduzidas para a seguinte forma [6]:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_{xy} \\ D_x \\ D_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} - \frac{c_{12}^2}{c_{11}} & c_{13} - \frac{c_{12} \cdot c_{31}}{c_{11}} & 0 & 0 & e_{31} - \frac{e_{31} \cdot c_{12}}{c_{11}} \\ c_{13} - \frac{c_{12} \cdot c_{13}}{c_{11}} & c_{33} - \frac{c_{31}^2}{c_{11}} & 0 & 0 & e_{33} - \frac{e_{31} \cdot c_{13}}{c_{11}} \\ 0 & 0 & c_{44} & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & e_{15} & -\varepsilon_{11} & 0 \\ e_{31} - \frac{e_{31} \cdot c_{12}}{c_{11}} & e_{33} - \frac{e_{31} \cdot c_{13}}{c_{11}} & 0 & 0 & -\left( \varepsilon_{33} - \frac{e_{31}^2}{c_{11}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_{xy} \\ -E_x \\ -E_y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

### 3.2 Método de Elementos Finitos (MEF)

Para modelagem de nanopositionadores piezelétricos no ANSYS é usado o Método de Elementos Finitos (MEF). O MEF é um procedimento numérico usado para se obter soluções para uma abrangente variedade de problemas de Engenharia envolvendo análises de tensões, transferência de calor, eletromagnetismo e etc.

A maioria dos problemas de Engenharia são modelos matemáticos de situações físicas. Modelos matemáticos são equações diferenciais com condições de contorno e parâmetros iniciais definidos. Essas equações diferenciais são resultado da aplicação de leis fundamentais ou princípios da natureza a sistemas ou volumes de controle e, dessa forma, representar um balanço de massa, força e energia da estrutura em estudo. As soluções exatas para essas equações possuem duas partes: uma parte homogênea e uma parte particular. Para se definir a solução da parte homogênea, são usados parâmetros do comportamento natural do sistema e propriedades como o módulo de elasticidade, condutividade térmica e etc. Em suma, são propriedades físicas que definem esse comportamento natural. Quanto à solução da parte particular das equações diferenciais, esses parâmetros podem ser expressos por forças externas, momentos, diferenças de temperatura e etc. Assim, esses dois tipos de parâmetros compõem as

matrizes que definem as equações diferenciais. Os parâmetros de comportamento do sistema representam, por exemplo, as matrizes de condutibilidade e rigidez, enquanto os parâmetros de distúrbio geram a matriz de carregamento.

Entretanto, existem muitos problemas de Engenharia em que não é possível obter a solução exata, se fazendo necessária a utilização de aproximações numéricas. Enquanto soluções exatas nos dão o comportamento exato do sistema em qualquer ponto, as aproximações numéricas apresentam o comportamento exato somente em pontos discretos, chamados “nós”. Assim, o primeiro passo de um procedimento numérico é a discretização. Esse processo divide o domínio de interesse em pequenos subdomínios e nós.

Atualmente, os métodos numéricos mais usados são o Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). Basicamente, pelas diferenças finitas, as equações diferenciais são escritas para cada nó através de diferenciações numéricas. Em oposição, o MEF usa a integral das equações diferenciais e as define em subdomínios resultantes da discretização do domínio, o que possibilita a sua aplicação em domínios irregulares [7]. Neste trabalho será utilizado o MEF.

A análise de peças e de sistemas mecânicos pelo MEF está cada vez mais comum nos projetos de Engenharia no meio industrial. O MEF oferece grandes vantagens computacionais para a análise de peças, pois discretiza a peça em elementos de domínio contínuo, o que facilita as operações matemáticas, agilizando todo o processo e gerando resultados com boa precisão, o que ajuda na análise e na criação de projetos.

### 3.2.1 MEF Piezelétrico

As diversas aplicações do MEF na Engenharia fazem necessária uma formulação que permita flexibilidade de modelo suficiente para qualquer geometria e que caracterize qualquer tipo de material piezelétrico. Assim se faz necessária toda uma formulação para analisar elementos piezelétricos,

sendo necessárias três equações principais: equilíbrio, elétrica e constitutiva [6],[8],[9].

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

$$\nabla \cdot \mathbf{T} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

Na qual  $\rho$  é a densidade do material e  $\nabla$ .é um operador dado por:

$$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

O  $\mathbf{u}$  é o vetor deslocamento, que também pode ser expresso em função dos eixos x, y e z:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

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

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0 \quad (3.11)$$

Na qual o  $\operatorname{div}(\ ) = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$  e  $\mathbf{D}$  já foi definido em 3.2. Essa expressão significa que as cargas elétricas no interior da cerâmica piezelétrica são nulas [10].

As equações constitutivas já foram definidas em 3.1 e 3.2.

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

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}_u^T \mathbf{U}_e \quad (3.12)$$

$$\Phi = \mathbf{N}_\Phi^T \Phi_e \quad (3.13)$$

Na qual  $\mathbf{N}_u$  é o vetor da função de forma do deslocamento,  $\mathbf{N}_\Phi$  é o vetor da função de forma do potencial elétrico e ambos são funções

interpoladoras de Lagrange para elementos isoparamétricos de quatro nós (como pode ser visto mais a fundo na referência [7]) que é o elemento utilizado neste trabalho.  $\mathbf{U}_e$  é o vetor de deslocamento nodal para um elemento e  $\Phi_e$  é o vetor de potencial elétrico nodal para um elemento e podem ser descritos como:

$$\mathbf{U}_e = \begin{Bmatrix} U_{x1} \\ U_{y1} \\ U_{x2} \\ U_{y2} \\ \vdots \\ U_{xi} \\ U_{yi} \end{Bmatrix}; \quad \Phi_e = \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_i \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

Na qual i é o número de nós de cada elemento.

Antes de se analisar a solução das equações é necessário conhecer algumas relações entre seus componentes. O vetor deformação mecânica  $\mathbf{S}$  pode ser relacionado com os deslocamentos nodais  $\mathbf{u}$ , através da matriz deformação-deslocamento  $\mathbf{B}_u$ . Similarmente, o campo elétrico  $\mathbf{E}$  pode ser relacionado com o potencial elétrico de cada nó  $\Phi$ , através da matriz campo elétrico-deslocamento  $\mathbf{B}_\Phi$  como abaixo:

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}_u \mathbf{u} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{B}_\Phi \Phi \quad (3.16)$$

Nas quais as matrizes  $\mathbf{B}_u$  e  $\mathbf{B}_\Phi$  são descritas como:

$$\mathbf{B}_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{B}_\Phi = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Aplicando-se a formulação do MEF nas equações acima, obtém-se a equação resultante para cada elemento que pode ser escrita em termos do deslocamento  $\mathbf{U}$  e do potencial elétrico  $\Phi$  para cada nó, sendo que os esforços mecânicos são expressos em termos de  $\mathbf{F}$  e as cargas elétricas em termos de  $\mathbf{Q}$ , resultando nas equações abaixo:

$$\mathbf{M}_{uu}^e \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_{uu}^e \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{uu}^e \mathbf{U} + \mathbf{K}_{u\Phi}^e \Phi = \mathbf{F}_{ext}^e + \mathbf{F}_{int}^e \quad (3.19)$$

$$\mathbf{K}_{u\Phi}^{e T} \mathbf{U} + \mathbf{K}_{\Phi\Phi}^e \Phi = \mathbf{Q}_{ext}^e + \mathbf{Q}_{int}^e \quad (3.20)$$

Essa mesma expressão pode ser expressa também na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu}^e & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}}^e \\ \ddot{\Phi}^e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{uu}^e & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}^e \\ \dot{\Phi}^e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu}^e & \mathbf{K}_{u\Phi}^e \\ \mathbf{K}_{u\Phi}^{e T} & \mathbf{K}_{\Phi\Phi}^e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}^e \\ \Phi^e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{ext}^e \\ \mathbf{Q}_{ext}^e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{int}^e \\ \mathbf{Q}_{int}^e \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

Na qual temos:

Matriz de rigidez mecânica:

$$\mathbf{K}_{uu}^e = \iiint_{\Omega_e} \mathbf{B}_u^T \mathbf{c} \mathbf{B}_u dV \quad (3.22)$$

**Matriz de acoplamento piezelétrico:**

$$\mathbf{K}_{u\Phi}^e = \iiint_{\Omega_e} \mathbf{B}_u^T \mathbf{e} \mathbf{B}_\Phi dV \quad (3.23)$$

**Matriz de rigidez dielétrica:**

$$\mathbf{K}_{\Phi\Phi}^e = \iiint_{\Omega_e} \mathbf{B}_\Phi^T \boldsymbol{\epsilon} \mathbf{B}_\Phi dV \quad (3.24)$$

**Matriz de massa:**

$$\mathbf{M}_{uu}^e = \rho \cdot \iiint_{\Omega_e} \mathbf{N}_u^T \mathbf{N}_u dV \quad (3.25)$$

Para o sistema global as equações 3.19 e 3.20 ficam:

$$\mathbf{M}_{uu} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_{uu} \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{uu} \mathbf{U} + \mathbf{K}_{u\Phi} \Phi = \mathbf{F} \quad (3.26)$$

$$\mathbf{K}_{u\Phi}^T \mathbf{U} + \mathbf{K}_{\Phi\Phi} \Phi = \mathbf{Q} \quad (3.27)$$

Dessa forma, as equações 3.26 e 3.27 são as equações finais que são utilizadas para a simulação de dispositivos piezelétricos pelo MEF.

### 3.2.1.1 Análise Estática

Para a análise estática, efeitos iniciais e de amortecimento são ignorados com exceção de efeitos como a gravidade. Nesse caso, as eq. 3.26 e 3.27 se reduzem à:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\Phi} \\ \mathbf{K}_{u\Phi}^T & \mathbf{K}_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

A solução da eq. 3.28 fornece os deslocamentos e os potenciais em todos os nós [8].

### 3.2.1.2 Análise Harmônica

As cerâmicas piezelétricas dos atuadores são excitadas com ondas de tensão elétricas senoidais (harmônicas), o que faz necessário o uso da análise harmônica para obtenção dos resultados. A análise harmônica permite a investigação da estrutura piezelétrica sob a influência de força, cargas elétricas, deslocamentos e/ou voltagens harmônicas.

As forças e cargas elétricas podem ser expressas da seguinte forma, para o caso sem amortecimento:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{Fe}^{j\omega t}; \quad \mathbf{Q}(t) = \mathbf{Qe}^{j\omega t} \quad (3.29)$$

Dessa forma, os deslocamentos e o potencial elétrico, sem amortecimento, são dados por:

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{Ue}^{j\omega t}; \quad \Phi(t) = \Phi e^{j\omega t} \quad (3.30)$$

Na qual  $\omega$  é a freqüência de excitação.

A carga elétrica é relacionada com a corrente elétrica no eletrodo através de:

$$\mathbf{I}(t) = \frac{d\mathbf{Q}(t)}{dt} \quad (3.31)$$

$$\mathbf{Q}(t) = \frac{\mathbf{I}}{j\omega} e^{j\omega t} \quad (3.32)$$

Através da análise harmônica é possível determinar a resposta em freqüência do material piezelétrico. Essas respostas em freqüência podem ser, por exemplo, o deslocamento, admitância e impedância elétrica [8]. Para este trabalho será utilizada a impedância elétrica dada por:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = \frac{V_0}{j\omega Q_0} \quad (3.33)$$

Na qual  $\mathbf{V}$  é a diferença de potencial elétrico e  $V_0$  sua amplitude,  $\mathbf{Z}$  é a impedância elétrica e  $Q_0$  é a amplitude da carga elétrica.

Vale lembrar que esses valores de  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\Phi$ ,  $\mathbf{Q}$  apresentam números reais quando não há amortecimento e, números complexos quando há amortecimento no sistema, o que significa a adição de um deslocamento de fase.

Substituindo as eq. 3.29 e 3.30 nas equações de equilíbrio piezelétricas 3.26 e 3.27, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} + j\omega \mathbf{C}_{uu} - \omega^2 \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{U}} \\ \hat{\Phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{F}} \\ \frac{1}{j\omega} \hat{\mathbf{I}} \end{Bmatrix} \quad (3.34)$$

Sendo que  $\wedge$  representa matrizes complexas.

### **3.3 Métodos de Fabricação**

Neste trabalho foram feitas simulações para o nanoposicionador XY em dois tamanhos distintos: 60 mm e 25 mm. No protótipo de maior tamanho o menor detalhe tinha a dimensão de 0,5 mm, exigindo um processo de fabricação que permitisse tal precisão. Para este foi selecionado o processo de eletroerosão a fio. No menor protótipo a menor dimensão tinha 0,21 mm, sendo necessária a mudança do processo de fabricação para a fotofabricação.

#### **3.3.1 Eletroerosão a Fio**

Este é um dos processos não tradicionais de usinagem que vêm ganhando espaço ultimamente. Várias razões explicam esse crescimento, como novos materiais que têm surgido, como os carbonetos metálicos, as superligas e as cerâmicas. Trata-se, geralmente, de materiais muito duros e formas complexas, na qual a dificuldade de usinagem no processo tradicional seria grande.

Outro aspecto é a automatização das máquinas de eletroerosão, que permite a obtenção de estreitos limites de tolerância. O corte a fio é programado por computador, que permite o corte de perfis complexos e com exatidão.

Em alguns equipamentos, um ploter, isto é, um traçador gráfico, possibilita a conferência da execução do programa pela máquina. No processo de eletroerosão, é possível um controle rigoroso da ação da ferramenta sobre a peça usinada, graças a um servomecanismo que reage rapidamente às pequenas variações de intensidade de corrente.

Tudo isso torna a eletroerosão um processo adequado para atender às exigências atuais de qualidade e produtividade, com grande aplicação na confecção de placas de guia, porta-puncões e matrizes (ferramentas de

corte, dobra e repuxo), ferramentas de metal duro e componentes eletrônicos.

O processo de eletroerosão é um método de usinagem que envolve descargas elétricas entre um anôdo (feito de cobre, latão ou tungstênio) e um catodo (correspondendo à peça usinada), imersos em água deionizada que funciona como dielétrico (Figura 7 a). O fio de corte é aproximado da peça a ser usinada e água deionizada é utilizada como meio para a aplicação de uma corrente entre peça e o fio. A descarga elétrica forma um arco entre a menor distância da peça e eletrodo, aquecendo os dois localmente (a temperatura na região da centelha possa variar entre 2.500°C e 50.000°C) e fazendo com que derretam (Figura 7 b). Ao mesmo tempo a água que jorra ao redor do eletrodo é aquecida e transformada em vapor rapidamente, essa rápida expansão do vapor de água gera uma explosão no local (Figura 7 c). A pressão da explosão transforma o metal derretido em finas partículas que são carregadas junto com parte da água que não vaporizou (Figura 7 d). O processo é contínuo gerando um sulco na peça que cresce gradualmente ao longo do deslocamento do fio que é alimentado continuamente (Figura 8), pois também está sendo erodido [11]. Com ajustes convenientes da máquina, é possível controlar a erosão, de modo que se obtenha até 99,5% de erosão na peça e 0,5% no eletrodo.

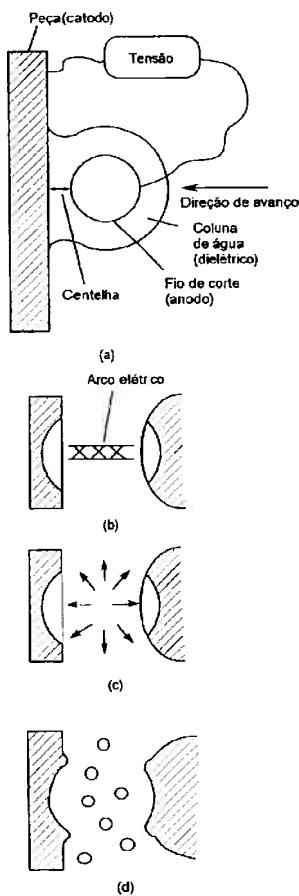


Figura 7 – Princípio de funcionamento da eletroerosão a fio.

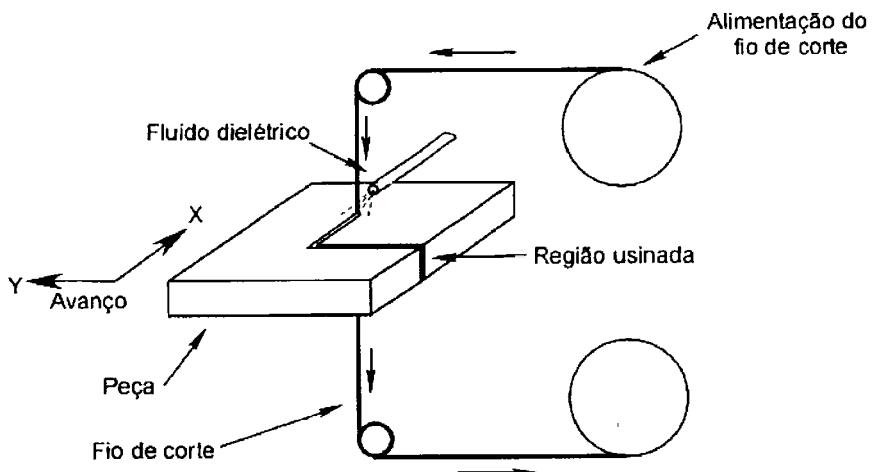


Figura 8 – Esquema de uma máquina de eletroerosão a fio.

A distância mínima entre a peça e a ferramenta, na qual é produzida a centelha, é chamada “GAP” (do inglês “gap” = folga) e depende da intensidade da corrente aplicada. O “GAP” é o comprimento da centelha.

### **3.3.2 Fotofabricação**

A fotofabricação ou usinagem química é uma técnica não tradicional de usinagem na qual a remoção do material se dá através do contato com um agente que promove o ataque químico do material (diversos tipos de ácidos, dependendo de qual material vai ser atacado). O processo consiste em diversas etapas. Diferenças na aplicação e como cada etapa é implementada geram diferentes métodos de usinagem química. As principais etapas são:

1. Limpeza: limpeza do material para garantir que a remoção do material será uniforme.
2. “Masking”: uma camada protetora é aplicada (máscara) em algumas partes da superfície. Esta máscara é feita de um material resistente ao agente que promove o ataque químico sendo, portanto as áreas na qual não ocorrerá a remoção do material.
3. “Etching”: esta é a etapa de remoção do material. A peça é imersa no agente que promove o ataque químico e as partes não protegidas pela máscara são atacadas. O método de ataque mais comum é a conversão do material de trabalho (por exemplo um metal) em um sal que se dissolva no agente químico e seja removido da superfície. Quando a quantidade de material desejada é removida, a peça é retirada, lavada e o processo corrosivo pára.
4. “Demasking”: a máscara é removida da peça.

As duas etapas que apresentam variações significantes nos métodos, materiais e parâmetros do processo são as etapas de “masking” e “etching”. Neste trabalho foi utilizado o processo de fotofabricação na etapa de “masking”. Neste processo (Figura 9) técnicas fotográficas são utilizadas para a aplicação da máscara (fotolito). O material de que ela é feita é fotossensível. A máscara é aplicada na peça e é exposta a luz através de um negativo da imagem das áreas a serem removidas. Estas áreas podem ser então removidas da superfície utilizando técnicas de revelação

fotográficas. Este procedimento deixa as partes desejadas protegidas pelo fotolito e as demais áreas não protegidas, vulneráveis à ação do agente que promove o ataque químico. A fotofabricação é utilizada para aplicações na qual partes pequenas são produzidas em alta quantidade e tolerância [12].

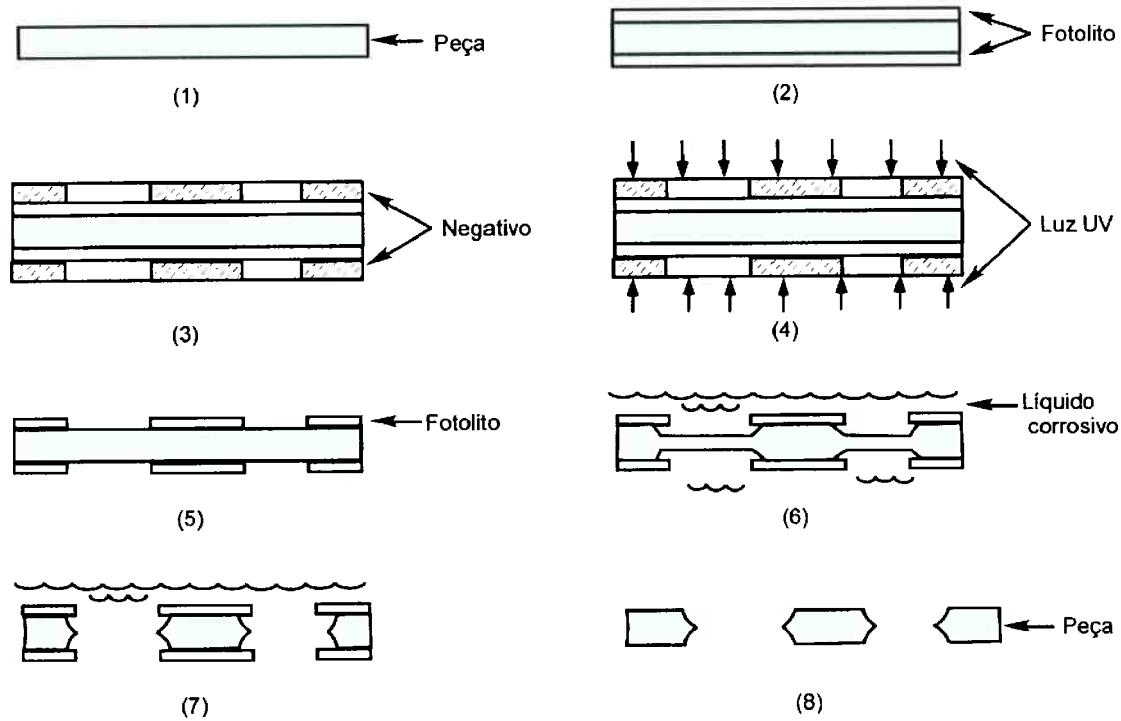


Figura 9 – Processo de fotofabricação.

#### 4 Descrição do Nanoposicionador Implementado

O nanoposicionador estudado neste trabalho teve como inspiração a geometria de um outro nanoposicionador descrito na literatura [3]. O modelo proposto neste trabalho executa os movimentos de translação e rotação, acionados por quatro cerâmicas piezelétricas. O deslocamento do nanoposicionador se dá com base nos princípios de amplificação mecânica e efeito piezelétrico. A amplificação mecânica é proporcionada por um projeto que utiliza mecanismos flexíveis, nos quais o movimento é baseado na deformação elástica do material, assim atrito e desgaste são descartados e o projeto exibe alta rigidez, capacidade de carga, resistência a choques e

vibração e movimentos com boa precisão. A descrição do princípio de funcionamento é apresentada a seguir, com base na Figura 10.

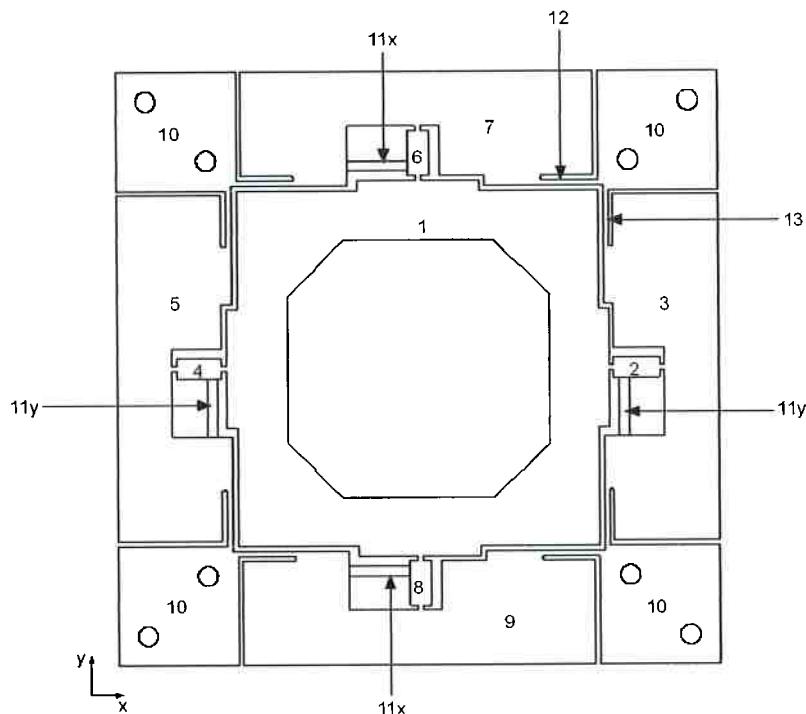


Figura 10 – Modelo do nanoposicionador.

O nanoposicionador mostrado na Figura 10 é constituído por: a plataforma de translação e rotação 1, as plataformas auxiliares 3, 5, 7 e 9, as cerâmicas piezelétricas 11, as vigas de amplificação 2, 4, 6 e 8, e as abas de fixação 10. O nanoposicionador é fixado sobre uma base pelas abas 10, limitando os movimentos em x, y e z. Quando as cerâmicas piezelétricas 11y são submetidas a uma voltagem elas se expandem resultando numa força que empurra as vigas de amplificação 2 e 4. Neste caso as cerâmicas piezelétricas 11x não estão sendo excitadas e funcionam apenas como elemento estrutural. A plataforma 1 e as plataformas auxiliares 3 e 5 são sustentadas por quatro vigas flexíveis 13. As forças de expansão produzidas pelas cerâmicas piezelétricas 11y são altas o suficiente para deformar as vigas e causar o movimento de translação na direção de Y. A rigidez longitudinal de cada viga é significativamente maior do que a rigidez transversal, assim as plataformas auxiliares 7 e 9 se movem junto com a

plataforma 1. As vigas de amplificação 2 e 4 servem para amplificar o deslocamento gerado pelas cerâmicas piezelétricas 11y. O movimento em X é idêntico ao descrito anteriormente, mas acionado pelas cerâmicas 11x (Figura 12). O movimento de rotação é causado pela aplicação de tensões elétricas com fase opostas nas cerâmicas, de modo a causar a expansão de algumas e a contração de outras (Figura 12) dependendo de como se quer rotacionar a plataforma 1.

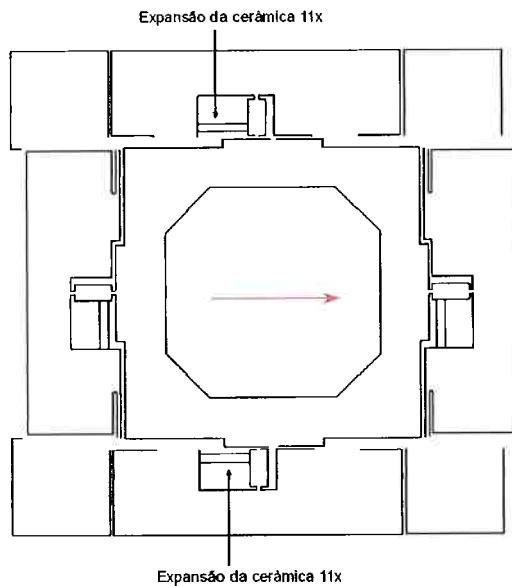


Figura 11 – Esquema do movimento de translação.

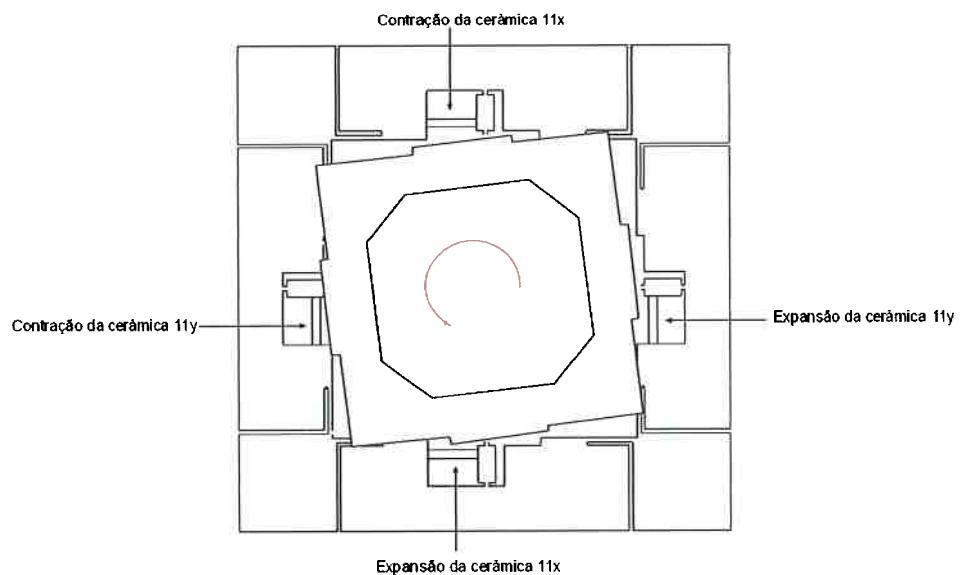


Figura 12 – Esquema do movimento de rotação.

## **5 MODELAGEM COMPUTACIONAL**

### **5.1 Modelagem e simulação no ANSYS**

A utilização do método de elementos finitos é justificada em situações nas quais a solução analítica de um dado problema é demasiadamente complexa ou mesmo quando não há uma formulação analítica disponível.

Uma formulação analítica do problema do nanoposicionador seria demasiadamente complexa, inviabilizando a sua solução e exigindo a adoção de restrições e hipóteses que acabariam por comprometer os resultados. Além disso, um item importante refere-se à caracterização do equipamento, feita de maneira bem mais simples através de simulação computacional, havendo assim, uma diminuição do número de protótipos a serem construídos e ensaiados, além da possibilidade de determinação de parâmetros ótimos de funcionamento e curvas de resposta.

Um exemplo bastante prático da utilização de simulações é a análise de sensibilidade. Para mapear o comportamento do sistema para um determinado parâmetro (geométrico, por exemplo) em 10 ou 20 pontos dentro de um domínio, basta alterar a variável desejada e rodar novamente a simulação. A situação análoga quando se pensa na construção de protótipos seria a construção de 10 ou 20 protótipos, o que de imediato é inviável.

Neste trabalho o MEF é utilizado como ferramenta para a simulação e análise do problema do nanoposicionador.

As etapas de uma simulação utilizando MEF consistem em:

- **pré-processamento:** consiste na definição das geometrias e das propriedades dos materiais, bem como a criação da malha de elementos finitos que será utilizada no processo de cálculo.

Primeiramente definimos as posições dos nós e posteriormente, as linhas e áreas correspondentes. Em seguida são definidas as propriedades dos materiais:

- Para o alumínio:

$$E \text{ (módulo de elasticidade)} = 6,895e^{10} N / m^2$$

$$\rho \text{ (densidade)} = 2700 Kg / m^3$$

$$\nu \text{ (coeficiente de Poisson)} = 0,35$$

Limite de escoamento = 12,7 MPa

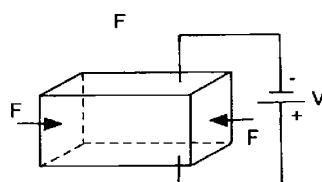
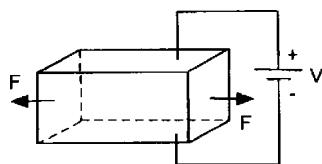
- Para a cerâmica piezelétrica classe 5A simetria de 6 mm:

$$\rho \text{ (densidade)} = 7650 Kg / m^3$$

$$\text{Permissividade: } \begin{bmatrix} 8,1066 & 0 & 0 \\ 0 & 7,3455 & 0 \\ 0 & 0 & 8,1066 \end{bmatrix} 10^{-9} F / m$$

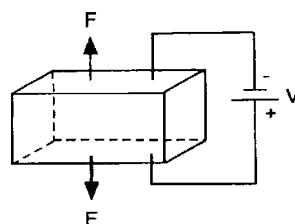
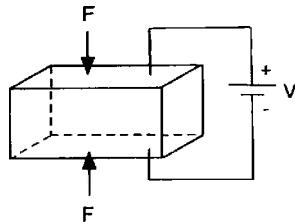
Limite de escoamento = 100 Mpa

Rigidez Elástica para a cerâmica na horizontal:



$$\begin{bmatrix} 12,5 & 7,52 & 7,54 & 0 & 0 & 0 \\ 7,52 & 11,1 & 7,52 & 0 & 0 & 0 \\ 7,54 & 7,52 & 12,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,26 \end{bmatrix} 10^{10} N / m^2$$

Rigidez Elástica para a cerâmica na vertical:



$$\begin{bmatrix} 11,1 & 7,52 & 7,52 & 0 & 0 & 0 \\ 7,52 & 12,5 & 7,54 & 0 & 0 & 0 \\ 7,52 & 7,54 & 12,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,11 \end{bmatrix} 10^{10} N/m^2$$

Constantes piezelétricas para a cerâmica na horizontal:

$$\begin{bmatrix} 0 & -5,4 & 0 \\ 0 & 15,8 & 0 \\ 0 & -5,4 & 0 \\ 12,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12,3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C/m^2$$

Constantes piezelétricas para a cerâmica na vertical:

$$\begin{bmatrix} 15,8 & 0 & 0 \\ -5,4 & 0 & 0 \\ -5,4 & 0 & 0 \\ 0 & 12,3 & 0 \\ 0 & 12,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C/m^2$$

O próximo passo é a geração da malha de elementos finitos que será utilizada para a simulação. Deve-se ressaltar a importância da discretização da malha, uma vez que uma malha pouco refinada nos dá um resultado pouco preciso, ao passo que uma malha demasiadamente refinada elevará o custo computacional da simulação. Neste trabalho foi preciso ter uma discretização alta, pois muitas partes do desenho envolviam dimensões muito pequenas da ordem de 0,5 mm.

Após a definição da geometria do modelo e a geração da malha de elementos, devemos definir as condições de contorno para o problema, ou seja, as condições das quais temos um conhecimento prévio e que servem de ponto de partida para a solução do problema. Para cada modelo a ser analisado é necessário definir as condições de contorno para as partes que serão consideradas engastadas (deslocamento em X e Y nulos), bem como as condições de contorno que representam o comportamento das cerâmicas piezelétricas (aplicação de tensão e acoplamento dos graus de liberdade elétricos nulos).

Tendo definido as condições de contorno, um dos passos finais antes de realizar a simulação propriamente dita é a definição das propriedades dos elementos utilizados para a simulação, no caso, o PLANE13 e PLANE42. Para o PLANE13 que simula o elemento piezelétrico, os graus de liberdade utilizados foram os deslocamentos em X, Y, voltagem e para o caso de estado plano de tensões mecânicas (EPTM). Para o PLANE42 que simula o metal os graus de liberdade utilizados foram os deslocamentos em X, Y e para o caso de estado plano de tensões mecânicas (EPTM).

- **solução:** tendo definida toda a geometria, a malha, as condições de contorno, propriedades do elemento e demais configurações necessárias, faz-se a simulação propriamente dita que envolve também toda a parte de cálculo numérico para obtenção dos resultados.

- **pós-processamento:** após a conclusão da simulação, dá-se início à etapa de pós-processamento. Nesta etapa os resultados obtidos podem ser visualizados através de gráficos, tabelas ou outro meio apropriado.

## 6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

### 6.1 Modelo I

Para este modelo foram feitas simulações das cerâmicas sendo atuadas em fase, com aplicação de tensão de modo a gerar um movimento de rotação, somente com as cerâmicas em X sendo atuadas e somente com as cerâmicas em Y sendo atuadas.

Foi feita também a análise harmônica para encontrar os modos de vibrar do modelo. A Figura 13 serve como referência para saber quais cerâmicas estão sendo atuadas para cada configuração e também para indicar o ponto de referência. O ponto de referência (PR) foi escolhido de modo a coincidir com o ponto que terá seus deslocamentos medidos por interferometria a laser, para que os resultados computacionais possam ser comparados com os experimentais posteriormente.

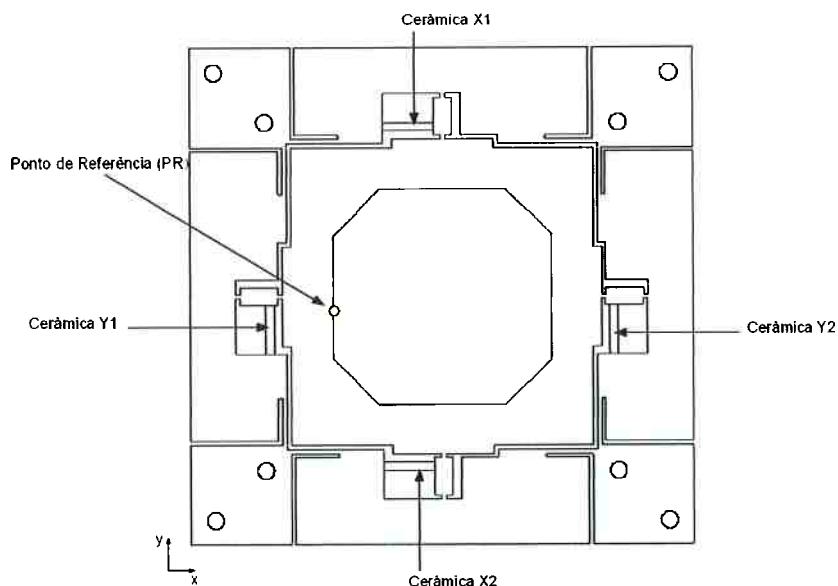


Figura 13 – Identificação das cerâmicas.

Este modelo foi simulado com as propriedades do alumínio (listadas na seção 5.1) e possui dimensões de 60 x 60 mm. Para maiores detalhes quanto à geometria, o desenho técnico do modelo I encontra-se no Anexo A.

### 6.1.1 Configuração 1: todas as cerâmicas sendo atuadas em fase

Nesta configuração os deslocamentos em X e Y das partes engastadas foram considerados zero e todas as cerâmicas piezelétricas foram excitadas em fase com uma tensão constante de 100 V.

Fazendo uma análise estática deste modelo chegamos aos seguintes deslocamentos:

Deslocamento máximo em X	0,144 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo em Y	0,144 $\mu\text{m}$
Módulo máximo dos deslocamentos XY	0,160 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo do PR em X	0,102 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo do PR em Y	0,103 $\mu\text{m}$

Os deslocamentos totais em XY podem ser visualizados na Figura 14 (foi escolhido um modo de exibição de resultados no ANSYS que gera a imagem dos deslocamentos de modo exagerado devido à ordem de grandeza dos mesmos, do contrário não conseguíramos enxergá-los).

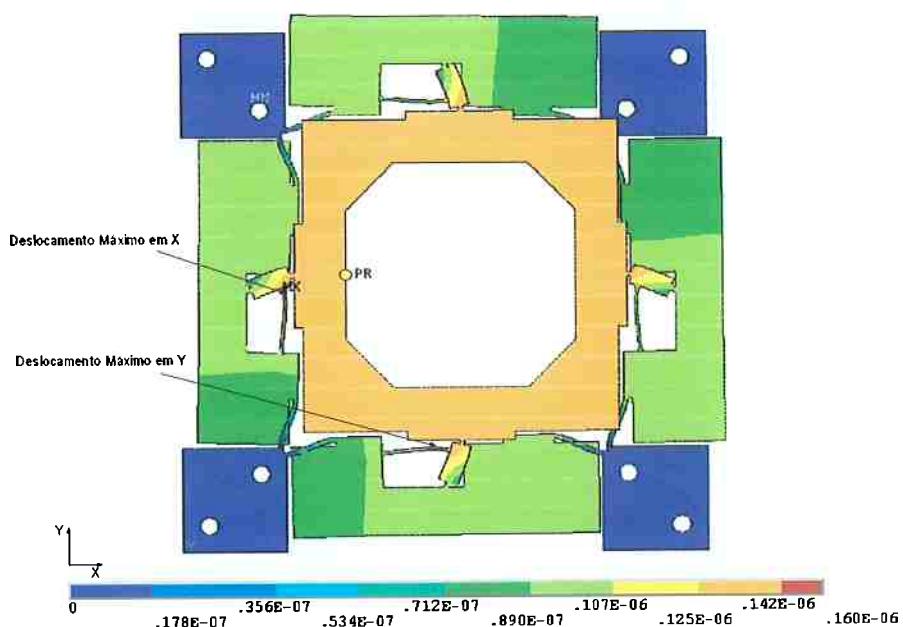


Figura 14 – Deslocamentos totais (m) em XY para as todas as cerâmicas excitadas em fase.

Na Figura 15 pode-se observar a distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas piezelétricas (neste caso o modo de visualização do resultado está em escala, por isso não é possível ver as cerâmicas se expandindo) e na Figura 16 a distribuição da tensão de Von Mises.

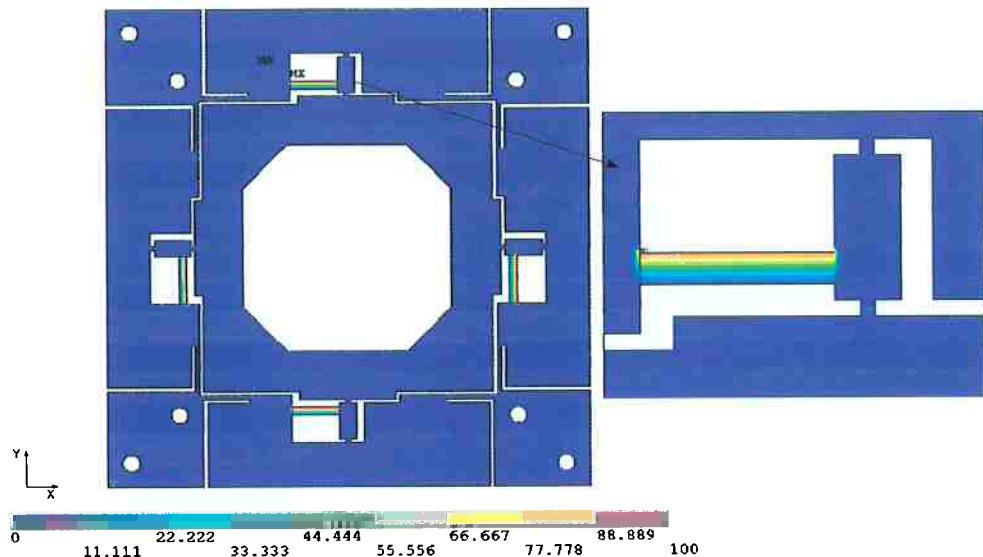


Figura 15 – Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas piezelétricas excitadas em fase.

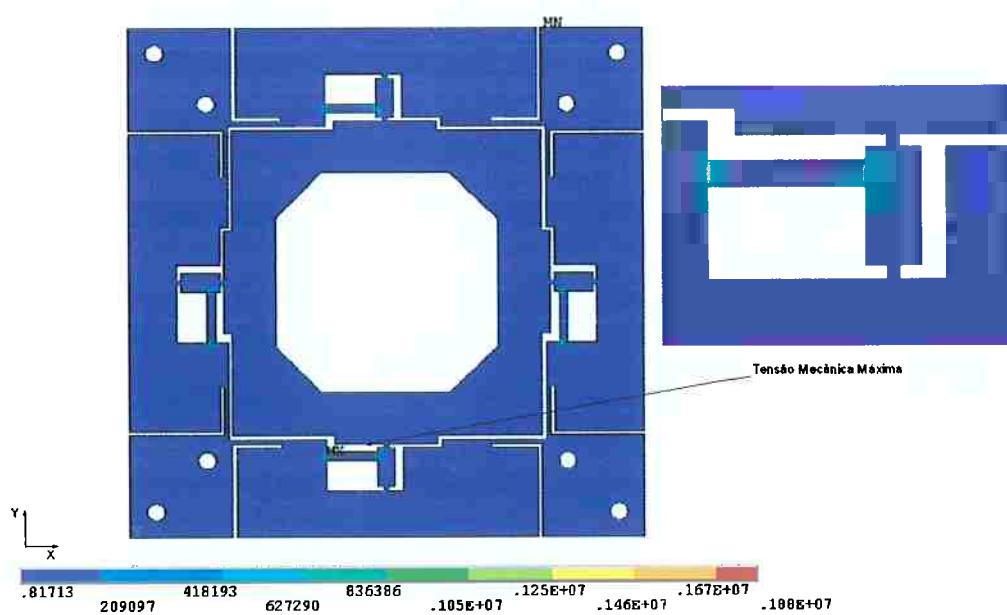


Figura 16 – Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas excitadas em fase.

### 6.1.2 Configuração 2: as cerâmicas em X e Y sendo atuadas para um movimento de rotação

Nesta configuração os deslocamentos em X e Y das partes engastadas foram considerados zero, as cerâmicas X1 e Y1 foram polarizadas negativamente e as cerâmicas X2 e Y2 foram polarizadas positivamente, todas com uma tensão constante de 100 V.

Fazendo uma análise estática deste modelo chegamos aos seguintes deslocamentos:

Deslocamento máximo em X	0,105 µm
Deslocamento máximo em Y	0,105 µm
Módulo máximo dos deslocamentos XY	0,142 µm
Deslocamento máximo do PR em X	- 0,165 nm
Deslocamento máximo do PR em Y	- 0,072 µm

Os deslocamentos totais em XY podem ser visualizados na Figura 17.

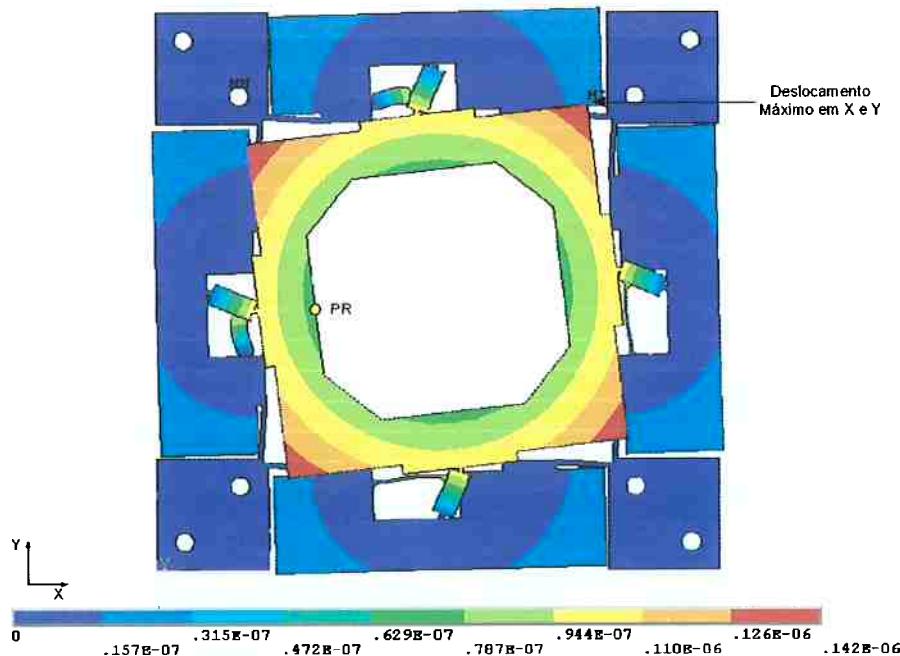


Figura 17 – Deslocamentos totais (m) em XY para o movimento de rotação.

Na Figura 18 pode-se observar a distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas piezelétricas e na Figura 19 a distribuição da tensão de Von Mises.

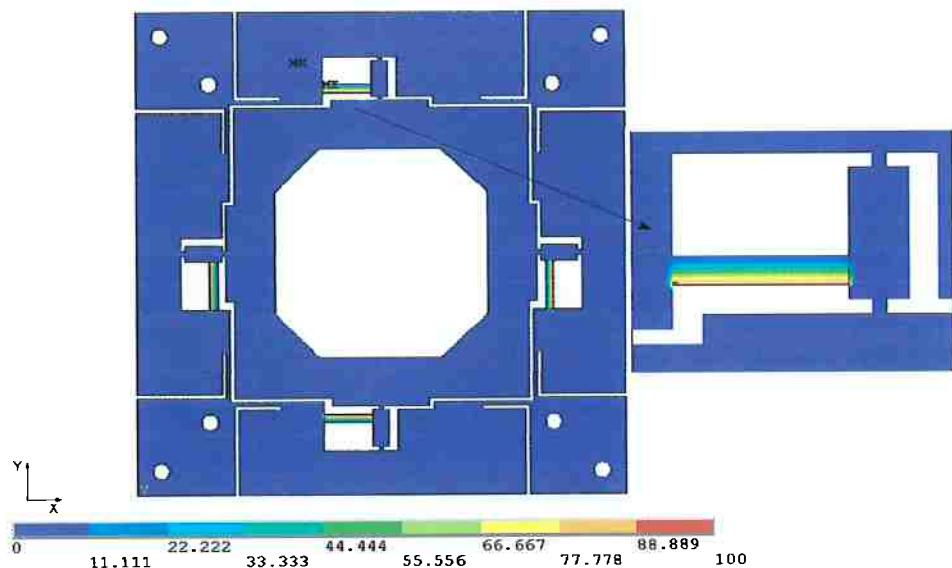


Figura 18 – Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas para o movimento de rotação.

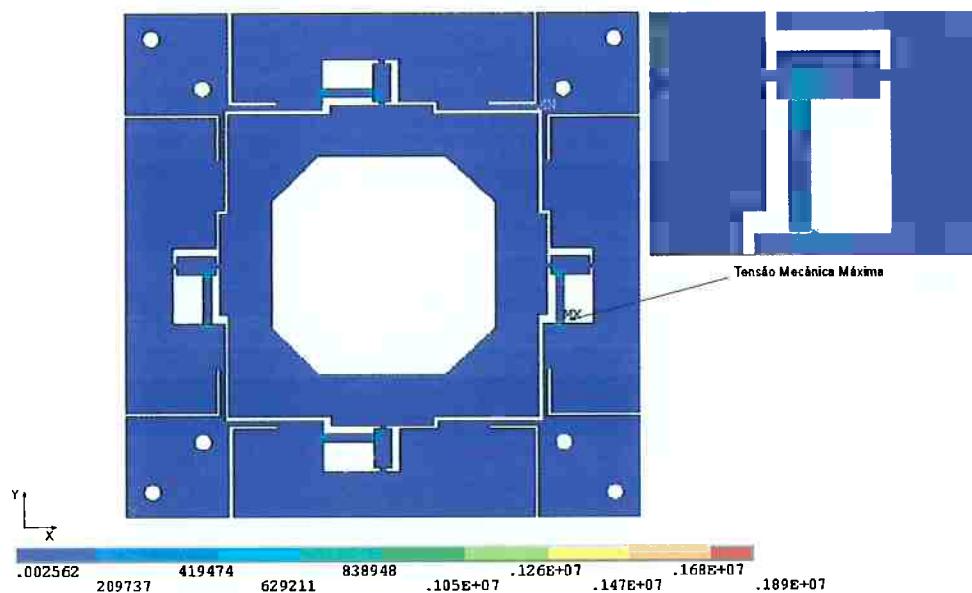


Figura 19 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento de rotação.

### 6.1.3 Configuração 3: somente as cerâmicas em X sendo atuadas

Nesta configuração os deslocamentos em X e Y das partes engastadas foram considerados zero, as cerâmicas piezelétricas X1 e X2 foram polarizadas positivamente com uma tensão constante de 100 V e as cerâmicas Y1 e Y2 tiveram seus graus de liberdade elétricos nulos acoplados.

Fazendo uma análise estática deste modelo chegamos aos seguintes deslocamentos:

Deslocamento máximo em X	0,104 µm
Deslocamento máximo em Y	0,043 µm
Módulo máximo dos deslocamentos XY	0,104 µm
Deslocamento máximo do PR em X	0,102 µm
Deslocamento máximo do PR em Y	- 0,252 nm

Os deslocamentos totais em XY podem ser visualizados na Figura 20.

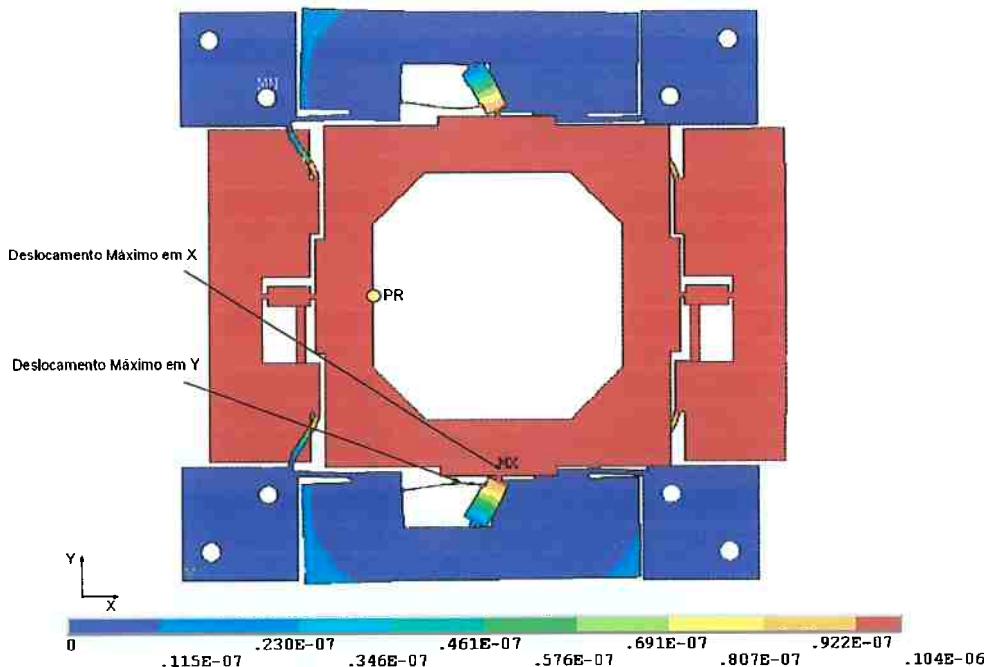


Figura 20 - Deslocamentos totais (m) em XY com as cerâmicas em X sendo atuadas.

Na Figura 21 pode-se observar a distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas piezelétricas e na Figura 22 a distribuição da tensão de Von Mises.

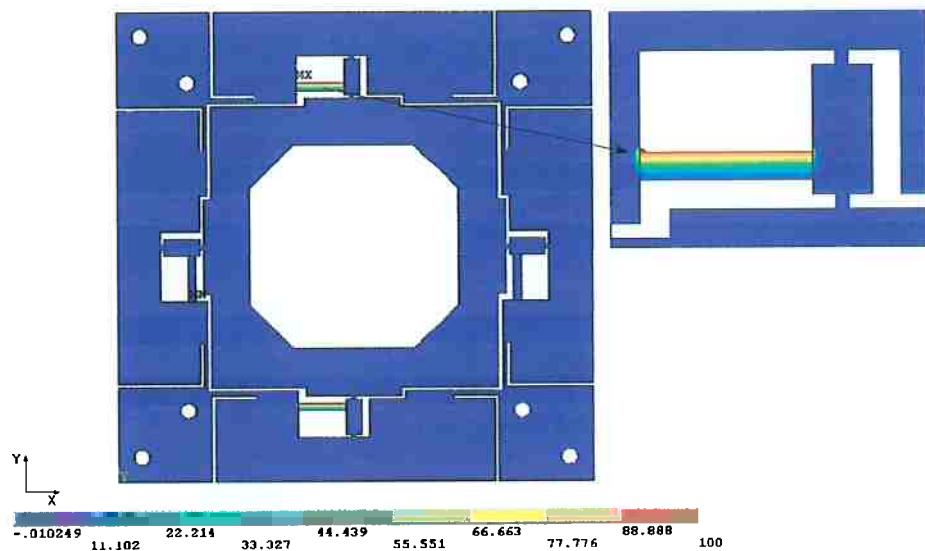


Figura 21 - Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas para o deslocamento em X.

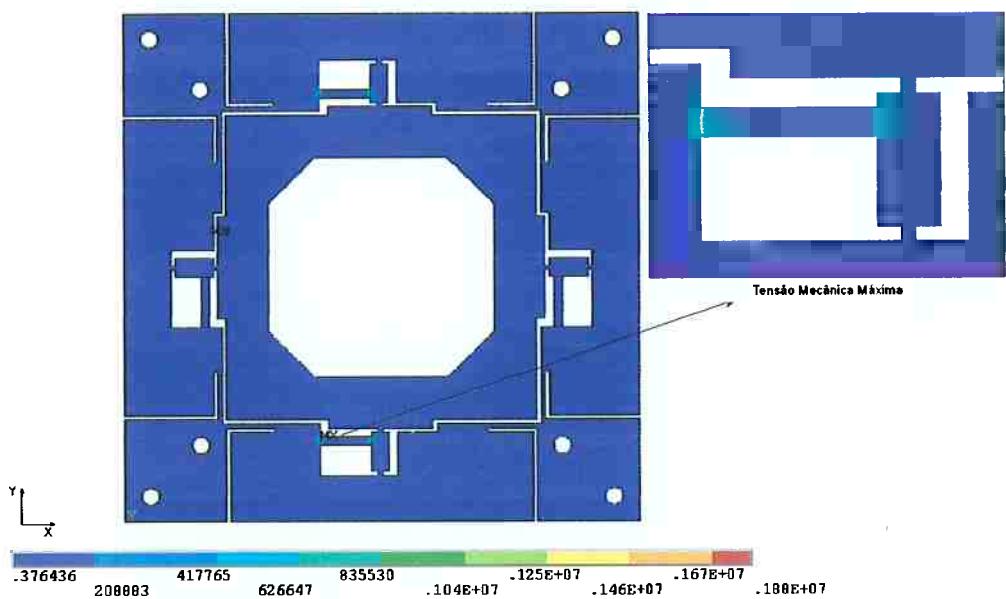


Figura 22 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento em X.

#### 6.1.4 Configuração 4: somente as cerâmicas em Y sendo atuadas

Nesta configuração os deslocamentos em X e Y das partes engastadas foram considerados zero, as cerâmicas piezelétricas Y1 e Y2 foram polarizadas positivamente com uma tensão constante de 100 V e as cerâmicas X1 e X2 tiveram seus graus de liberdade elétricos nulos acoplados.

Fazendo uma análise estática deste modelo chegamos aos seguintes deslocamentos:

Deslocamento máximo em X	0,043 µm
Deslocamento máximo em Y	0,104 µm
Módulo máximo dos deslocamentos XY	0,104 µm
Deslocamento máximo do PR em X	0,147 nm
Deslocamento máximo do PR em Y	0,104 µm

Os deslocamentos totais em XY podem ser visualizados na Figura 23.

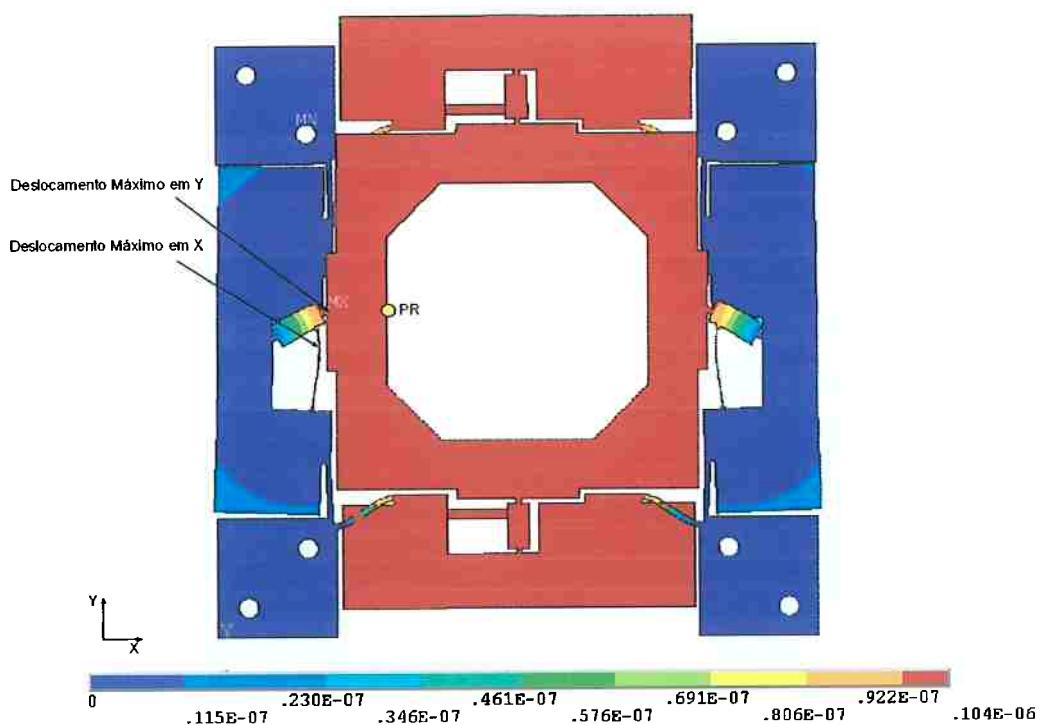


Figura 23 - Deslocamentos totais (m) em XY com as cerâmicas em Y sendo atuadas.

Na Figura 24 pode-se observar a distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas piezelétricas e na Figura 25 a distribuição da tensão de Von Mises.

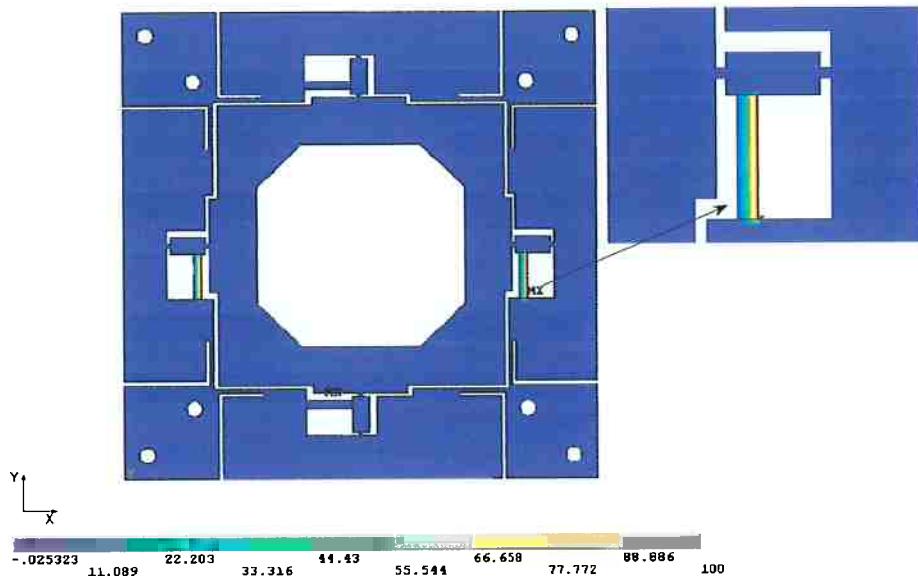


Figura 24 - Distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas para o deslocamento em Y.

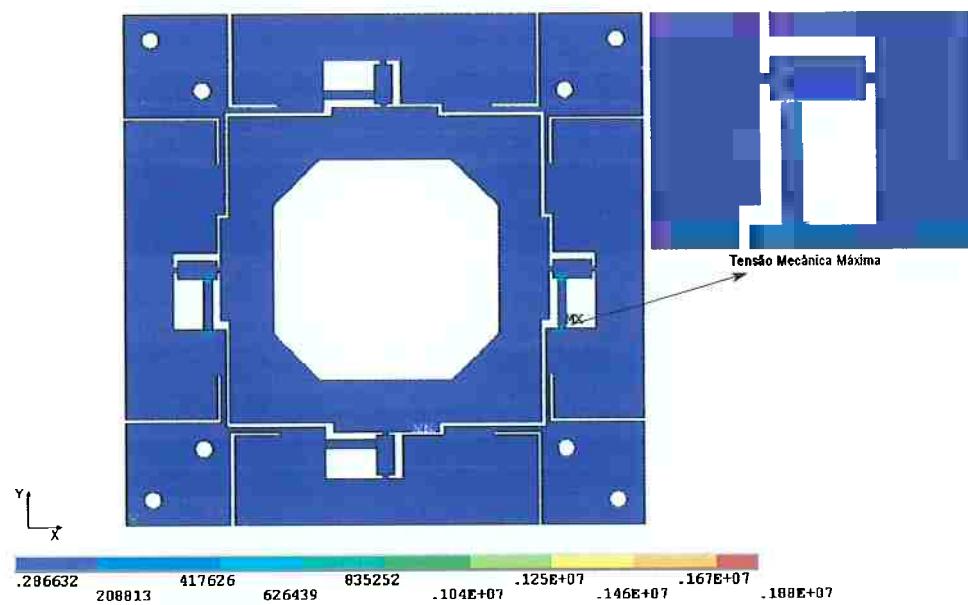


Figura 25 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento em Y.

Para as três configurações a tensão mecânica máxima não ultrapassou o limite de escoamento do alumínio de 12,7 Mpa e nem da cerâmica piezelétrica de 100 Mpa, como pode se observar na tabela abaixo:

Configuração	Tensão Mecânica Máxima (MPa)
1 - todas em fase	1,88
2 - rotação	1,89
3 – somente em X	1,88
4 – somente em Y	1,88

### 6.1.5 Análise Harmônica

Em uma etapa posterior deste trabalho, será feita a medição por interferometria a laser dos deslocamentos do ponto de referência (PR). Esta medição é feita em regime quasi-estático, numa freqüência de 60 Hz da rede, sendo necessário conhecer os primeiros modos de vibrar para evitar que a medição seja feita sobre algum modo perto da freqüência da rede. Para este projeto foi necessária a realização da análise harmônica em adição à análise modal, pois a ultima fornece muitos modos mecânicos de vibrar e os que nos interessam são os modos piezelétricos. Para o mesmo intervalo de 0 a 12 KHz da análise harmônica, sete frequências a mais são encontradas. A tabela abaixo mostra a comparação entre as duas análises:

	Modal (Hz)	Harmônica (Hz)
1	1.729,1	
2	1.731,1	
3	1.734,7	
4	1.767	
5	4.439,8	4.400
6	4.477,6	
7	5.356,6	
8	9.267,1	
9	9.899,7	9.900
10	1.1004	11.100

O resultado da análise harmônica fornecidos pelo ANSYS é em função da corrente elétrica, sendo necessário à conversão para impedância elétrica de acordo com as equações citadas no item 3.2.1.2, para se obter os modos piezelétricos de vibrar. O resultado da análise harmônica pode ser visto na Figura 26.

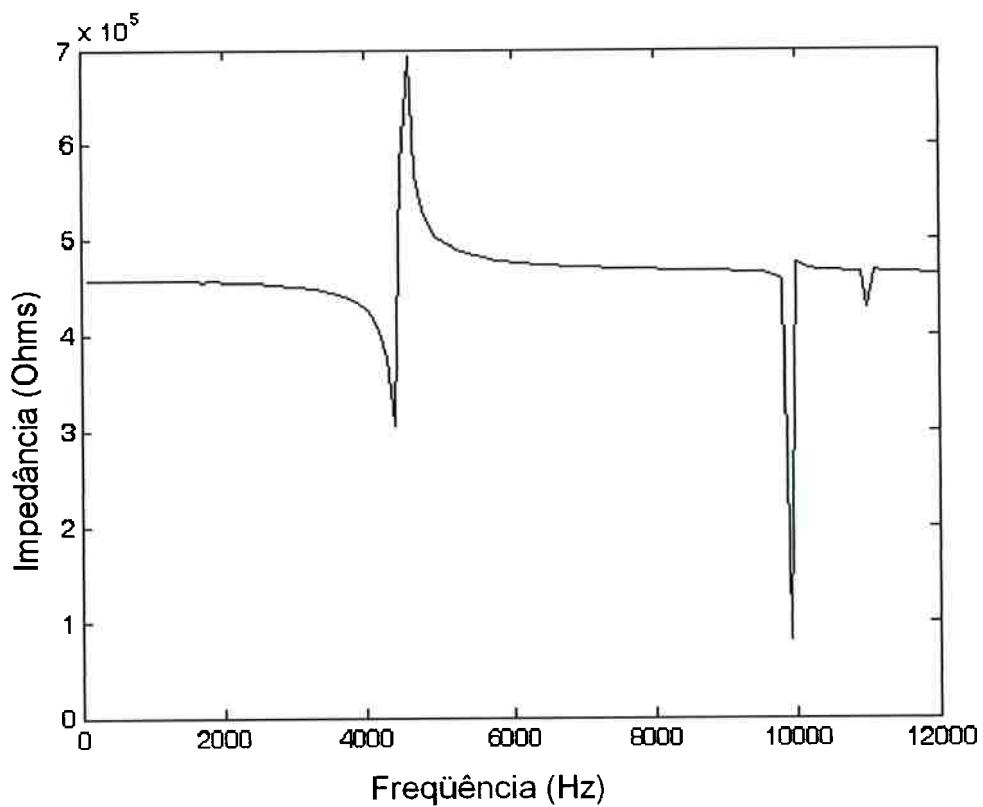


Figura 26 – Resultado da análise harmônica.

## 6.2 Modelo II

Para este modelo foram feitas as simulações para os mesmos casos do modelo I.

Foi feita também a análise harmônica para encontrar os modos de vibrar do modelo.

Este modelo foi simulado com as propriedades do Latão e possui dimensões de 25 x 25 mm. Para maiores detalhes quanto à geometria, o desenho técnico do modelo II encontra-se no Anexo B.

- Para o Latão:

$$E \text{ (módulo de elasticidade)} = 10,1e^{10} N / m^2$$

$$\rho \text{ (densidade)} = 8740 Kg / m^3$$

$$\nu \text{ (coeficiente de Poisson)} = 0,35$$

$$\text{Limite de escoamento} = 70 \text{ MPa}$$

### 6.2.1 Configuração 1: todas as cerâmicas sendo atuadas em fase

Nesta configuração os deslocamentos em X e Y das partes engastadas foram considerados zero e todas as cerâmicas piezelétricas foram excitadas em fase com uma tensão constante de 100 V.

Fazendo uma análise estática deste modelo chegamos aos seguintes deslocamentos:

Deslocamento máximo em X	0,146 µm
Deslocamento máximo em Y	0,146 µm
Módulo máximo dos deslocamentos XY	0,162 µm
Deslocamento máximo do PR em X	0,103 µm
Deslocamento máximo do PR em Y	0,104 µm

Os deslocamentos totais em XY podem ser visualizados na Figura 27.

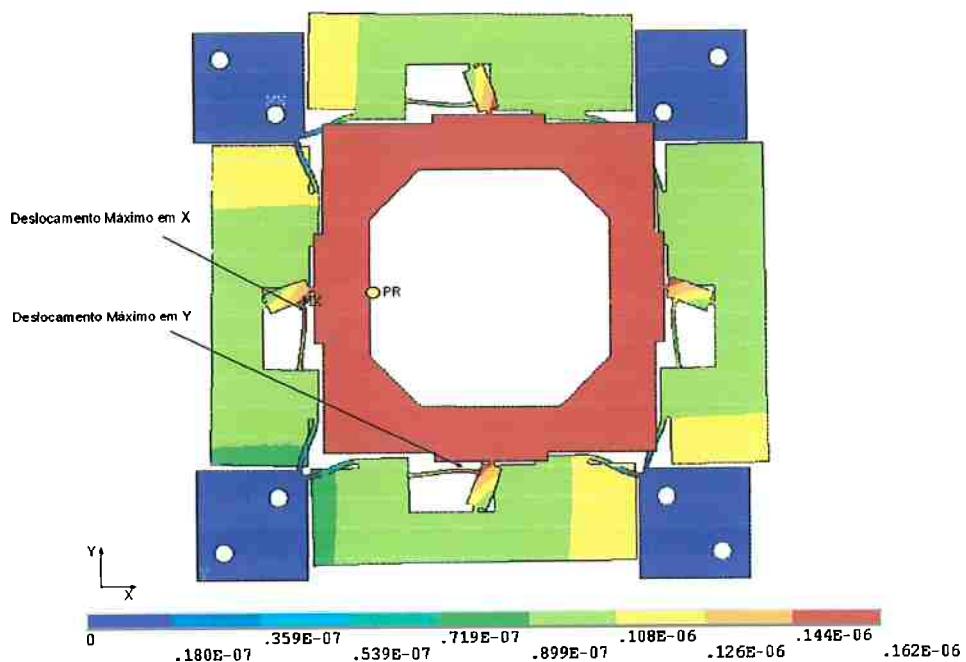


Figura 27 – Deslocamentos totais (m) em XY para as todas as cerâmicas excitadas em fase.

Na Figura 28 pode-se observar a distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas piezelétricas e na Figura 29 a distribuição da tensão de Von Mises.

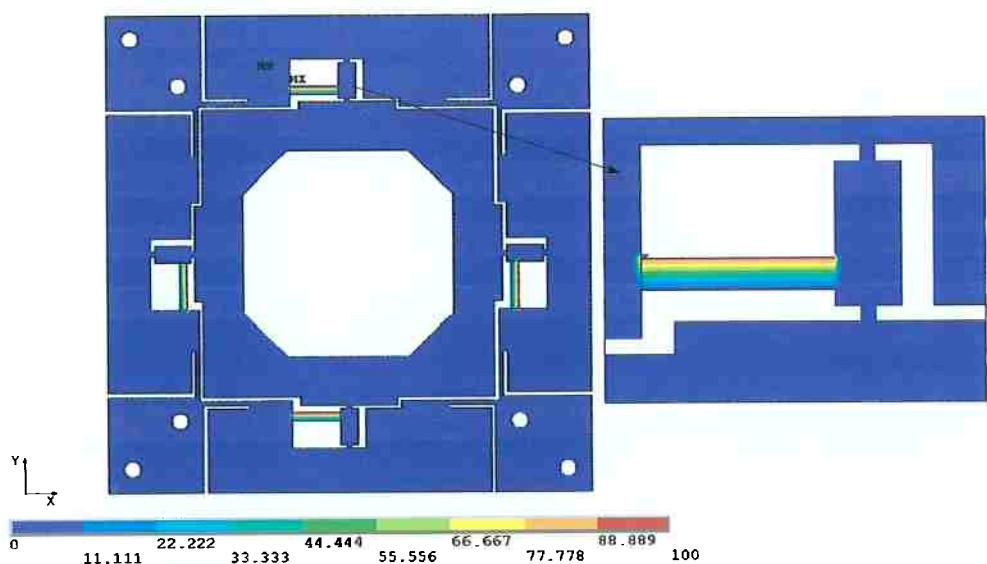


Figura 28 – Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas piezelétricas excitadas em fase.

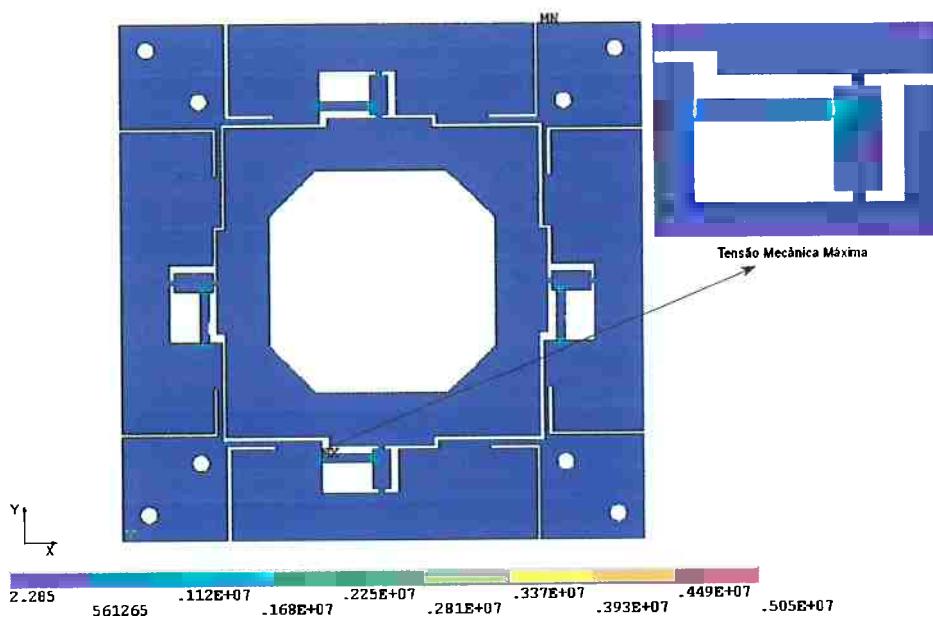


Figura 29 – Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas excitadas em fase.

### 6.2.2 Configuração 2: as cerâmicas em X e Y sendo atuadas para um movimento de rotação

Nesta configuração os deslocamentos em X e Y das partes engastadas foram considerados zero, as cerâmicas X1 e Y1 foram polarizadas negativamente e as cerâmicas X2 e Y2 foram polarizadas positivamente, todas com uma tensão constante de 100 V.

Fazendo uma análise estática deste modelo chegamos aos seguintes deslocamentos:

Deslocamento máximo em X	0,106 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo em Y	0,106 $\mu\text{m}$
Módulo máximo dos deslocamentos XY	0,143 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo do PR em X	- 0,153 nm
Deslocamento máximo do PR em Y	- 0,073 $\mu\text{m}$

Os deslocamentos totais em XY podem ser visualizados na Figura 30.

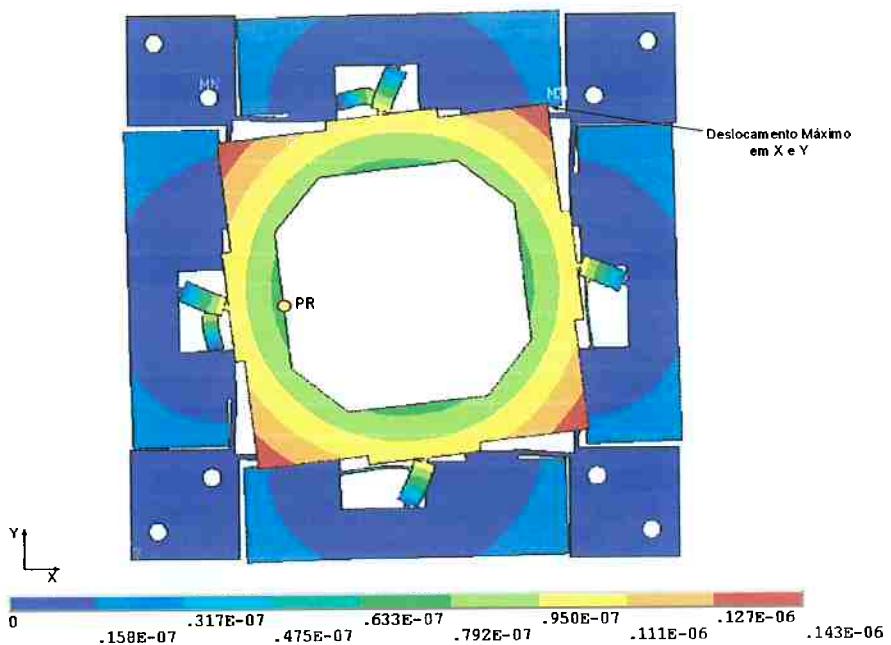


Figura 30 – Deslocamentos totais (m) em XY para o movimento de rotação.

Na Figura 31 pode-se observar a distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas piezelétricas e na Figura 32 a distribuição da tensão de Von Mises.

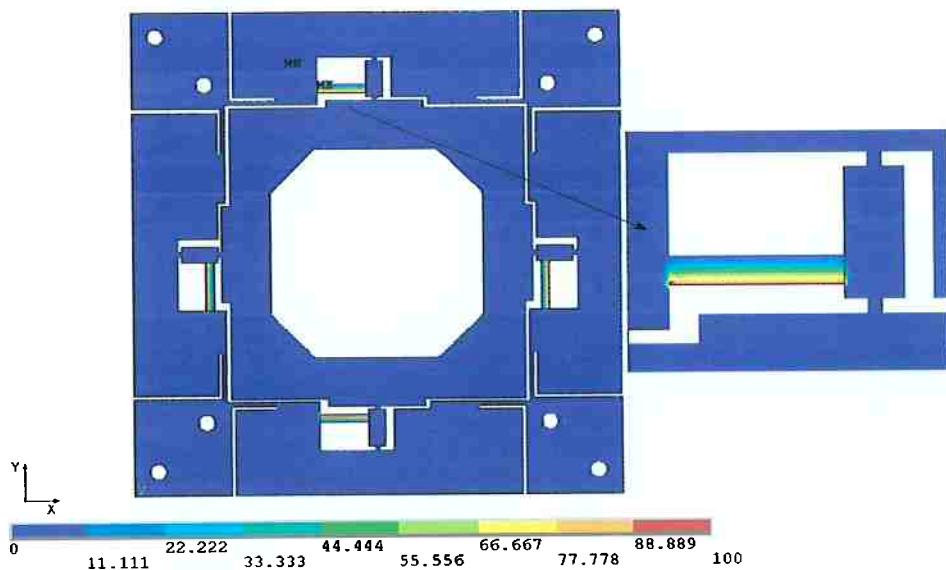


Figura 31 – Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas para o movimento de rotação.

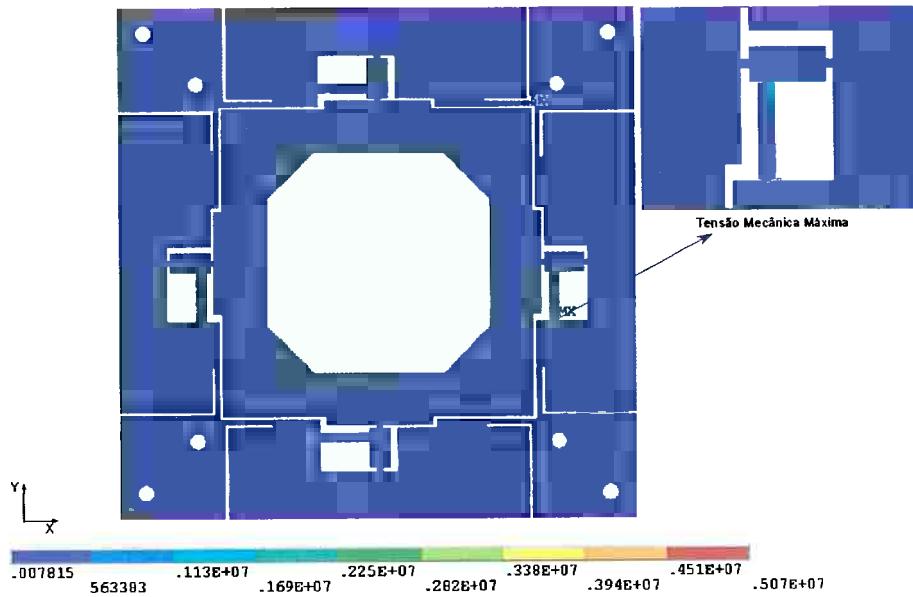


Figura 32 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento de rotação.

### 6.2.3 Configuração 3: somente as cerâmicas em X sendo atuadas

Nesta configuração os deslocamentos em X e Y das partes engastadas foram considerados zero, as cerâmicas piezelétricas X1 e X2 foram polarizadas positivamente com uma tensão constante de 100 V e as cerâmicas Y1 e Y2 tiveram seus graus de liberdade elétricos nulos acoplados.

Fazendo uma análise estática deste modelo chegamos aos seguintes deslocamentos:

Deslocamento máximo em X	0,104 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo em Y	0,044 $\mu\text{m}$
Módulo máximo dos deslocamentos XY	0,104 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo do PR em X	0,103 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo do PR em Y	- 0,254 nm

Os deslocamentos totais em XY podem ser visualizados na Figura 33.

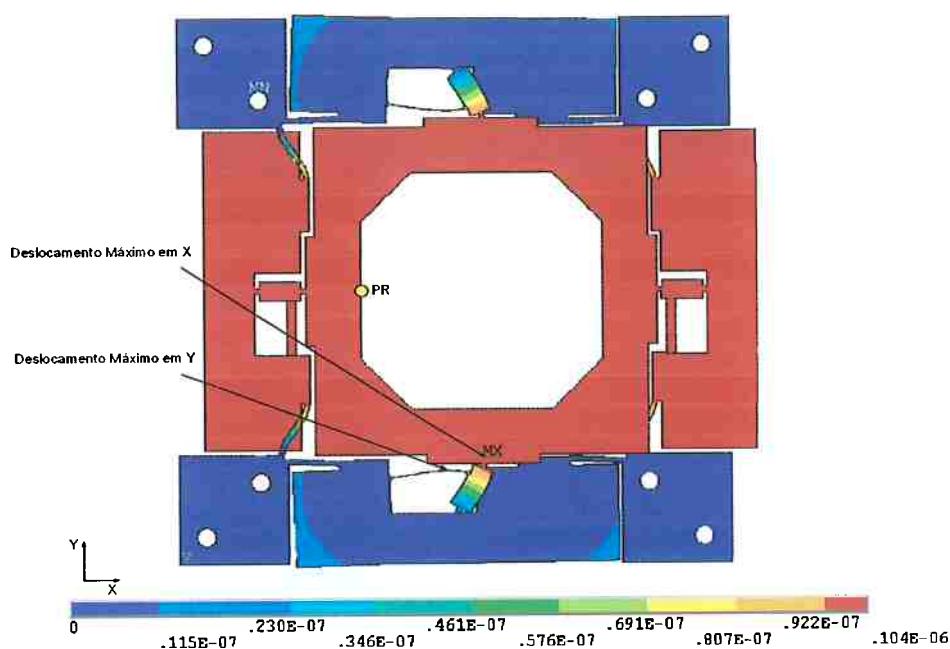


Figura 33 - Deslocamentos totais (m) em XY com as cerâmicas em X sendo atuadas.

Na Figura 34 pode-se observar a distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas piezelétricas e na Figura 35 a distribuição da tensão de Von Mises.

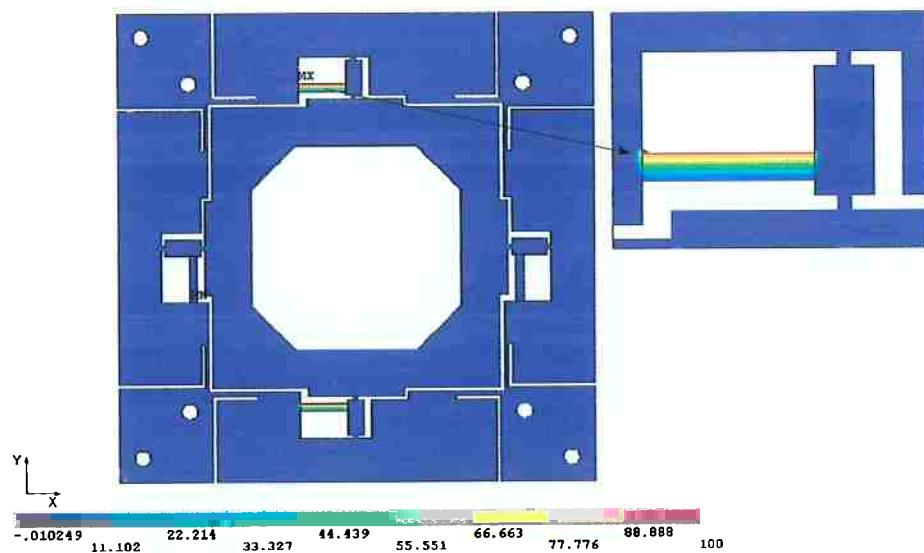


Figura 34 - Distribuição da tensão elétrica (V) nas cerâmicas para o deslocamento em X.

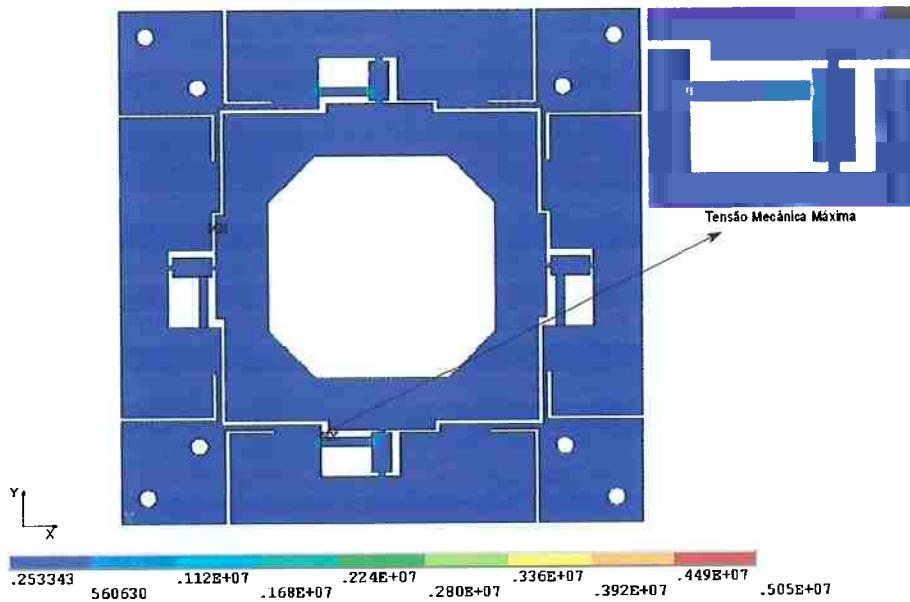


Figura 35 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento em X.

#### 6.2.4 Configuração 4: somente as cerâmicas em Y sendo atuadas

Nesta configuração os deslocamentos em X e Y das partes engastadas foram considerados zero, as cerâmicas piezelétricas Y1 e Y2 foram polarizadas positivamente com uma tensão constante de 100 V e as cerâmicas X1 e X2 tiveram seus graus de liberdade elétricos nulos acoplados.

Fazendo uma análise estática deste modelo chegamos aos seguintes deslocamentos:

Deslocamento máximo em X	0,044 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo em Y	0,104 $\mu\text{m}$
Módulo máximo dos deslocamentos XY	0,104 $\mu\text{m}$
Deslocamento máximo do PR em X	0,140 nm
Deslocamento máximo do PR em Y	0,104 $\mu\text{m}$

Os deslocamentos totais em XY podem ser visualizados na Figura 36.

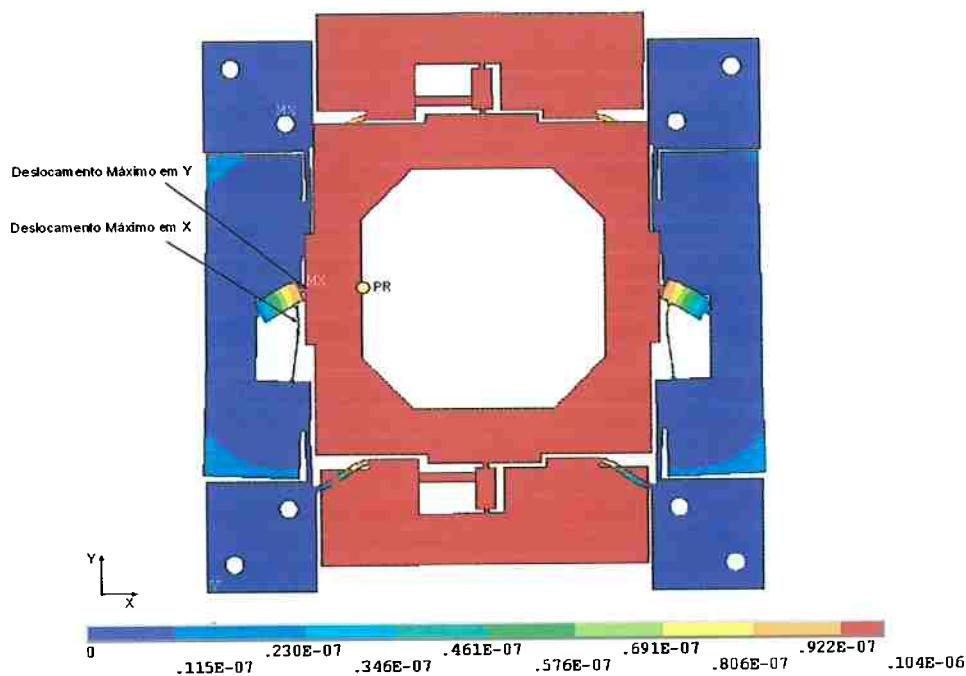


Figura 36 - Deslocamentos totais (m) em XY com as cerâmicas em Y sendo atuadas.

Na Figura 37 pode-se observar a distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas piezelétricas e na Figura 38 a distribuição da tensão de Von Mises.

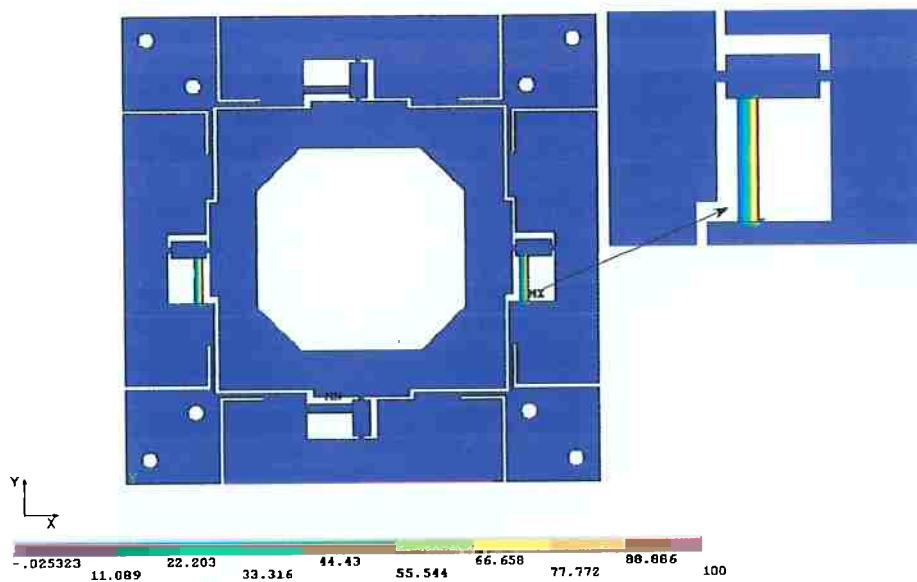


Figura 37 - Distribuição da tensão elétrica nas cerâmicas para o deslocamento em Y.

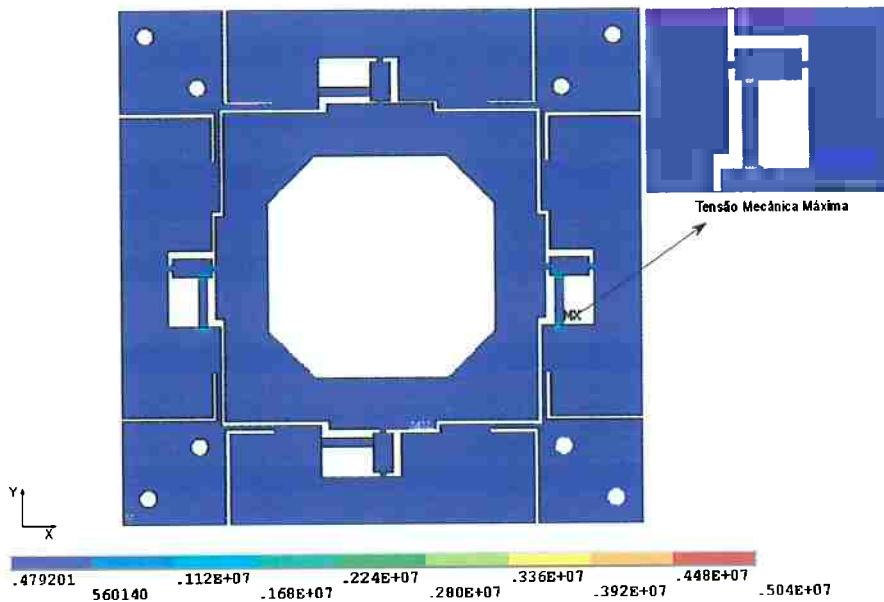


Figura 38 - Distribuição da tensão mecânica de Von Mises (Pa) nas cerâmicas piezelétricas para o movimento em Y.

Para as três configurações a tensão mecânica máxima não ultrapassou o limite de escoamento do Latão de 70 Mpa e nem da cerâmica piezelétrica de 100 Mpa, como pode se observar na tabela abaixo:

Configuração	Tensão Mecânica Máxima (MPa)
1 - todas em fase	5,05
2 - rotação	5,07
3 – somente em X	5,05
4 – somente em Y	5,04

#### 6.2.5 Análise Harmônica

Em uma etapa posterior deste trabalho, será feita a medição por interferometria a laser dos deslocamentos do ponto de referência (PR). Esta medição é feita em regime quasi-estático, numa freqüência de 60 Hz da rede, sendo necessário conhecer os primeiros modos de vibrar para evitar que a medição seja feita sobre algum modo perto da freqüência da rede. Para este projeto foi necessária a realização da análise harmônica em adição à análise modal, pois a ultima fornece muitos modos mecânicos de

vibrar e os que nos interessam são os modos piezelétricos. Para o mesmo intervalo de 0 a 12 KHz da análise harmônica, cinco frequências a mais são encontradas. A tabela abaixo mostra a comparação entre as duas análises:

	Modal (Hz)	Harmônica (Hz)
1	2.797,1	
2	2.801,4	2.800
3	2.807	
4	2.856,7	
5	6.938,7	
6	6.982,3	7.000
7	8.733,3	

O resultado da análise harmônica fornecidos pelo ANSYS é em função da corrente elétrica, sendo necessário à conversão para impedância elétrica de acordo com as equações citadas no item 3.2.1.2, para se obter os modos piezelétricos de vibrar. O resultado da análise harmônica pode ser visto na Figura 39.

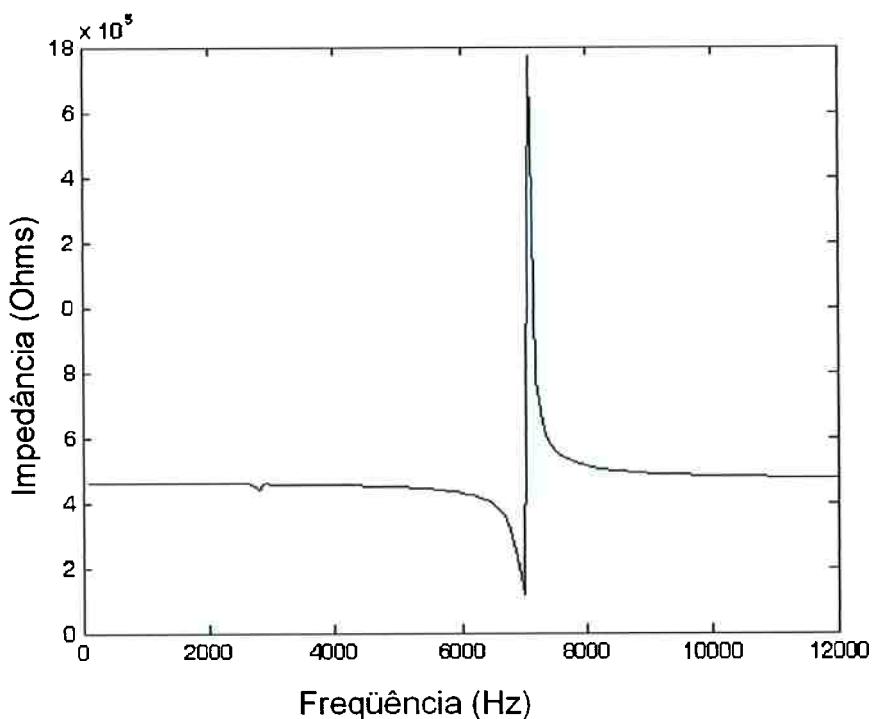


Figura 39 – Resultado da análise harmônica.

## **7 MÉTODOS EXPERIMENTAIS**

Após validação através das simulações computacionais, foram fabricados dois protótipos experimentais dos nanopositionadores piezelétricos. A fabricação de protótipos justifica-se pela necessidade de validação dos resultados computacionais e também pela verificação da viabilidade de construção do protótipo, o que nem sempre é possível. Além disso, é possível verificar através de ensaios a ocorrência de fenômenos não considerados nas simulações computacionais, especialmente por serem realizadas em duas dimensões.

Para este trabalho foram fabricados dois protótipos, mas somente o de 60 mm pode ser testado. Para o protótipo de 25 mm, devido as suas pequenas dimensões, não foi possível cortar as cerâmicas no tamanho necessário.

### **7.1 Medição por Interferometria a Laser**

O princípio do interferômetro a laser empregado neste trabalho é medir a defasagem da onda óptica, devido ao movimento do nanopositionador piezelétrico ou da amostra, quando aplicado um diferencial de potencial nos eletrodos das cerâmicas piezelétricas. O deslocamento da amostra é obtido em termos do comprimento de onda ( $\lambda$ ), sendo que uma defasagem na fase de  $\pi$ , corresponde a um deslocamento de  $\lambda$ . Este método é sensível e eficiente para medir pequenos deslocamentos e deformações e é empregado em medições de deslocamentos dinâmicos de nanopositionadores e atuadores piezelétricos.

O interferômetro em quadratura do tipo Mach-Zhender, como ilustrado na Figura 40 [6], é aplicado em medições de deslocamento quasi-estático, no qual a resposta dos movimentos de atuação é considerada em pontos específicos do mesmo. Neste interferômetro a fonte laser usada é He-Ne, com  $\lambda=632,8$  nm. Uma placa de meio comprimento de onda ( $\lambda/2$ ) é usada para controlar a intensidade do feixe para o espelho de referência (R) e o nanopositionador piezelétrico (S), que são refletidos e transmitidos por um

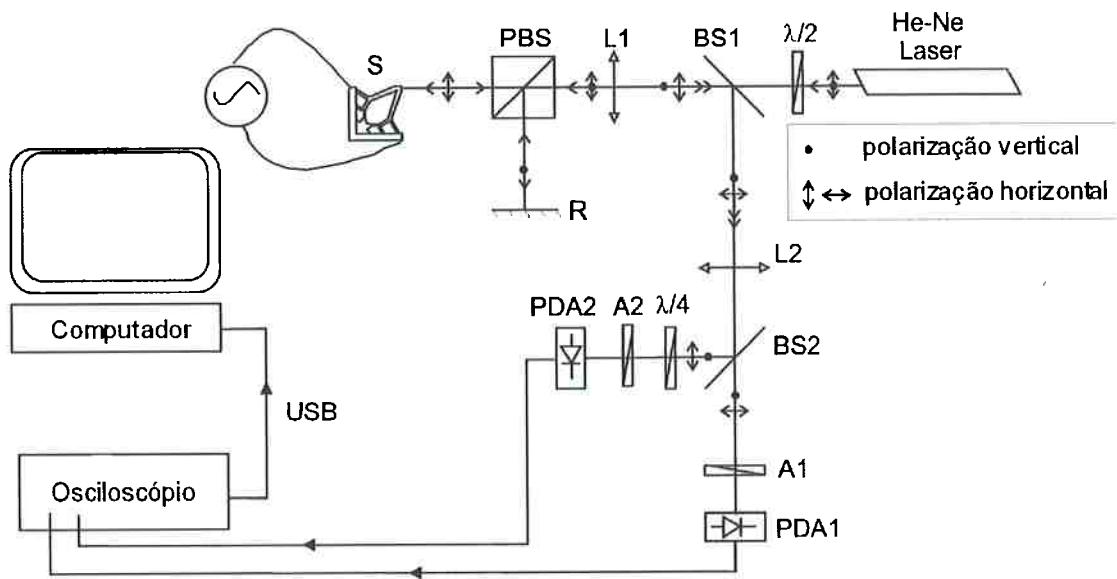
divisor de feixe polarizador (PBS). A lente de convergência L1 é aplicada para focar o feixe do laser no espelho de referência e a superfície analisada. Entre os 2 divisores de feixes (BS1 e BS2) não há interferência, porque a luz refletida de R e S são polarizadas em direções ortogonais. Após a polarização de A1 (em 45°), os feixes de referência e da amostra possuem a mesma polarização, então há interferência. A luz refletida pelo BS2 passa através de uma placa de um quarto de onda ( $\lambda/4$ ) em 45°, correspondendo a uma defasagem de  $\pi/2$ . Após a placa de  $\lambda/4$  a luz passa através do polarizador A2 (em -45°). O padrão de interferência é adquirido pelos fotodetectores de diodo (PDA1 e PDA2) que estão defasados de  $\pi/2$ . Uma lente de convergência L2 é aplicada para expandir o feixe do laser e aumentar o padrão de interferência nos PDA1 e PDA2. Portanto, quando é feita a subtração dos sinais obtidos no PDA1 e PDA2, têm-se um sinal de resposta com amplitude constante, ou seja, livre ruído. Esta é a vantagem do interferômetro em quadratura [13], [14]. Devido a defasagem de  $\pi/2$  entre os dois sinais adquiridos,  $V_{D1}$  e  $V_{D2}$  detectados por PDA1 e PDA2, respectivamente, pode-se escrever:

$$V_{D1} = V_e + V_0 \cos(\phi + \omega(t)) \quad (7.1)$$

$$V_{D2} = V_e + V_0 \sin(\phi + \omega(t)) \quad (7.2)$$

Desta forma, os deslocamentos são obtidos pela expressão abaixo:

$$\Delta u = \frac{\lambda}{4\pi} \tan^{-1} \left( \frac{V_{D1}}{V_{D2}} \right) \quad (7.3)$$



**Figura 40 - Interferômetro em quadratura do tipo Mach-Zhender.**

O aparato eletrônico é composto por um osciloscópio digital e um computador. O computador adquiri os sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio através de uma saída USB. O nanoposicionador é excitado por uma voltagem harmônica a 60 Hz, com amplitude de 10 a 220 volts (RMS), obtidas da rede elétrica.

Nesta parte do trabalho foi importante a utilização dos resultados das análises harmônicas feitas, para garantir que as medições não estivessem sendo feitas na freqüência de ressonância dos protótipos. Em ambos os modelos os primeiros modos de vibrar ocorriam em freqüências altas, acima de 1000 Hz, não interferindo com a freqüência utilizada na medição de 60 Hz.

## 7.2 Manuseio das Cerâmicas Piezelétricas

A seguir, são descritos os procedimentos empregados no corte e na colagem das cerâmicas piezelétricas.

### a) Corte da Cerâmica

Para o corte da cerâmica piezelétrica, deve-se proceder do seguinte modo:

- Apoiar a cerâmica sobre uma superfície rígida, plana, lisa e isolante, como, por exemplo, acrílico, vidro ou granito;
- Marcar as direções de polarização em cada pedaço de cerâmica com uma caneta de ponta porosa, para facilitar a identificação após o corte;
- Riscar as linhas de corte (Figura 41) com um objeto de ponta fina (por exemplo, agulha de seringa);

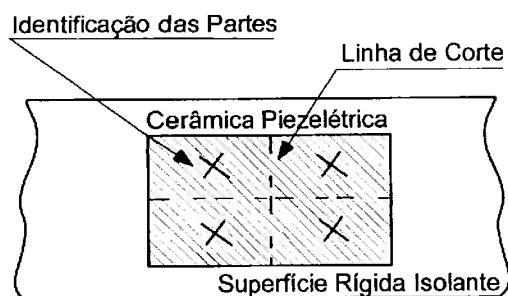


Figura 41 - Preparação da cerâmica para o corte.

- Riscar a cerâmica nas linhas de corte com um objeto metálico pontiagudo, usando um esquadro. Esse procedimento tem como objetivo abrir um rasgo na camada metalizada da cerâmica, impedindo o contato simultâneo entre a lâmina de corte e as camadas metálicas da cerâmica. Isso impede a ocorrência de um curto-circuito na cerâmica, pois, no momento do corte, a cerâmica está sob efeito de um carregamento e, consequentemente, há um potencial elétrico induzido (Figura 42);

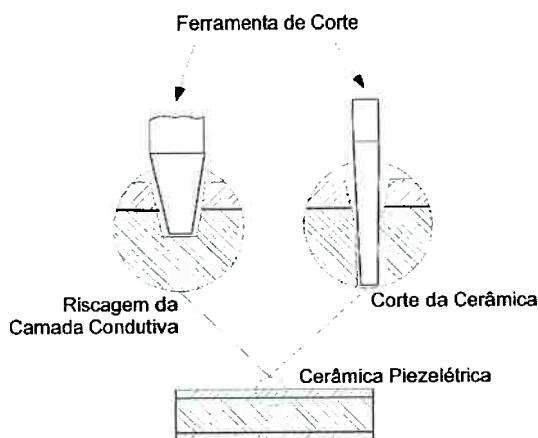


Figura 42 - Corte da cerâmica.

- Cortar a cerâmica com uma lâmina bem afiada, apoiando-a entre duas superfícies rígidas (Figura 43);

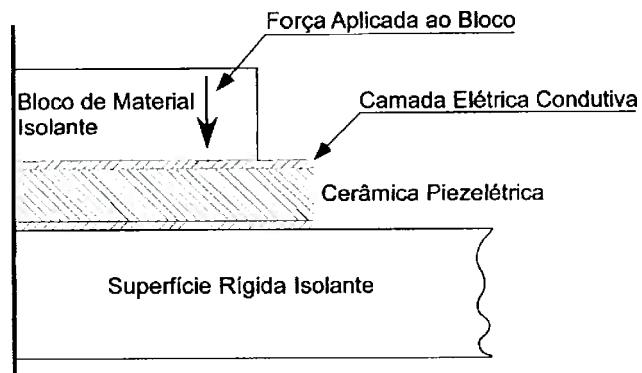


Figura 43 - Fixação da cerâmica para corte.

- Dar acabamento na superfície cortada usando uma lixa para metal grão 400. Para o lixamento, a cerâmica deve ser colocada entre duas superfícies isolantes (Figura 44).

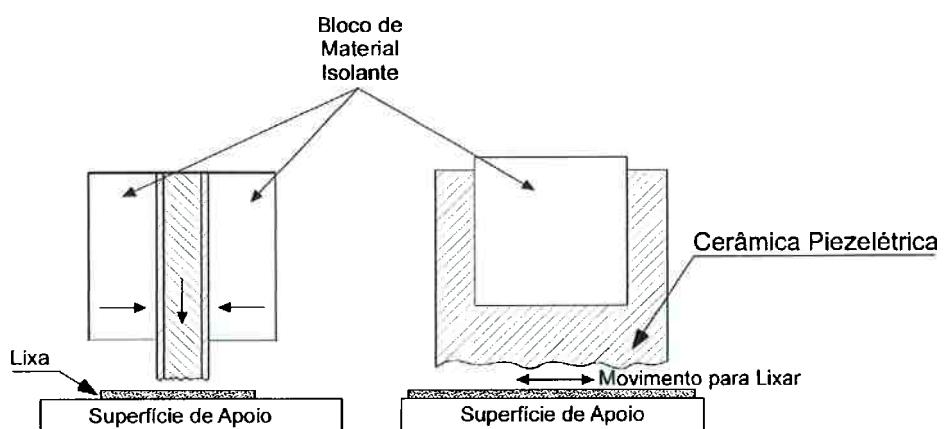


Figura 44 - Fixação das cerâmicas para o lixamento.

#### b) Colagem da Cerâmica

Para realizar a colagem da cerâmica no nanopositionador devem-se seguir os seguintes procedimentos:

- Limpar mecanicamente as superfícies da cerâmica e do alumínio para retirada de resíduos sólidos e poeira;
- Limpar quimicamente as superfícies da cerâmica e do alumínio com álcool isopropílico, para retirada de graxas, gorduras e óleos;
- Espalhar uma camada fina e uniforme de cola condutiva ao longo da cerâmica;
- Posicionar a cerâmica no local e pressioná-la utilizando uma placa de material isolante;
- Utilizar um peso para manter pressão entre a cerâmica e a superfície até que ocorra a secagem da cola;
- por fim, proceder com a limpeza final do conjunto, nanopositionador e cerâmica piezelétrica.

### **7.3 Protótipo do Modelo I Fabricado por Eletroerosão a Fio**

Para a fabricação deste protótipo foi utilizada a empresa Muratec situada em São Bernardo do Campo. Foram enviados dois blocos de alumínio nas dimensões 80x80x5 mm já com os furos para ser passado o fio de corte, mais o arquivo de CAD com o desenho do protótipo. Depois se seguiu para a etapa da colagem das pastilhas de PZT. Após o corte das pastilhas de 1 mm, as cerâmicas foram coladas nos espaços do nanopositionador utilizando cola condutiva modelo 186-3616, da marca RS. Para o contato positivo das cerâmicas, foi utilizado fio esmaltado de 34 AWG (0,16 mm de diâmetro). O fio, por ter pequeno diâmetro, interfere de modo insignificante nos modos de vibrar. O protótipo pronto pode ser visualizado na Figura 45.

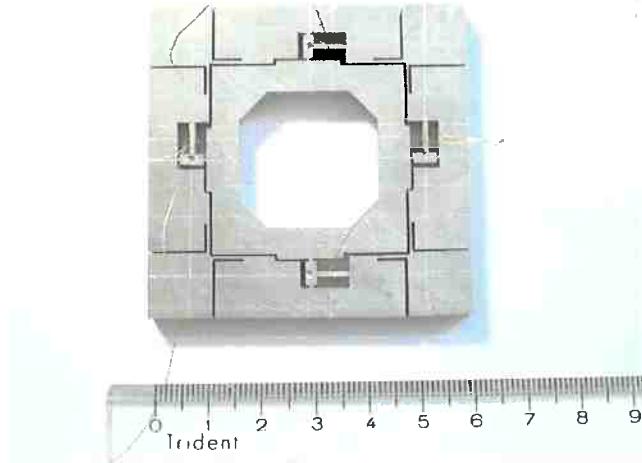


Figura 45 – Protótipo do Modelo I.

Para verificar o funcionamento do protótipo foram feitas medições utilizando um interferômetro do tipo Mach-Zhender. A montagem do equipamento pode ser visualizada na Figura 46 .

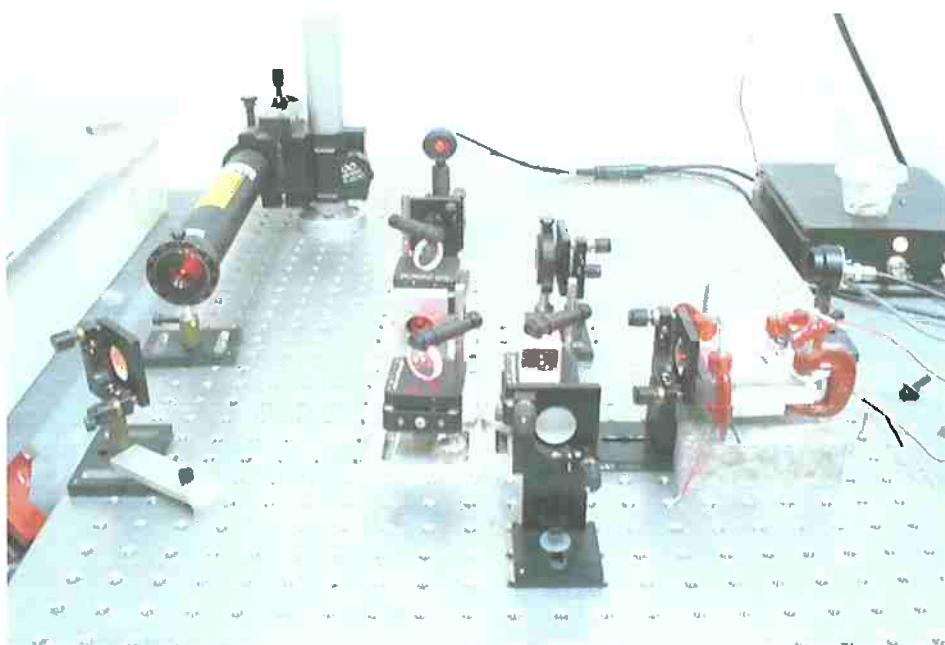


Figura 46 – Montagem do interferômetro para a medição.

Foram feitas medições para as quatro configurações propostas. Entretanto para as configurações 2, 3 e 4, que possuem deslocamentos

menores que 1 nm em alguma direção, não foi possível realizar as medições, uma vez que são inferiores ao mínimo medido pelo interferômetro de 35 nm. O ponto utilizado para se fazer a medição foi o mesmo do ponto de referência (PR) para uma correta comparação dos resultados. Para refletir o feixe de laser no ponto de medição, utiliza-se um espelho ou uma fita reflexiva fixada no local, como na Figura 47.

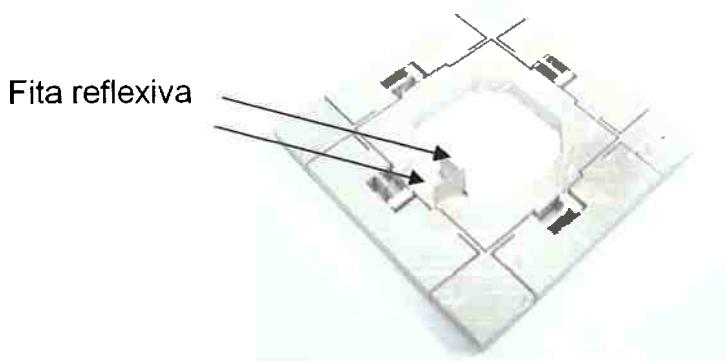


Figura 47 – Fixação da fita reflexiva.

Na medição realizada foi utilizada a fita reflexiva da 3M Scotchlite 7610 “High Gain Reflective Sheeting”, que reflete muito melhor o laser do que o espelho, facilitando a calibração do feixe de laser. Elas foram coladas em duas chapinhas de cobre perpendiculares entre si, para que o deslocamento em X e Y pudesse ser medido para o mesmo ponto. Para cada medição era preciso ajustar a distância do ponto medido e a lente de convergência L1 (Figura 40) para coincidir com a distância focal da mesma e ajustar a distância do espelho R para que a intensidade do laser nos fotodetectores fosse máxima. Em seguida ajustava-se o polarizador A2 para que as duas senóides captadas pelos fotodetectores estivessem defasadas de  $\pi/2$ , produzindo uma figura de “Lissajou” circular na tela do osciloscópio. Para facilitar os cálculos, variava-se a tensão da fonte de modo que a figura de “Lissajou” apresentasse apenas uma volta, simplificando a equação 7.3 obtendo-se um ângulo de  $2\pi$ . Para analisar os dados das saídas do osciloscópio, foi utilizado um programa feito no Matlab, que plota a figura de “Lissajou”, os dois sinais separados e fornece o deslocamento normalizado para 100 V, facilitando a comparação com os resultados simulados.

### 7.3.1 Resultados Experimentais da Configuração 1

Para esta configuração, na qual todas as cerâmicas estavam sendo atuadas em fase, obteve-se os resultados abaixo para o deslocamento em X.

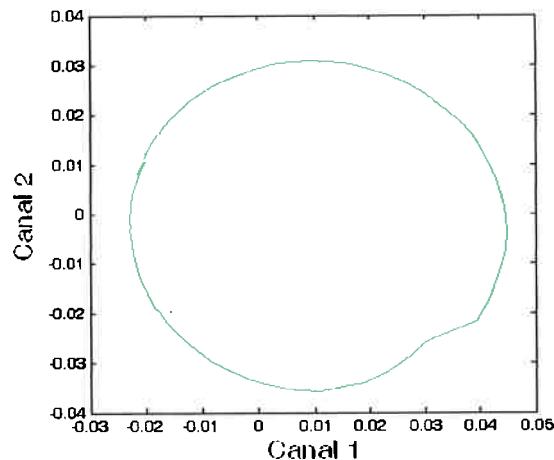


Figura 48 – Figura de “Lissajou” para configuração 1 na direção X.

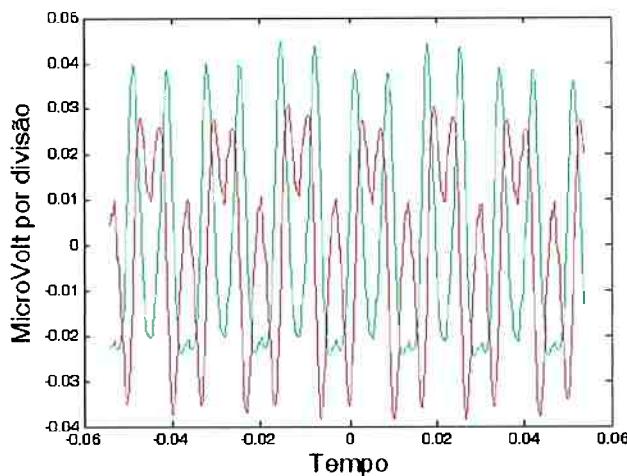


Figura 49 – Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 1 em X.

Tensão Medida (V)	Deslocamento Medido (normalizado para 100V)	Deslocamento Simulado (para 100 V)	Erro
59,2	94,5 nm	102 nm	7,34%

Para o deslocamento em Y, foi feito um teste e utilizou-se uma tensão mais elevada, de modo que a figura de “Lissajou” apresentasse 3 voltas.

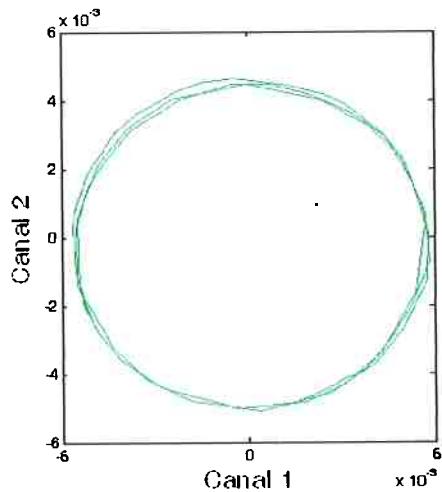


Figura 50 - Figura de “Lissajou” para configuração 1 na direção Y.

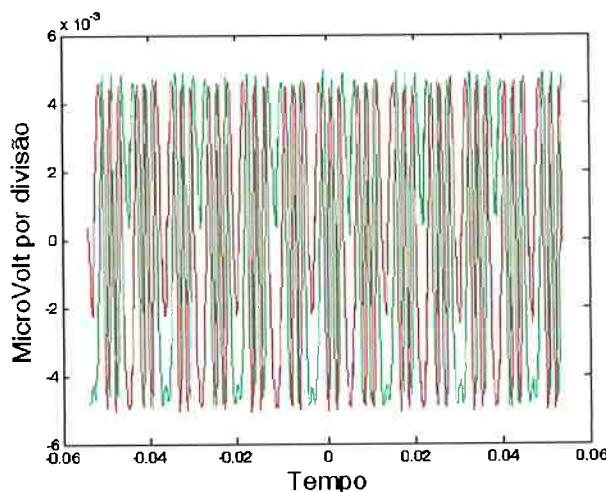


Figura 51 - Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 1 em Y.

Tensão Medida (V)	Deslocamento Medido (normalizado para 100V)	Deslocamento Simulado (para 100 V)	Erro
201,4	94,8 nm	103 nm	7,94%

Em ambas as medições foi possível obter uma figura de “Lissajou” circular de modo que os resultados obtidos foram consistentes, apresentando erro inferior a 10 %.

### 7.3.2 Resultados Experimentais da Configuração 2

Para esta configuração, na qual as cerâmicas X1 e Y1 foram polarizadas negativamente e as cerâmicas X2 e Y2 foram polarizadas positivamente para se obter um movimento de rotação, obteve-se os resultados somente para a direção Y, uma vez que em X o deslocamento é inferior a 1 nm.

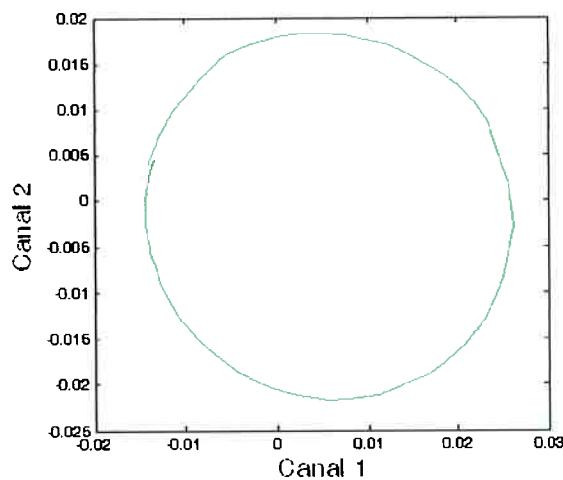


Figura 52 – Figura de “Lissajou” para configuração 2 na direção Y.

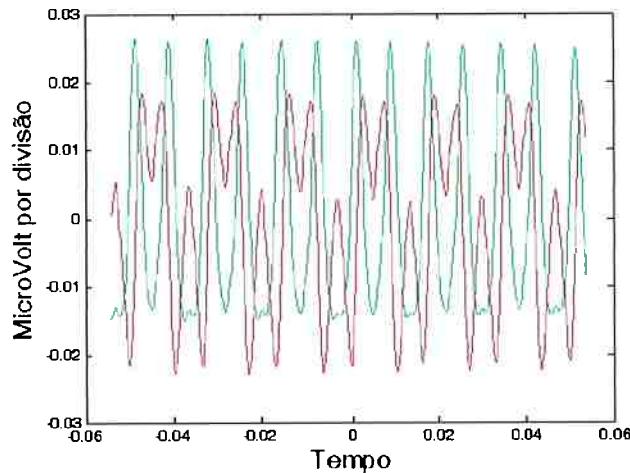


Figura 53 – Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 2 em Y.

Tensão Medida (V)	Deslocamento Medido (normalizado para 100V)	Deslocamento Simulado (para 100V)	Erro
85,7	65,3 nm	72 nm	9,33%

Nesta medição obteve-se uma figura de “Lissajou” circular de modo que o resultado obtido foi consistente, apresentando erro inferior a 10 %.

### 7.3.3 Resultados Experimentais da Configuração 3

Para esta configuração, na qual as cerâmicas piezelétricas X1 e X2 foram polarizadas positivamente para se obter um movimento de translação em X, obteve-se o resultado somente para a direção X, uma vez que em Y o deslocamento é inferior a 1 nm.

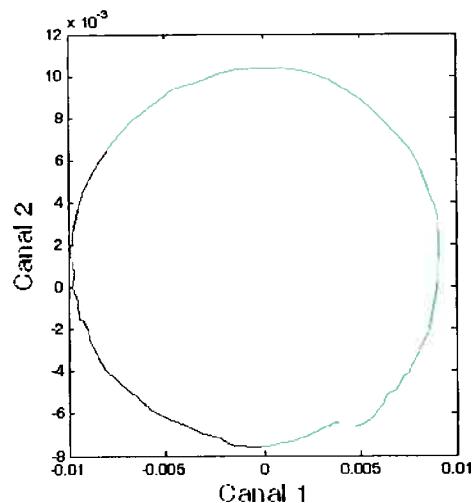
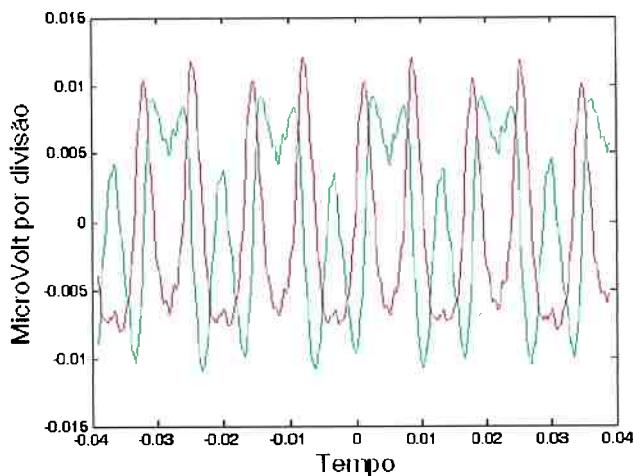


Figura 54 – Figura de “Lissajou” para configuração 3 na direção X.



**Figura 55 – Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 3 em X.**

Tensão Medida (V)	Deslocamento Medido (normalizado para 100V)	Deslocamento Simulado (para 100V)	Erro
60,08	92 nm	102 nm	9,78%

Para esta medição obteve-se uma figura de “Lissajou” circular, que proporcionou um resultado consistente, apresentando erro inferior a 10 %.

#### 7.3.4 Resultados Experimentais da Configuração 4

Para esta configuração, na qual as cerâmicas piezelétricas Y1 e Y2 foram polarizadas positivamente para se obter um movimento de translação em Y, obteve-se o resultado somente para a direção Y, uma vez que em X o deslocamento é inferior a 1 nm.

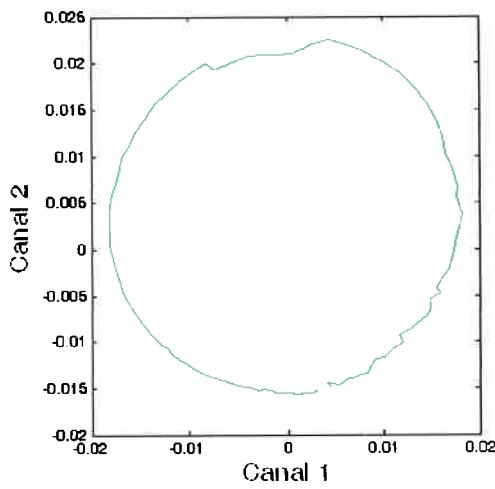


Figura 56 – Figura de “Lissajou” para configuração 4 na direção Y.

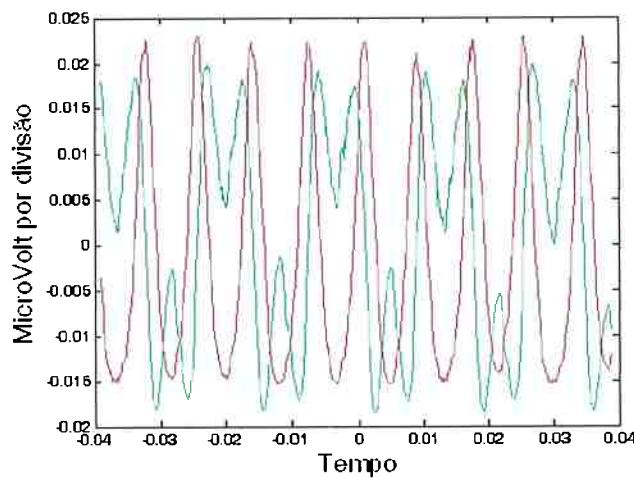


Figura 57 – Sinais dos canais 1 e 2 do osciloscópio para a configuração 4 em Y.

Tensão Medida (V)	Deslocamento Medido (normalizado para 100V)	Deslocamento Simulado (para 100V)	Erro
62,5	93,1 nm	104 nm	10,52%

Para esta medição obteve-se uma figura de “Lissajou” circular, mas que possui imperfeições devido à interferência de algum ruído no momento da medição. O resultado obtido foi satisfatório, sendo um pouco superior a 10%.

## 7.4 Protótipo do Modelo II Fabricado por Fotofabricação

Para a fabricação deste protótipo foi utilizada a empresa Metalfoto, especializada em fotofabricação, situada em Cotia. Foi necessário enviar somente o arquivo em CAD para a fabricação do fotolito e do protótipo. Após receber o protótipo de dimensões  $25 \times 25 \times 0,15$  mm que pode ser visualizado na Figura 58, não foi possível dar continuidade a finalização do mesmo. Isto ocorreu por não se conseguir cortar as cerâmicas piezelétricas na dimensão necessária com o material disponível. A experiência entretanto foi válida para verificar a viabilidade da miniaturização do modelo

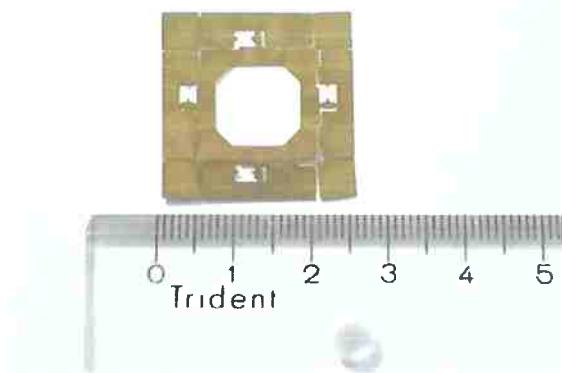


Figura 58 - Protótipo do Modelo II.

Uma comparação de tamanho com o Modelo I pode ser vista na Figura 59.

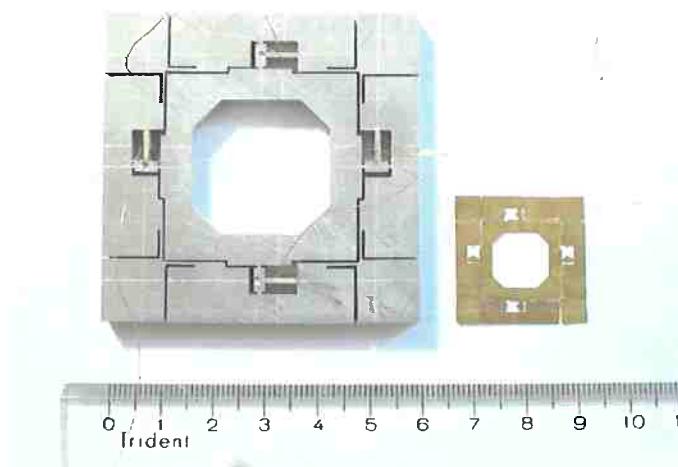


Figura 59 – Comparação entre os modelos I e II.

## **8 CONCLUSÕES**

Após o término deste trabalho, pode-se concluir que o modelo I de nanoposicionador XYθ, proposto (fabricado por eletroerosão a fio em alumínio nas dimensões 60 x 60 x 5 mm) é viável e apresenta resultados consistentes. Os resultados das medições dos deslocamentos em comparação com os resultados simulados foram na sua grande maioria inferiores a 10%. Uma sugestão para a melhoria deste dispositivo seria a implementação de um sistema de controle, com o qual seria possível obter um melhor desempenho no posicionamento da plataforma central. Para o modelo II proposto, pode-se apenas concluir que a miniaturização é possível.

A utilização da simulação computacional foi muito importante para o desenvolvimento do projeto. Ela permitiu uma flexibilidade muito grande durante a execução do projeto, sendo possível fazer alterações e correções de forma ágil e econômica.

As escolhas dos métodos de fabricação utilizados se mostraram corretas e eficientes, os fornecedores foram rápidos e eficientes na execução.

## **9 REFERÊNCIAS**

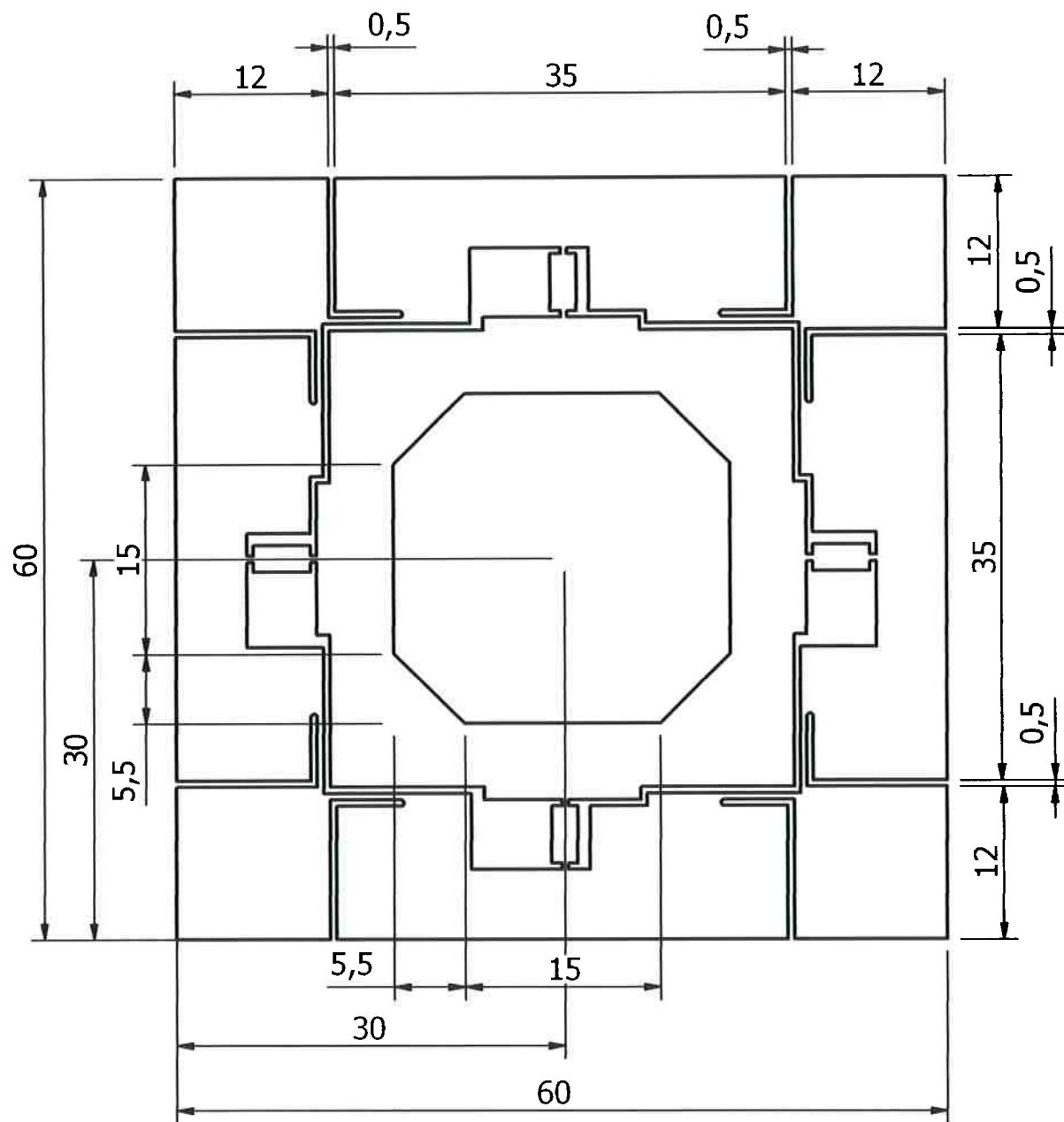
- [1] Chu, C.L., Fan, S.H., "A novel long-travel piezoelectric-driven linear nanopositioning stage", Precision Engineering, v.30, p. 85-95, 2006.
- [2] Elmustafa, A.A., Lagally M.G., "Flexural-hinge guided motion nanopositioner stage for precision machining: finite element simulations", Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology", v.25, p. 77-81, 2001.
- [3] Chang, S.H., Tseng, C.K., Chien, H.C., "An ultra-precision XY $\theta_z$  Piezo-micropositioner Part 1: Design and Analysis", IEEE – Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.46, n.4, p. 897-905, 1999.
- [4] Piezo – University:  
[http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo\\_tutorial.php](http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo_tutorial.php)
- [5] IEEE – Standard on Piezoelectricity 176-1987, IEEE – Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.43,n.5, p. 5-54,1996.
- [6] Nader, G., "Desenvolvimento de técnicas de características de transdutores piezelétricos", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p.13-61, São Paulo, 2002.
- [7] Silva, E.C.N., "Capítulo 6 – Introdução ao Método dos Elementos Finitos (MEF)", Apostila de Mecânica Computacional – PMR-2420, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [8] Lerch, R., "Simulation of Piezoelectric Devices by two and Three Dimensional Finite Elements", IEEE, Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, v.37, n.2, p. 237- 246, maio 1990.

- [9] Silva, E.C.N., "Modelagem vibracional de transdutores de ultra-som piezelétricos pelo método de elementos", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [10] Naillon, M., Coursant, R.H.,and Besnier, F., "Analusis of piezoelectric structures by a finite element metho", Acta Eletronica, v.25, n.4, p.341-362, 1983.
- [11] Lascoe, O.D., "Handbook of Fabrication Process", ASM International, ed.1, p.404-407, 1988.
- [12] Groover, M.P., "Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems", Prentice Hall, p. 693 – 706, 1996.
- [13] Scruby, C.B. & Drain, L.E., "Laser Ultrasonics, Techniques and Applications", 1990, Adam Hilger, EUA.
- [14] Pan, W.Y., Wang, H. & Cross, L.E., "Laser interferometry for studying phase delay of piezoelectric response", Japanese Journal of Applied Physics 29 (8), 1990, pg.1570-1573.

## **APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS DO MODELO I**

Neste apêndice encontram-se os desenhos técnicos utilizados na fabricação do protótipo por eletroerosão a fio.

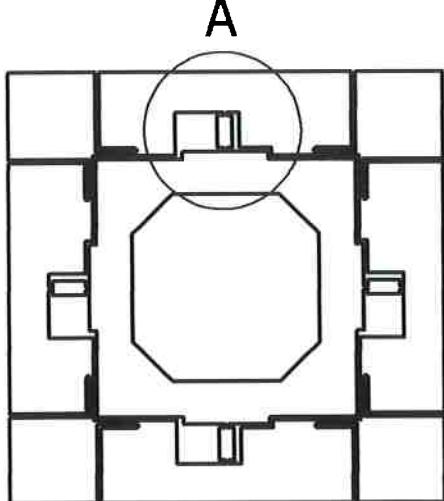
**Espessura 5 mm.  
Material Alumínio.**



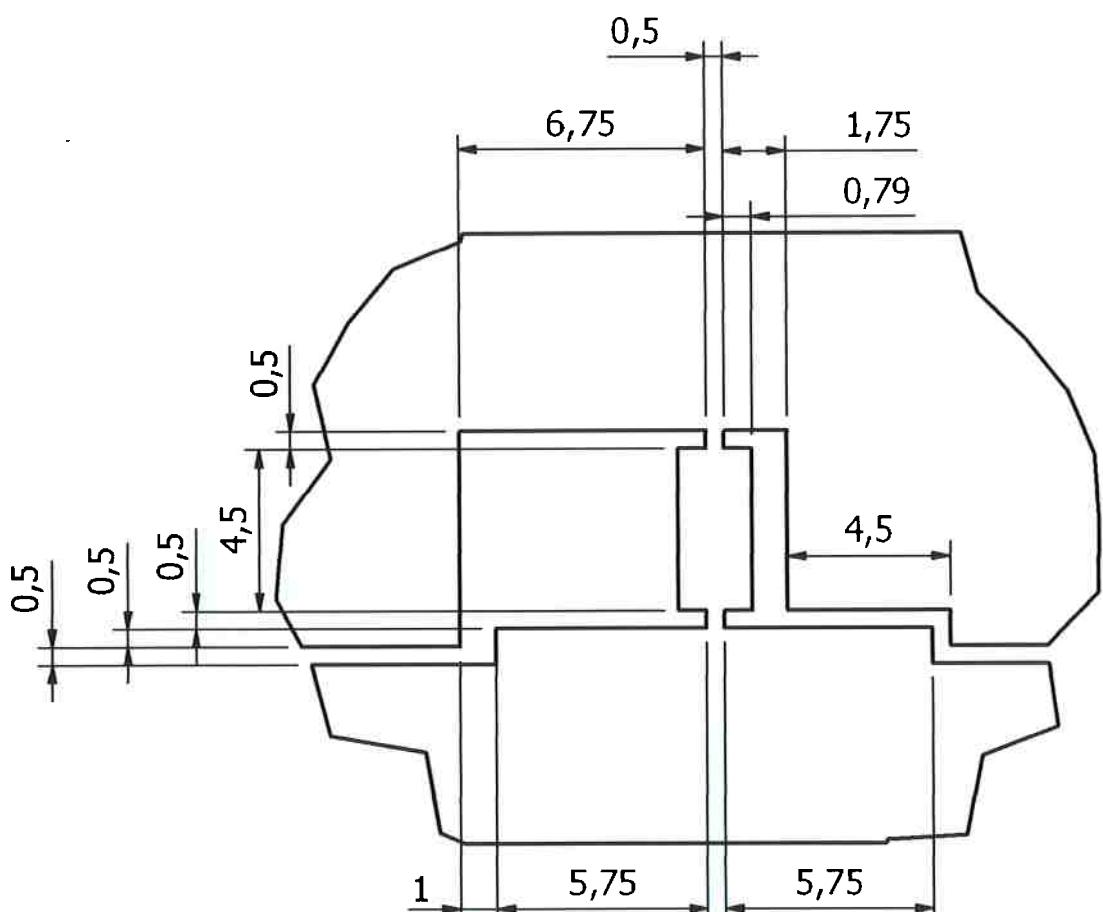
( 2 : 1 )

OBS: Todas as dimensões em milímetros.

Designed by Sandra	Checked by	Approved by	Date	Date	Material
Escola Politécnica da USP		Nanoposicionador XY Piezelétrico			
Frente			Edition 0	Sheet 1 / 3	



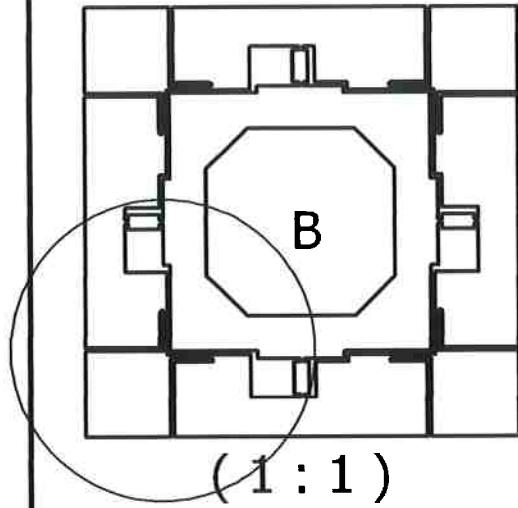
( 1 : 1 )



A ( 5 : 1 )

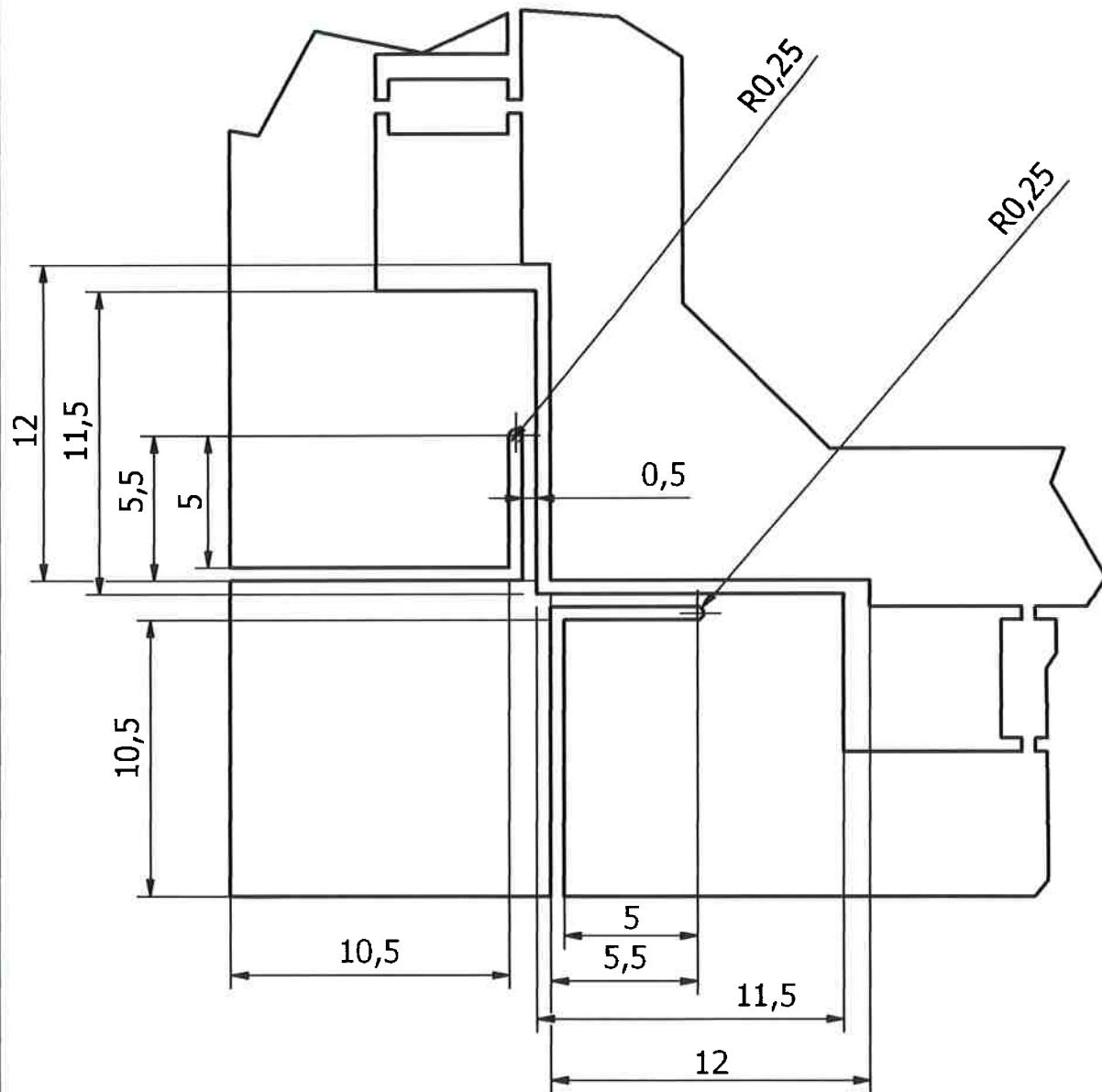
OBS: Todas as dimensões em milímetros.

Designed by Sandra	Checked by	Approved by	Date	Date	Material
Escola Politécnica da USP	Nanoposicionador XY Piezelétrico				
	Frente		Edition 0	Sheet 2 / 3	



(1 : 1)

B (4 : 1)



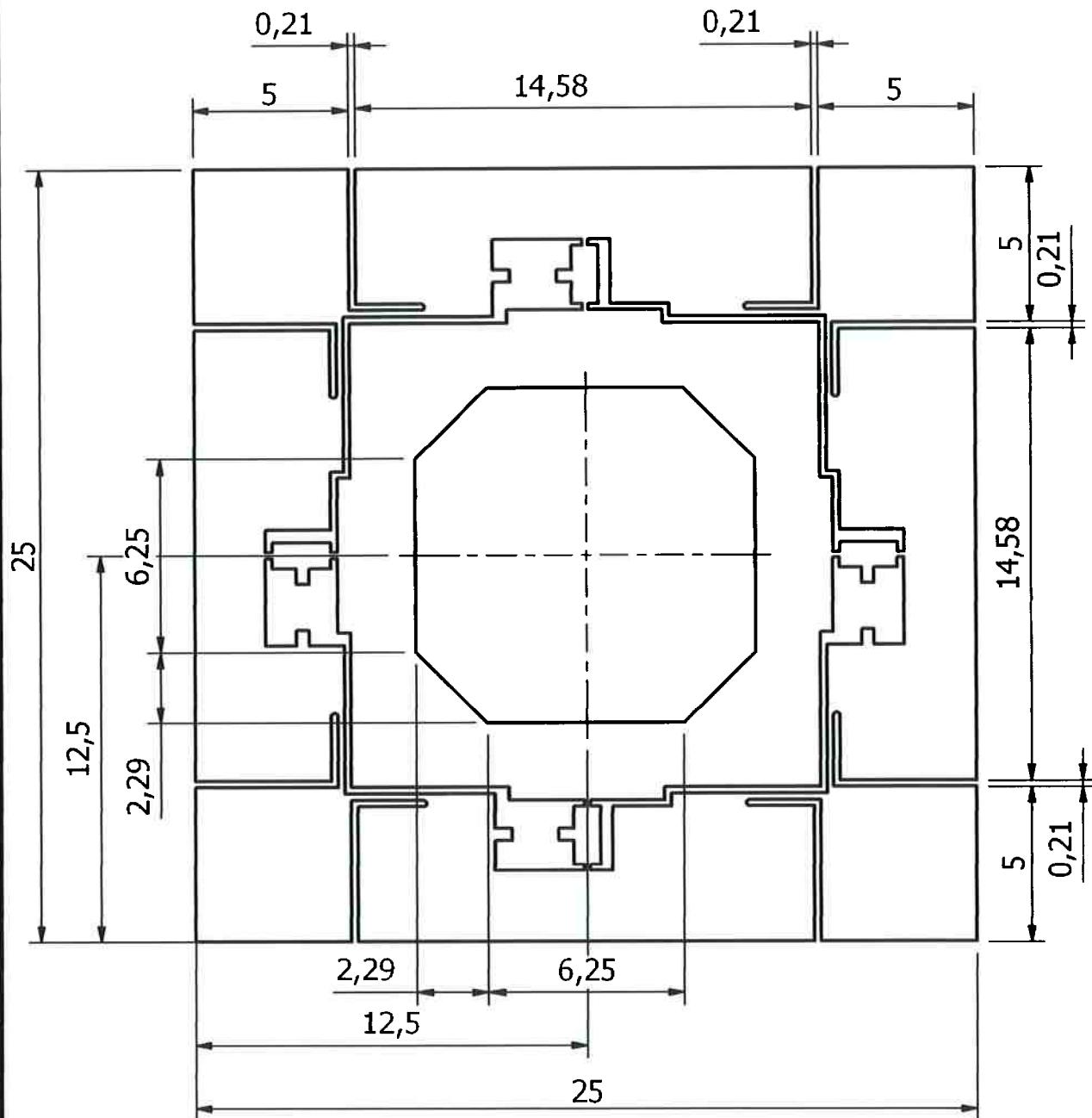
OBS: Todas as dimensões em milímetros.

Designed by Sandra	Checked by	Approved by	Date	Date	Material
Escola Politécnica da USP		Nanoposicionador XY Piezelétrico			
Frente		Edition 0		Sheet 3 / 3	

## **APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DO MODELO II**

Neste apêndice encontram-se os desenhos técnicos utilizados na fabricação do protótipo por fotofabricação.

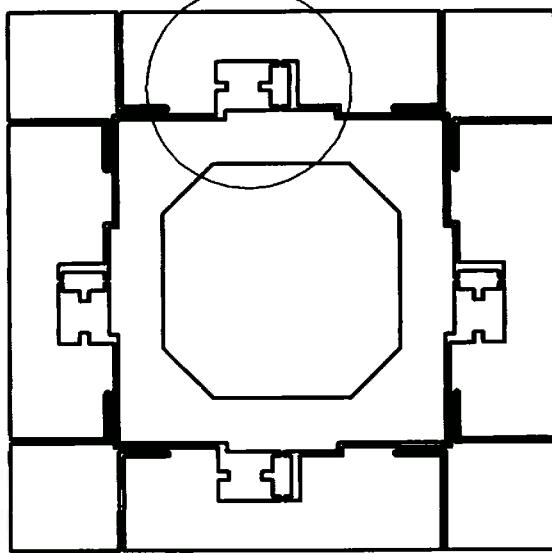
Espessura 0,15 mm.



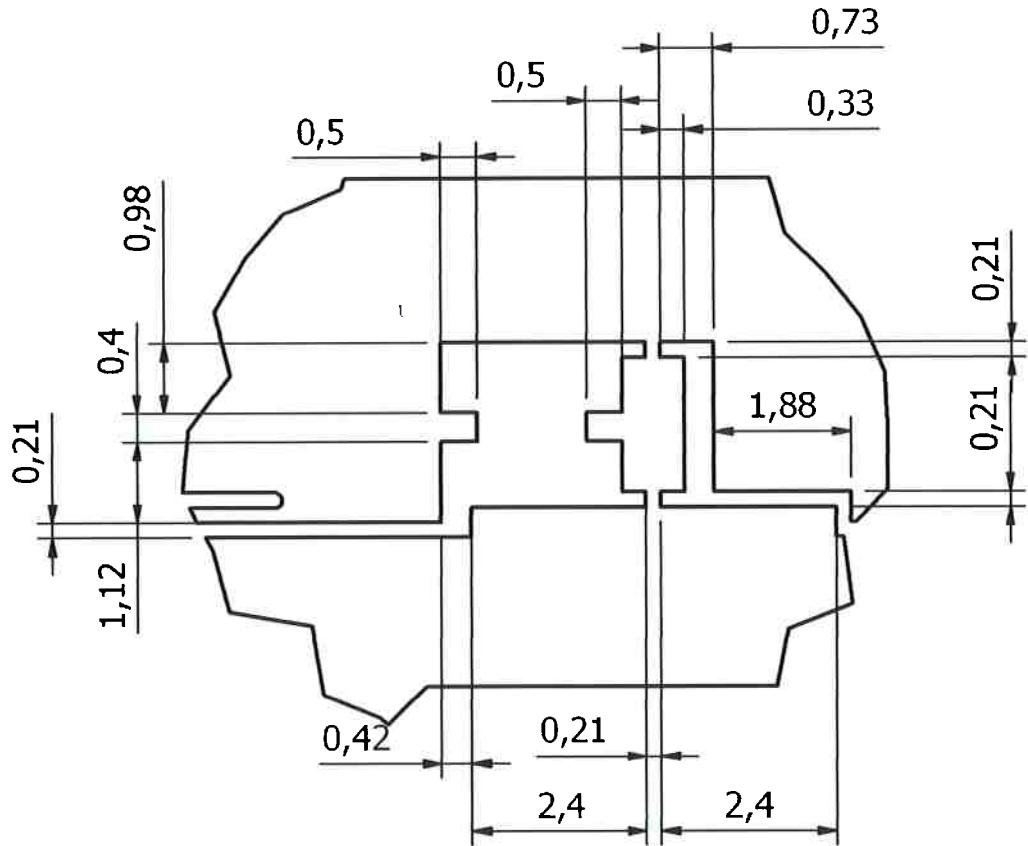
( 5 : 1 )

OBS: Todas as dimensões em milímetros.

Designed by Sandra	Checked by	Approved by	Date	Date	Material
Escola Politécnica da USP	Nanoposicionador XY Piezelétrico				
	Nanoposicionador_XY_metal		Edition 0	Sheet 1 / 3	



( 3 : 1 )

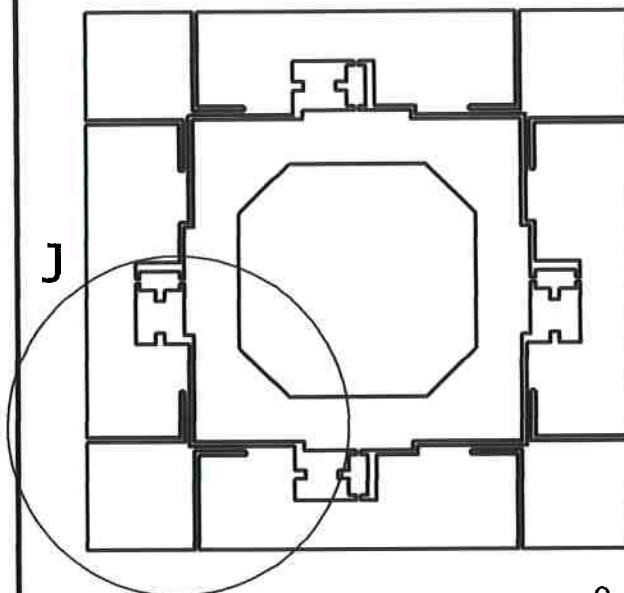


H ( 10 : 1 )

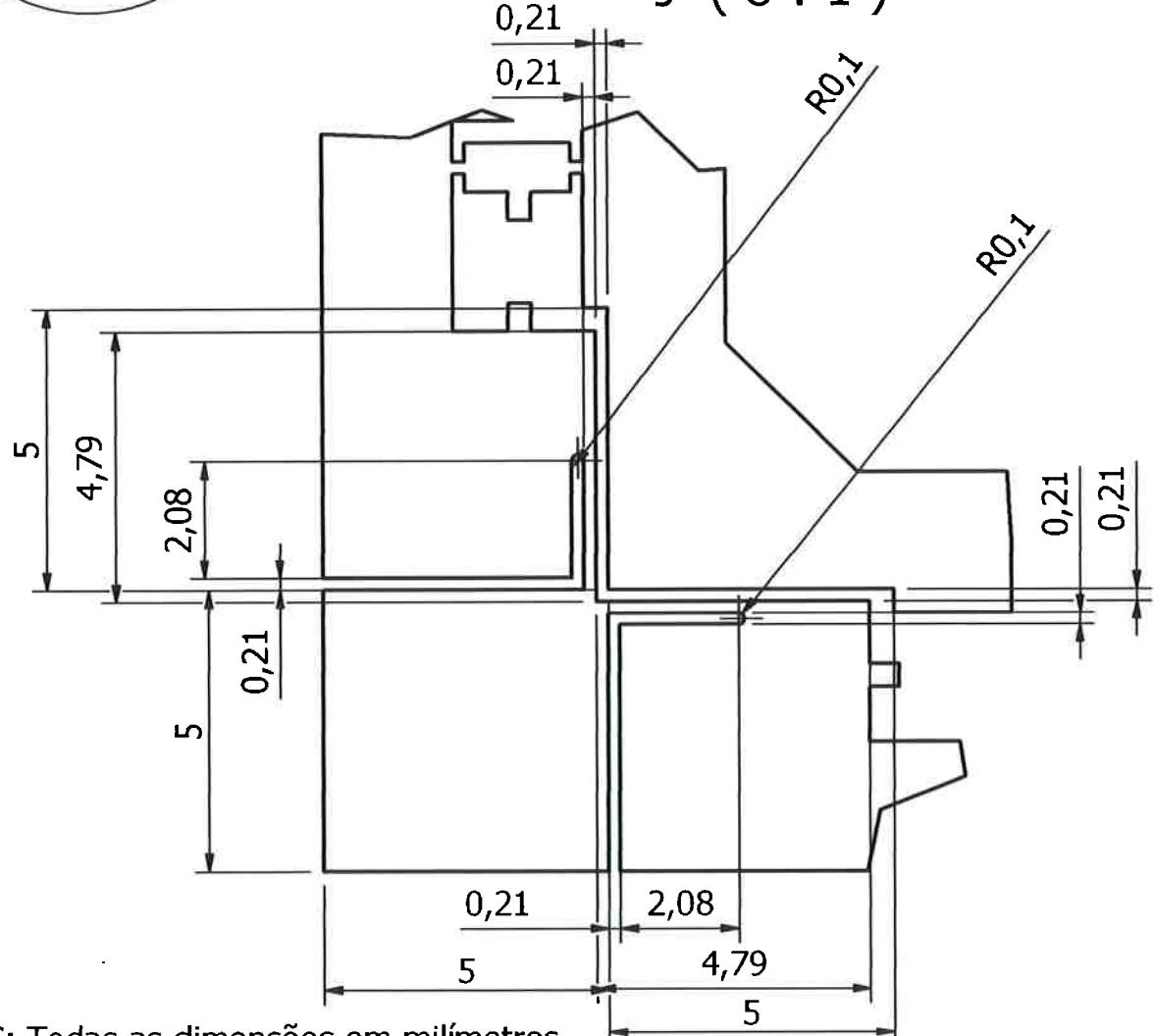
OBS: Todas as dimensões em milímetros.

Designed by Sandra	Checked by	Approved by	Date	Date	Material
Escola Politécnica da USP		Nanoposicionador XY Piezelétrico			
		Nanoposicionador_XY_metal		Edition 0	Sheet 2 / 3

( 3 : 1 )



J ( 8 : 1 )



OBS: Todas as dimensões em milímetros.

Designed by Sandra	Checked by	Approved by	Date	Date	Material
Escola Politécnica da USP	Nanoposicionador XY Piezelétrico				
Nanoposicionador_XY_metal			Edition 0	Sheet 3 / 3	