

ALEXANDRE DALLA VALLE BAPTISTA DA SILVA
GUILHERME BOLFORINI HARAMI

DESENVOLVIMENTO DE UM MICROMANIPULADOR PIEZELÉTRICO
COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE

MONOGRAFIA APRESENTADA À
ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO

SÃO PAULO
2008

ALEXANDRE DALLA VALLE BAPTISTA DA SILVA
GUILHERME BOLFARINI HARAMI

DESENVOLVIMENTO DE UM MICROMANIPULADOR PIEZELÉTRICO
COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE

MONOGRAFIA APRESENTADA À
ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA MECATRÔNICA

ORIENTADOR:
PROF. DR. EMÍLIO CARLOS NELLI
SILVA

SÃO PAULO
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Alexandre Dalla Valle Baptista da; Harami, Guilherme Bolfarini

**Desenvolvimento de um micromanipulador piezelétrico com três graus de liberdade/ A.D.V.B. da Silva, G.B. Harami – São Paulo, 2008
78 p.**

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Atuadores piezelétricos 2. Sistemas microeletromecânicos. I. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Emílio Carlos Nelli Silva, pela orientação e pelo constante incentivo e presença durante todo o trabalho.

Aos colegas Ronny Calixto e Adriano Koga pelo auxílio e apoio.

À empresa Muratec e a Cássio dos Santos, pelo trabalho prestado e bem executado.

Aos amigos e familiares, e a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

RESUMO

O desenvolvimento de sistemas micro-eletromecânicos (*Microelectromechanical systems* - MEMS) cada vez mais complexos suscita uma necessidade crescente de ferramentas adequadas para a fabricação e montagem de cada micro-componente.

Vários princípios são utilizados para a atuação em micro-manipuladores, como os atuadores piezelétricos. Estes são particularmente interessantes para aplicações de micro-manipulação por oferecerem vantagens como alta resolução, resposta rápida entre outras.

Neste trabalho é concebido um micro-manipulador com acionamento piezelétrico com três graus de liberdade. Modelos computacionais são elaborados em elementos finitos por meio do software comercial ANSYS para a análise estática e modal da estrutura flexível do sistema. Um protótipo é fabricado segundo o modelo desenvolvido, para comparação dos resultados obtidos em simulação. Os testes são realizados através de comando do usuário a partir de uma interface computacional e os deslocamentos são analisados por meio de um sensor de deslocamento.

Palavras-chave: piezelétrico, MEMS, micro-manipuladores, três graus de liberdade

ABSTRACT

The continuous development of more complex Microelectromechanical Systems (MEMS) results in a growing need for suitable tools in order to fabricate and assemble each microcomponent.

Several principles may be used to actuate a micromanipulation device, such as piezoelectric actuators. These are particularly attractive for micro manipulation applications since they present advantages such as high resolution, fast response among others.

In this work, a micromanipulation device with piezoelectric actuation and three degrees of freedom is designed. Computational models are developed using finite element method (FEM), with the aid of the commercial software ANSYS, in order to have a static and a modal analysis of the systems compliant structure. A prototype is fabricated according to the developed model, so as to compare it with the simulation results. Tests are conducted by means of user commands and a computational interface, and displacements are observed using a displacement sensor.

Keywords: piezoelectric, MEMS, micro manipulation, three degrees of freedom

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVO E MOTIVAÇÃO	7
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
3.1	MICROMANIPULAÇÃO	8
3.1.1	Áreas de Aplicação	8
3.1.2	Requisitos	8
3.1.3	Princípios de Atuação	9
3.1.4	Princípios de atuação para micro-manipulação	11
3.2	EFEITO PIEZELÉTRICO	12
3.2.1	Princípio Físico.....	12
3.2.2	Equações constitutivas	16
3.3	MECANISMOS PARA MICROMANIPULAÇÃO	17
3.3.1	Mecanismos flexíveis	17
3.3.2	Posicionadores.....	18
3.3.3	Manipuladores.....	19
3.4	METODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	23
3.4.1	MEF Piezelétrico	24
3.5	ESTRATÉGIA DE COMANDO DE MEMS PIEZELÉTRICOS	30
3.6	FABRICAÇÃO	31
4	SIMULAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS	34
4.1	PRÉ-PROCESSAMENTO	34
4.2	SOLUÇÃO.....	37
4.3	PÓS-PROCESSAMENTO.....	38
5	O PROJETO DO PROTOTIPO	39
5.1	REQUISITOS	39
5.2	SOLUÇÕES	39
5.2.1	Primeira Solução.....	41
5.2.2	Segunda Solução.....	44
5.2.3	Terceira Solução	48
5.2.4	Quarta Solução	54
5.2.5	Solução Fabricada	58
5.2.6	Comparação das soluções.....	63
5.2.7	Análise Modal.....	64
6	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	65
6.1	FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	65
6.2	MONTAGEM DO PROTÓTIPO.....	67
6.3	MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	67
6.3.1	Sensor MTI 2100.....	70
6.3.2	Interface com o usuário.....	71
6.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	72
6.4.1	Primeira montagem experimental	72
6.4.2	Segunda montagem experimental	74

7	CONCLUSÃO.....	75
8	BIBLIOGRAFIA	76
	ANEXO A – DESENHO DE FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO	78
	ANEXO B – CODIGO FONTE DO SOFTWARE DE COMANDO.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cristal isotrópico (esquerda) e cristal anisotrópico	12
Figura 2. Efeito direto longitudinal	13
Figura 3. Efeito direto transversal	13
Figura 4. Processo de polarização: (a) distribuição aleatória dos dipolos, (b) polarização total, (c) polarização permanente	15
Figura 5. Estrutura de uma célula unitária de PZT não-polarizada (esquerda) e polarizada	15
Figura 6. Deformação longitudinal e transversal para o efeito inverso	16
Figura 7. Microposicionador XY (Nano-Mini)	18
Figura 8. Posicionador XY com quatro piezelétricos	19
Figura 9. NEXLINE Piezo Hexapod	19
Figura 10. Garra utilizando um piezelétrico de translação	20
Figura 11. Garra piezelétrica	20
Figura 12. Braço piezelétrico construído em uma única peça	21
Figura 13. Braço piezelétrico com duas peças e amplificação mecânica	21
Figura 14. Pinça piezelétrica	22
Figura 15. Princípio de remoção de material	32
Figura 16. Esquema de uma máquina de eletroerosão a fio	33
Figura 17. Cerâmica piezelétrica na posição horizontal	35
Figura 18. Elemento ANSYS SOLID 226	36
Figura 19. Elemento ANSYS SOLID45	36
Figura 20. Esquema do primeiro conceito de amplificação	40
Figura 21. Esquema do segundo conceito de amplificação	40
Figura 22. Desenho em CAD da garra 1	41
Figura 23. Resultado da aplicação de 100 V em cada cerâmica	42
Figura 24. Desenho do sistema 1 de microposicionamento	43
Figura 25. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical	43
Figura 26. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical	44
Figura 27. Desenho em CAD da garra 1	45
Figura 28. Resultado da aplicação de 100 V em cada cerâmica	45
Figura 29. Desenho do sistema 2 de microposicionamento	46
Figura 30. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical	47
Figura 31. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical	47
Figura 32. Mecanismo de barras paralelas flexíveis	48
Figura 33. Desenho do terceiro sistema de microposicionamento	49
Figura 34. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica horizontal	50
Figura 35. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical	50
Figura 36. Deslocamento total em módulo devido a uma aplicação de 100 V em cada cerâmica	51
Figura 37. Tensão de von Mises e funcionamento do mecanismo flexível	52

Figura 38. Deslocamento do centro da garra em função da aplicação das voltagens em ambas as cerâmicas	52
Figura 39. Distribuição de tensões elétricas nas cerâmicas	53
Figura 40. Tensões de von Mises no contato entre piezelétrico e estrutura. Máximo: 0,02MPa	53
Figura 41. Deformação total das garras – Max. 5 μm	54
Figura 42. Desenho do quarto sistema de microposicionamento	55
Figura 43. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical	56
Figura 44. Deslocamento do centro da garra em função da aplicação de 100 V na cerâmica vertical.....	56
Figura 45. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica horizontal	57
Figura 46. Deslocamento do centro da garra em função da aplicação de 100 V na cerâmica horizontal	58
Figura 47. Desenho final do sistema fabricado.....	59
Figura 48. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica horizontal	60
Figura 49. Deslocamento no centro da garra devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica horizontal	60
Figura 50. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical	61
Figura 51. Deslocamento no centro da garra devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical.....	62
Figura 52. Deformação total das garras	62
Figura 53. Primeira harmônica da estrutura	64
Figura 54. Máquina de eletroerosão a fio em funcionamento.....	66
Figura 55. Protótipo fabricado	66
Figura 56. Esquema do método experimental	68
Figura 57. Primeira montagem experimental.....	69
Figura 58. Segunda montagem experimental.....	70
Figura 59. Curva de calibração do sensor	71
Figura 60. Detalhe de objeto preso pelo micromanipulador	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

STM	“Scanning Tunneling Microscope”
MEMS	Sistemas Micro-eletromecânicos
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
MEF	Método de Elementos Finitos
EDM	“Electrical Discharge Machining” (Eletroerosão)
SMA	“Shape Memory Alloy”
CCD	“Charge-coupled device”
CAD	“Computer Aided Design”
PI	Proporcional Integral

LISTA DE SÍMBOLOS

T	vetor tensão mecânica
D	vetor deslocamento elétrico
S	vetor deformação mecânica
E	vetor campo elétrico
ϵ^S	matriz de constantes dielétricas para deformação constante
c^E	matriz de rigidez elástica para campo elétrico constante
e	matriz de coeficientes piezelétricos
u	vetor deslocamento
<i>t</i>	tempo (s)
<i>x</i>	coordenada x
<i>y</i>	coordenada y
ρ	densidade do material
Φ	vetor potencial elétrico
N	vetor da função de forma do deslocamento
U	vetor de deslocamento nodal
B_u	matriz deformação-deslocamento
B_{Φ}	matriz campo elétrico-deslocamento
F	vetor de esforços mecânicos
Q	vetor de cargas elétricas
[M]	matriz de massa
[K]	matriz de rigidez
ω	freqüência de excitação
E	módulo de elasticidade
I	vetor de corrente elétrica
Z	vetor da impedância elétrica
V	vetor da diferença de potencial elétrico
E	módulo de elasticidade
<i>v</i>	coeficiente de Poisson

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias aparece sempre aliado às necessidades constantes da indústria, como a busca por maior precisão e exatidão, por exemplo [1]. A Engenharia de Precisão surgiu a partir da Engenharia Mecânica, seguida pela microtecnologia e mais recentemente nanotecnologia. A miniaturização de elementos mecânicos e elétricos permite o desenvolvimento de sistemas com alta integração, cada vez menores e ao mesmo tempo de elevado desempenho.

Dadas as inúmeras possibilidades de aplicação dos MEMS há atualmente um grande interesse na indústria em montagem e fabricação precisa de pequenos componentes, variando de alguns milímetros até micrômetros; em função disso surge um interesse crescente no desenvolvimento de instrumentos em escala micrométrica [2].

Sistemas de micro-manipulação capazes de realizar pequenos movimentos com precisão e alta exatidão de posicionamento possuem um grande potencial de aplicações na indústria. Tipicamente são empregados na indústria de semicondutores na área de montagem de circuitos integrados, em biotecnologia na manipulação de células e em Medicina na área de cirurgia automatizada.

Em aplicações industriais essas manipulações são feitas através de microscópicos óticos e sondas ou pequenas pinças. Operar um sistema de micro-manipulação diretamente sem a assistência de uma interface é um trabalho difícil, custoso e tedioso, pois há vários tipos de efeitos nessa escala, que em escala macroscópica são desprezíveis. Métodos automatizados estão sendo desenvolvidos, para aumentar a eficiência, a confiabilidade e reduzir os custos do processo.

Um bom mecanismo micro-manipulador deve ser capaz de agarrar objetos de diferentes formatos com alta precisão e exatidão de posicionamento [3]. Os

manipuladores também devem ter um controle acurado da força de agarro para evitar danos nos delicados micro-objetos.

O componente central em um micro-manipulador é o seu atuador que fornece força para o mecanismo poder agarrar objetos. Vários princípios de atuação são atualmente utilizados como, por exemplo: eletrotermomecânicos, eletrostáticos, piezelétricos, eletromagnéticos e memória de forma [6, 7, 8, 11]. Para que os micro-manipuladores executem movimentos da amplitude necessária para a realização da tarefa, é necessário, em geral, amplificar a saída dos atuadores, e para isso são utilizadas estruturas elásticas ou mecanismos flexíveis [13].

2 OBJETIVO E MOTIVAÇÃO

Este trabalho tem como objetivo a concepção e simulação em elementos finitos de um micro-manipulador com atuação piezelétrica que possua três graus de liberdade, além da fabricação de um protótipo para validação dos resultados simulados a partir do comando do usuário, realizado por meio de uma interface computacional.

A motivação deste trabalho é o atual desenvolvimento dos sistemas micro-eletromecânicos e sua crescente importância para aplicações em Engenharia Mecatrônica.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A seguir estão descritas as bases teóricas utilizadas nesse trabalho, bem com um resumo do desenvolvimento atual de micro e nanomanipuladores.

3.1 MICROMANIPULAÇÃO

3.1.1 Áreas de Aplicação

Alguns exemplos típicos de objetos manipulados em escala micrométrica são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Objetos típicos em micro-montagem

<i>Classe</i>	<i>Exemplos</i>	<i>Tamanho</i>
Elementos mecânicos	Engrenagens, anéis	50 – 1000 μm
Elementos micro-ópticos	Lentes, espelhos	100 – 700 μm
Elementos fibrosos	Fibra óptica	20 – 1000 μm

3.1.2 Requisitos

Escalamento da força

Um problema recorrente em micro-manipulação envolve as forças de adesão, que ganham maior importância em relação às forças gravitacionais, já que estas reduzem proporcionalmente com a redução do volume do objeto, enquanto as forças de adesão reduzem proporcionalmente com a área da superfície do objeto. Isto significa que os objetos não mais se soltam por efeito da gravidade.

Precisão e Centralização

Tolerâncias de montagem reduzidas implicam em posicionamento e centralização precisos. Isto significa que um dispositivo de micro-manipulação deve

não apenas alocar o objeto, mas também posicioná-lo com boa precisão e repetibilidade.

Flexibilidade das áreas de aplicação

O dispositivo de micro-manipulação deve ser facilmente adaptável às diferentes formas e superfícies dos objetos a serem manipulados. Assim evita-se a necessidade de troca de sistema de agarramento, processo geralmente complexo ou inviável.

Vácuo e salas limpas

Micro-sistemas devem ser sempre montados sob condições mínimas de pureza do ar, em chamadas salas limpas. A presença de pequenas partículas no ar pode prejudicar e interferir no desempenho do sistema.

A partir destas particularidades retiram-se os requisitos básicos de um dispositivo para micro-manipulação:

- Tamanho compacto,
- Força controlável,
- Funcionamento confiável para apanhar e soltar,
- Domínio das forças de adesão,
- Capacidade de centralização e posicionamento,
- Flexibilidade frente a objetos de dimensões variadas.

3.1.3 Princípios de Atuação

Nesta seção são apresentados diversos princípios de atuação para dispositivos de manipulação, atualmente empregados na indústria.

Sucção

Amplamente utilizados, os dispositivos de manipulação por sucção seguram o objeto através da diferença de pressão. Objetos com superfícies lisas podem ser facilmente manipulados.

Adesão

Sobretudo para objetos sensíveis com superfícies planas são utilizados dispositivos de adesão, as quais usam a aderência entre duas superfícies para manter o objeto segurado. Podem ser utilizados materiais adesivos ou então fluidos que permitam a adesão das extremidades do dispositivo.

Magnético

O uso de dispositivos de manipulação magnéticos se restringe aos materiais magnetizáveis. São de construção simples e possuem boa dinâmica. A grande vantagem deste princípio são as baixas tensões elétricas necessárias.

Eletrostático

Estes dispositivos são compostos por uma placa de metal carregada por alguns milhares de volts, envolta em um dielétrico. Ou mais efetivamente, por várias placas dispostas lado a lado, também envoltas em dielétrico. Apesar das grandes voltagens, pouca corrente é necessária para o trabalho do dispositivo. Entretanto o desprendimento do objeto é geralmente lento, pois a tensão se desfaz lentamente.

Forma

Este princípio para manipulação é raramente empregado. A geometria dos elementos manipuladores se adapta ao objeto a ser manipulado, o que resulta em pequena pressão sobre o objeto.

Mecânicos

O princípio mais amplamente empregado é o mecânico devido à sua flexibilidade frente aos objetos manipuláveis e às condições exteriores. São realizáveis no campo da micro-tecnologia, porém seu desenvolvimento nesta área ainda é pequeno. Podem ser subdivididos de acordo com o movimento de atuação (retilíneo, circular, unilateral, etc.), desenvolvimento da força (progressivo,

constante), tipo de atuador (eletrostático, magnético, piezelétrico, etc.) e o número de elementos manipuladores. O movimento obtido com o atuador é transformado no movimento de manipulação por meio de um mecanismo mecânico.

3.1.4 Princípios de atuação para micro-manipulação

Abaixo são apresentados os principais princípios empregados em sistemas de micro-manipulação:

- Memória de forma (Shape Memory Alloy - SMA)
- Piezelétrico
- Eletromagnético

Na Tabela 2 são listadas as principais vantagens e desvantagens dos princípios citados acima.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos princípios de atuação

Princípio	Vantagens	Desvantagens
SMA	-Grande densidade energética -Grande deformação -Flexibilidade de usos -Baixa tensão necessária -Pode ser feito com um único material	-Efeito térmico, portanto uso restrito a determinadas temperaturas -Tempo de reação lento
Piezelétrico	-Boa dinâmica -Forças elevadas -Baixa potência necessária para regime estático	- Construção complexa -Aquecimento em regime dinâmico
Eletromagnético	-Ausência de histerese -“know-how” disponível do nível macroscópico	-Aquecimento -Necessidade de guia mecânico -Construção complexa -Miniaturização restrita

3.2 EFEITO PIEZELÉTRICO

3.2.1 Princípio Físico

3.2.1.1 Efeito direto

O efeito piez elétrico direto descreve o fenômeno observado em certos tipos de materiais de surgimento de cargas elétricas (polarização) decorrente da aplicação de uma pressão mecânica. Este efeito pode ser melhor compreendido, observando-se as principais características dos materiais piez elétricos:

- Os materiais piez elétricos são isolantes ou dielétricos.
- O cristal é anisotrópico, isto é, não possui centros de simetria.
- Em decorrência da anisotropia, o cristal possui um eixo de polarização.

O surgimento das cargas elétricas fica evidente na fFigura 1 a seguir. Num cristal homogêneo e simétrico, uma deformação mecânica não resulta em alterações do equilíbrio de cargas. Já num cristal assimétrico há um acúmulo de cargas na superfície decorrente da deformação.

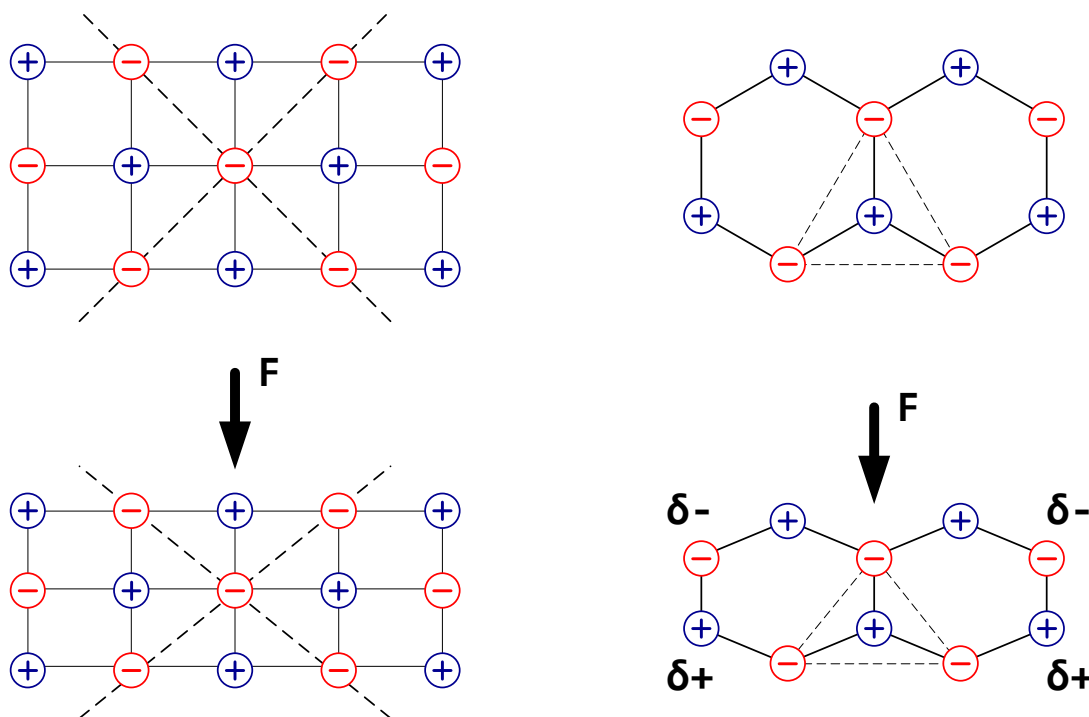


Figura 1. Cristal isotrópico (esquerda) e cristal anisotrópico.

O efeito piezelétrico direto é observável em mais de uma direção. Se o eixo de polarização do cristal estiver colinear à direção de deformação, atua o efeito longitudinal (Figura 2); se estiverem ortogonais, predomina o efeito transversal (Figura 3).

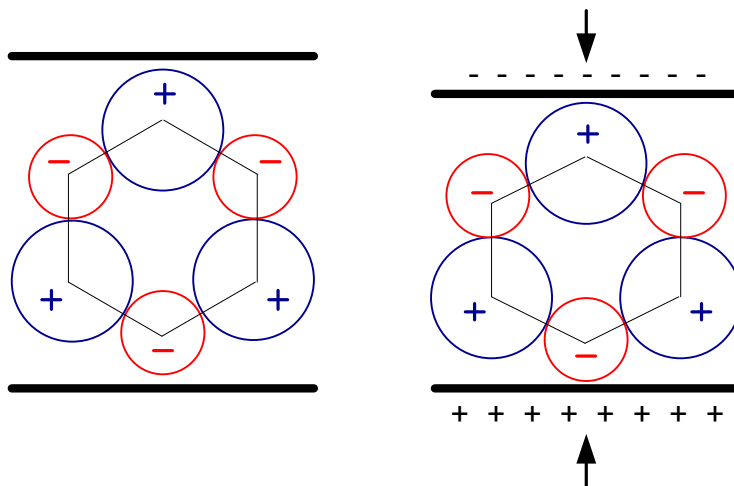


Figura 2. Efeito direto longitudinal

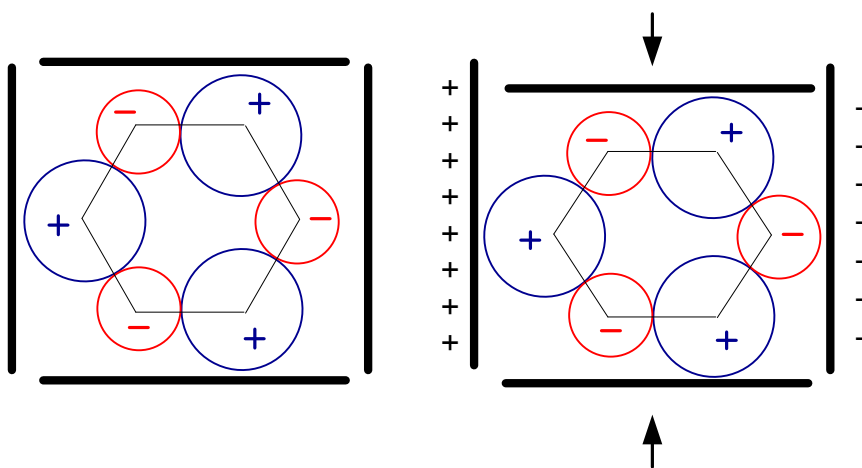


Figura 3. Efeito direto transversal

3.2.1.2 Efeito inverso

O efeito piezelétrico inverso é recíproco ao efeito direto, isto é, ele descreve o fenômeno da deformação de certos tipos de materiais sob aplicação de um campo elétrico.

Um dipolo elétrico é formado por duas cargas, uma positiva e uma negativa. Uma polarização pode ser alcançada de diversas formas. Uma molécula de água, por exemplo, possui uma **polarização permanente**. Em outros casos, um átomo apolar sob efeito de um campo elétrico sofre uma **polarização espontânea**, que desaparece na ausência do campo. Para o efeito piezelétrico, apenas o efeito de polarização permanente é importante. Sem a presença do campo elétrico, os dipolos estão dispostos de forma estocástica e orientados de forma a neutralizar eventuais cargas. Aplicando-se um campo elétrico sobre o dipolo, este tende a alinhar-se com a direção das linhas de campo, então surgem cargas na superfície do material, a este efeito dá-se o nome de **polarização orientada**.

No plano macroscópico pode-se falar em domínios de Weiss, ou seja, regiões de dipolos elétricos com orientação similar que formam assim um dipolo macroscópico, que por sua vez se distribuem aleatoriamente pelo cristal (Figura 4a), de forma que as cargas estejam neutralizadas. O tratamento de polarização permite que uma polarização permanente da cerâmica seja construída. Para isto aplica-se um campo elétrico (da ordem de kV por milímetro de comprimento) gradualmente progressivo à cerâmica a temperaturas pouco abaixo da temperatura de Curie, na direção e sentido desejados para a polarização. O material se expande de acordo com a tensão e os dipolos se alinham ao campo aplicado (Figura 4b). Assim após a retirada da tensão criou-se uma polarização permanente (Figura 4c) na cerâmica, a qual pode ser danificada se forem excedidos os limites mecânicos, térmicos ou elétricos do material, caracterizando-a assim um material piezelétrico.

Ao aplicar-se então um campo elétrico à cerâmica piezelétrica no sentido da polarização, alinham-se os domínios novamente e o cristal se deforma no sentido do eixo de polarização.

O material piezelétrico mais utilizado é o titanato zirconato de chumbo (PZT), pois o efeito piezelétrico encontrado em materiais naturais como o quartzo, a turmalina, por exemplo, são insignificantes. No PZT estas características foram melhoradas, através da polarização. A Figura 5 ilustra a estrutura do material em seu estado natural (Cúbica de Face Centrada) e após o processo de polarização (Tetragonal).

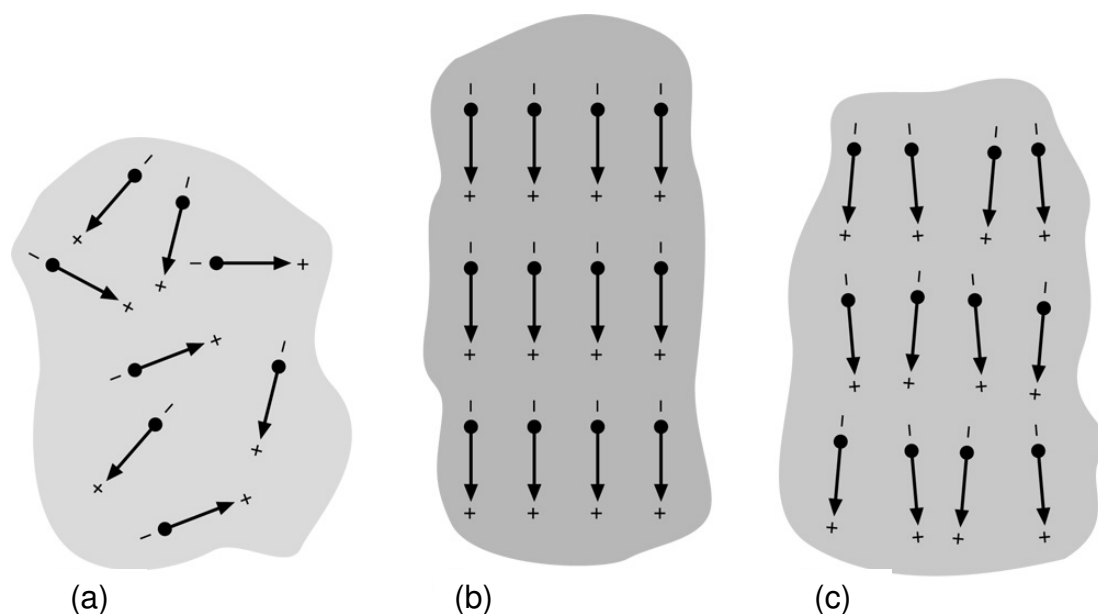


Figura 4. Processo de polarização: (a) distribuição aleatória dos dipolos, (b) polarização total, (c) polarização permanente

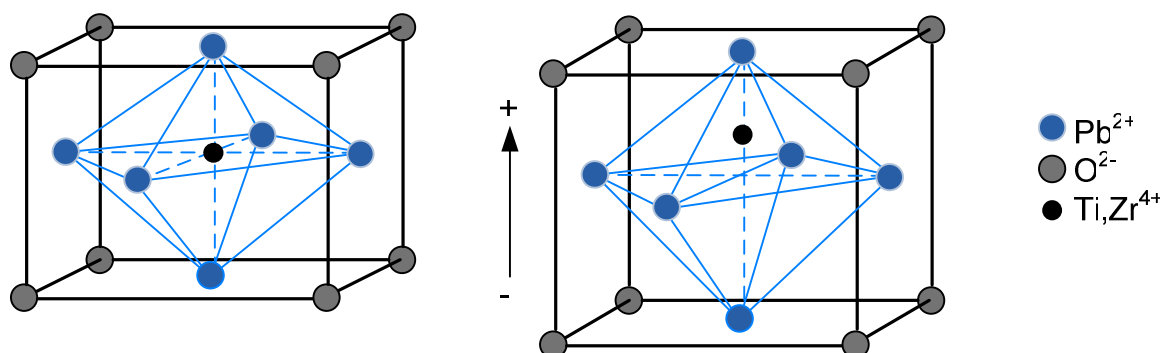


Figura 5. Estrutura de uma célula unitária de PZT não-polarizada (esquerda) e polarizada

Assim como no efeito direto, o efeito inverso também permite deslocamentos longitudinais ou transversais (Figura 6), de acordo com a orientação do eixo de polarização.

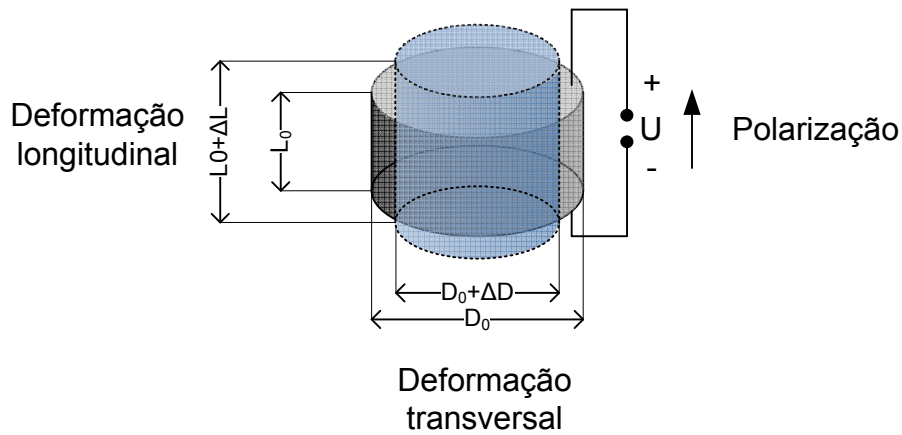


Figura 6. Deformação longitudinal e transversal para o efeito inverso

3.2.2 Equações constitutivas

As equações constitutivas do efeito piezelétrico são apresentadas abaixo:

$$[T] = [c^E][S] - [e]^T \{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [\epsilon^S]\{E\} + [e][S] \quad (2)$$

onde:

$[T]$ é a matriz tensão mecânica,

$[S]$ é a matriz deformação mecânica,

$\{E\}$ é o vetor campo elétrico,

$\{D\}$ é o vetor deslocamento elétrico,

$[c^E]$ é a matriz de rigidez elástica obtida a campo elétrico constante,

$[e]$ é a matriz piezelétrica de tensão mecânica

$[\epsilon^S]$ é a matriz dielétrica obtida a deformação constante.

Em forma matricial obtém-se:

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & -e^T \\ e & \epsilon^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S \\ E \end{Bmatrix} \quad (3)$$

No caso tridimensional temos:

$$\{\mathbf{T}\} = \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix}, \quad \{\mathbf{D}\} = \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix}, \quad \{\mathbf{S}\} = \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{23} \\ S_{13} \\ S_{12} \end{Bmatrix} \text{ e } \{\mathbf{E}\} = \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}$$

com os tensores de rigidez elástica, piezelétrico e dielétrico definidos como:

$$[\mathbf{c}^E] = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{e}]^T = \begin{bmatrix} 0 & e_{31} & 0 \\ 0 & e_{33} & 0 \\ 0 & e_{31} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_{15} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } [\boldsymbol{\epsilon}^S] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^S & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix}$$

Os valores das constantes são encontrados na literatura.

3.3 MECANISMOS PARA MICROMANIPULAÇÃO

Buscando manipular microestruturas diversas arquiteturas foram desenvolvidas nos últimos anos, uma síntese desses mecanismos flexíveis é apresentada nos próximos tópicos.

3.3.1 Mecanismos flexíveis

Mecanismos flexíveis são mecanismos onde o movimento é dado pela flexibilidade da estrutura ao invés da presença de juntas e pinos. Por não apresentarem montagem de componentes, esses sistemas não têm folgas entre os componentes o que aumenta consideravelmente a sua precisão.

Eles têm grande aplicação em dispositivos de mecânica de precisão, área biomédica, e mais recentemente na construção de sistemas micro-eletromecânicos (“MEMS” em inglês).

3.3.2 Posicionadores

Mesa XY: realiza o posicionamento de micro-elementos num plano. Existem diversos tipos no mercado como o Nano-Mini (Figura 7) que possibilita o posicionamento em XY utilizando dois atuadores piezelétricos, atingido 10 μ m de movimento. Esse posicionador é baseado na amplificação mecânica, utilizando mecanismos flexíveis. Por não ter atrito e não apresentar folga entre as peças é possível obter alta precisão com incremento de movimento da ordem de nanômetros.



Figura 7. Microposicionador XY (Nano-Mini)

Mesa XY (Figura 8): utiliza quatro atuadores piezelétricos para movimentar a mesa no plano e provocar uma pequena rotação. Este mecanismo também se utiliza da amplificação mecânica com uma estrutura flexível. Para gerar a rotação na mesa o mecanismo se utiliza da combinação de movimentos de seus atuadores.

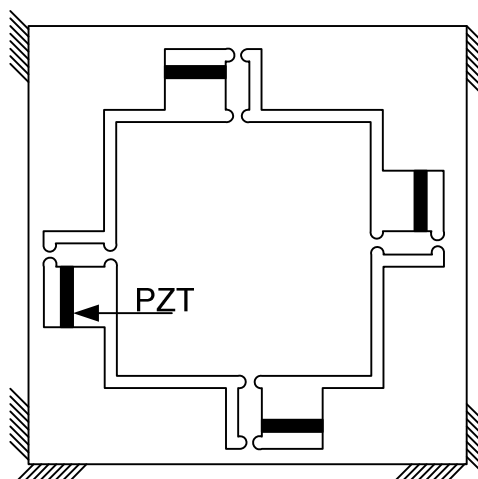


Figura 8. Posicionador XY com quatro piezelétricos

Mesa paralela com 6 graus de liberdade (Figura 9): através de seis atuadores piezelétricos agindo em eixos diferentes realiza o posicionamento de uma mesa no espaço. Um exemplo é o NEXLINE Piezo Hexapod que suporta uma translação de 10 mm nos eixos XYZ e 6° graus de rotação da mesa.



Figura 9. NEXLINE Piezo Hexapod

3.3.3 Manipuladores

Garra: apresenta apenas um grau de liberdade que atua no movimento para agarrar os objetos. A garra utiliza apenas um atuador para gerar o movimento fechar/abrir do mecanismo. Diversos tipos de arquitetura foram propostos buscando aumentar a amplitude do movimento sem danificar a garra. Uma das opções é utilizar um

atuador translacional (Figura 10) que amplifica o movimento abrir e fechar de uma garra flexível. Outra opção é colocar um atuador cujo movimento principal esteja na mesma direção do movimento abrir e fechar da garra (Figura 11).

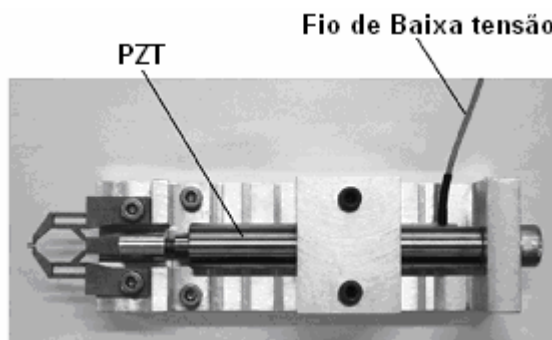


Figura 10. Garra utilizando um piezelétrico de translação

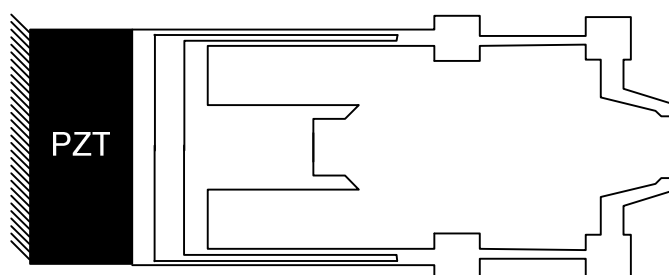


Figura 11. Garra piezelétrica

Braço: mecanismo que apresenta vários graus de liberdade podendo se deslocar no espaço e agarrar objetos. Existem diversas arquiteturas, uma delas é utilizar apenas uma peça onde diversos piezoelétricos acionam a estrutura amplificando o movimento final através de uma estrutura flexível (Figura 12). Outra opção é utilizar uma combinação de peças para evitar a interferência de movimentos, ou mesmo utilizar os dois princípios (Figura 13).

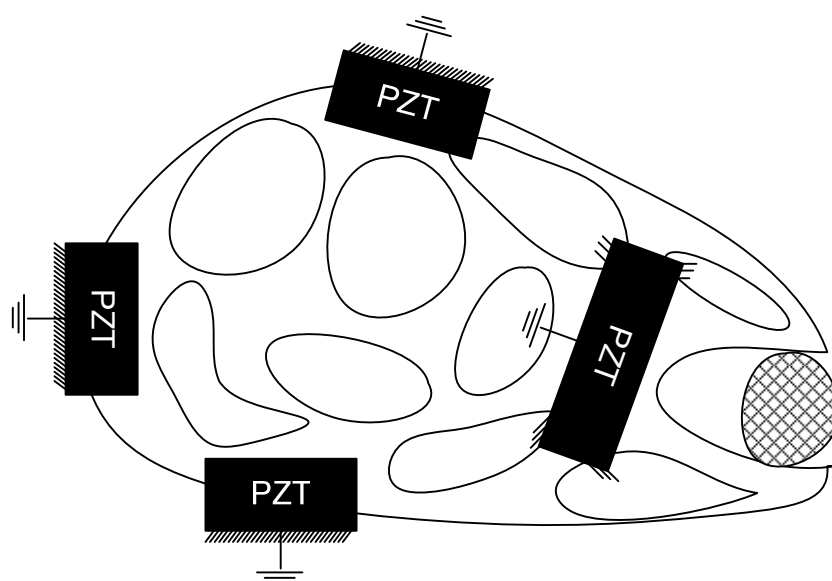


Figura 12. Braço piezelétrico construído em uma única peça

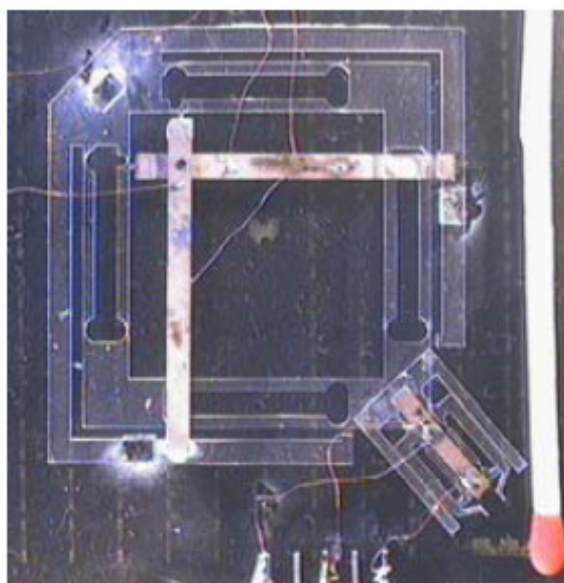


Figura 13. Braço piezelétrico com duas peças e amplificação mecânica

Pinça: três piezelétricos atuam três hastes que geram o movimento na ponta do instrumento num volume de trabalho cilíndrico (Figura 14).

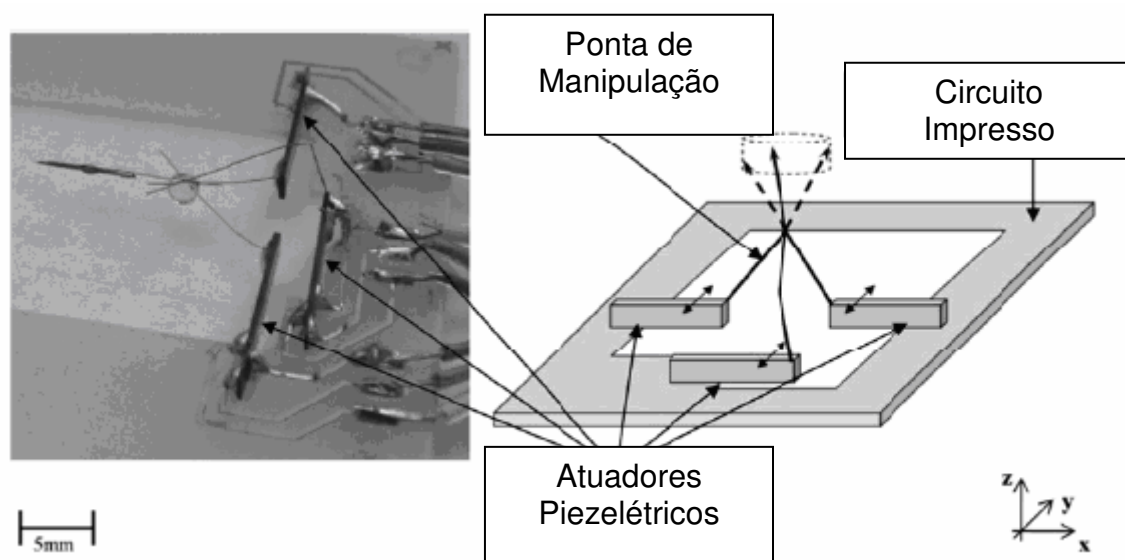


Figura 14. Pinça piezelétrica

3.4 METODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Os sistemas físicos são representados por equações diferenciais e muitas vezes encontrar a solução dessas equações é uma tarefa árdua ou muitas vezes impossível. Nesse sentido, métodos numéricos surgiram ao longo do tempo e continuam a ser desenvolvidos, entre eles temos: Método de Diferenças Finitas, Método de Elementos Finitos, Método de Volumes Finitos, Método de Elementos Finitos Estendidos, Método de Elementos no Bordo, etc.

Atualmente o método mais utilizado na Engenharia para modelar comportamentos físicos é o Método de Elementos Finitos. Esse método já se encontra muito bem desenvolvido e implementado em diversos softwares comerciais como: ABAQUS, ANSYS e LS-DYNA.

Esse método aproxima a resolução de equações diferenciais através de uma discretização do domínio através de elementos. Esses elementos representam funções de base sobre os quais as equações físicas são aproximadas por um problema linear. Assim o método através de operações matriciais obtém a resposta final sobre todos os nós do sistema.

3.4.1 MEF Piezelétrico

Considerando um domínio piezelétrico no qual se pretende determinar o campo de deslocamento u e o campo elétrico Φ . O problema de elementos finitos piezelétrico é definido através das propriedades físicas que regem esses campos e as suas condições limites.

Esse método aproxima a resolução de equações diferenciais de equilíbrio e constitutivas através de uma discretização do domínio através de elementos. Esses elementos são interconectados nas suas bordas por nós. O conjunto desses elementos define a malha do problema.

Para cada elemento, os campos de deslocamentos e potencial elétrico são definidos somente nos seus nós. Através de um processo de interpolação utilizando funções de base, o problema físico original é aproximado por um sistema linear. Através de uma interpolação da seguinte forma:

$$w = \hat{w} = \sum N_i a_i$$

Sendo w a solução procura, \hat{w} solução aproximada, N_i função de base definida no nó, a_i valor do parâmetro no nó. Para a formulação do MEF piezelétrico, o deslocamento e o potencial são aproximados para cada elemento, sendo dados por:

$$u = N_u^T U_e$$

$$\Phi = N_\Phi^T \Phi_e$$

Na qual N_u é o vetor da função de forma do deslocamento, N_Φ é o vetor da função de forma do potencial elétrico e ambos são funções interpoladoras de Lagrange. U_e é o vetor de deslocamento nodal para um elemento e Φ_e é o vetor de potencial elétrico nodal para um elemento e podem ser descritos como:

$$U_e = \begin{Bmatrix} U_{x1} \\ U_{y1} \\ U_{z1} \\ U_{x2} \\ \vdots \\ U_{xi} \\ U_{yi} \\ U_{zi} \end{Bmatrix}, \quad \Phi_e = \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_i \end{Bmatrix}$$

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

A seguir exemplifica-se a construção das matrizes que são utilizadas pelo software de elementos finitos para modelar cada elemento de um sistema piezelétrico. Procede-se da seguinte maneira: as matrizes responsáveis pelo comportamento mecânico, elétrico e de acoplamento piezelétrico são definidas separadamente e no fim juntam-se as três contribuições num sistema matricial.

Para modelar o comportamento mecânico, a equação de equilíbrio é obtida através da segunda lei de Newton:

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

Na qual ρ é a densidade do material, \mathbf{T} o vetor tensão mecânica, \mathbf{u} vetor de deslocamentos (nas direções x , y e z) e $\nabla \cdot$ é o operador definido por:

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

Considerando apenas os efeitos mecânicos nas equações constitutivas do efeito piezelétrico, podemos relacionar o vetor tensão mecânica \mathbf{T} com o vetor deformação \mathbf{S} :

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S}$$

onde \mathbf{c}^E é a matriz de rigidez elástica obtida a campo elétrico constante

O vetor deformação mecânica \mathbf{S} pode ser relacionado com os deslocamentos nodais \mathbf{u} , através da matriz deformação-deslocamento \mathbf{B}_u .

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}_u \mathbf{u}$$

Na qual a matriz \mathbf{B}_u é dada por:

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

Aplicando a formulação variacional no sistema descrito, obtém-se a equação mecânica resultante para cada elemento da malha.

$$\mathbf{M}_{uu}^e \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_{uu}^e \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{uu}^e \mathbf{U} = \mathbf{F}^e$$

$$\mathbf{M}_{uu}^e = \rho \iiint_{\Omega_e} \mathbf{N}_u^T \mathbf{N}_u dV \text{ - matriz de massa}$$

$$\mathbf{C}_{uu}^e \text{ - matriz de amortecimento}$$

$$\mathbf{K}_{uu}^e = \iiint_{\Omega_e} \mathbf{B}_u^T \mathbf{c} \mathbf{B}_u dV \text{ - matriz de rigidez mecânica:}$$

$$\mathbf{F}^e \text{ - vetor forças externas}$$

$$\mathbf{U} \text{ - vetor de deslocamento de cada nó}$$

No caso de um sistema elétrico o comportamento é descrito pela equação de Maxwell em que o gradiente do vetor deslocamento elétrico é igual à zero

($\text{div } \vec{D} = 0$). Considerando-se somente os efeitos elétricos nas equações constitutivas do fenômeno piezelétrico, o vetor deslocamento elétrico D e o vetor campo elétrico E se relacionam da seguinte forma:

$$D = \epsilon^s E$$

onde ϵ^s é a matriz dielétrica obtida a deformação constante.

Por outro lado, o campo elétrico E pode ser relacionado com o potencial elétrico de cada nó Φ , através da matriz campo elétrico-deslocamento B_Φ definidos abaixo:

$$E = -B_\Phi \Phi$$

$$B_\Phi = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Similarmente, aplicando a formulação variacional para o sistema elétrico descrito, obtém-se o sistema elétrico resultante para cada elemento da malha.

$$K_{\Phi\Phi}^e \Phi = Q^e$$

$$K_{\Phi\Phi}^e = \iiint_{\Omega_e} B_\Phi^T \epsilon B_\Phi dV \text{ - matriz de rigidez dielétrica}$$

Q^e - vetor de cargas elétricas

Φ - vetor de potencial elétrico em cada nó

Porém no caso de estruturas piezelétricas, além dessas equações, existe o acoplamento entre o comportamento mecânico e elétrico definido pela matriz de coeficientes piezelétricos e . Dada pelas relações abaixo:

$$T' = -e^T S$$

$$D' = eE$$

Utilizando as matrizes campo elétrico-deslocamento \mathbf{B}_Φ e deformação-deslocamento \mathbf{B}_u e a formulação variacional, o sistema de acoplamento dos efeitos piezelétricos é definido por:

$$\mathbf{K}_{u\Phi}^e \Phi = \mathbf{F}^e$$

$$\mathbf{K}_{u\Phi}^{eT} \mathbf{U} = \mathbf{Q}^e$$

$$\mathbf{K}_{u\Phi}^e = \iiint_{\Omega_e} \mathbf{B}_u^T \mathbf{e} \mathbf{B}_\Phi dV, \text{ matriz de acoplamento piezelétrico}$$

As matrizes definidas até o momento devem ser rearranjadas para todo o domínio do problema, obtendo as seguintes matrizes:

$$\mathbf{K}_{uu} = \sum_e \mathbf{K}_{uu}^e$$

$$\mathbf{M} = \sum_e \mathbf{M}^e$$

$$\mathbf{K}_{u\Phi} = \sum_e \mathbf{K}_{u\Phi}^e$$

$$\mathbf{K}_{\Phi\Phi} = \sum_e \mathbf{K}_{\Phi\Phi}^e$$

$$\mathbf{F} = \sum_e \mathbf{F}^e$$

A equação resultante do problema piezelétrico é obtida somando-se as três contribuições (mecânica, elétrica e de acoplamento) descritas acima, 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:

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

3.4.1.1 Análise Estática

A simulação piezelétrica utiliza a análise estática para determinar os deslocamentos obtidos para uma determinada diferença de potencial. Nesse sentido, ela é importante para verificar o deslocamento e a movimentação da estrutura piezelétrica em diferentes condições de utilização.

Para a análise estática, efeitos inerciais e de movimento são ignorados com exceção de efeitos externos como a gravidade. Nesse caso a equação piezelétrica se simplifica na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\Phi} \\ K_{u\Phi}^T & K_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix}$$

A solução do sistema matricial fornece o potencial elétrico e o deslocamento em todos os nós.

3.4.1.2 Análise Modal

Para verificar a influência da frequência de atuação se faz necessário o uso de uma análise modal para verificar as frequências naturais do mecanismo, pois as cerâmicas piezelétricas são excitadas por tensões elétricas senoidais.

A determinação das frequências de ressonância é feita a partir dos autovalores do sistema abaixo e os seus respectivos autovetores definem os modos de vibrar da estrutura.

$$\begin{bmatrix} K_{uu} - \omega^2 M & K_{u\Phi} \\ K_{u\Phi}^T & K_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ Q \end{Bmatrix}$$

Desse modo podemos encontrar as diversas frequências naturais da estrutura e evitar que o sistema entre em ressonância prejudicando o funcionamento do mecanismo.

3.5 ESTRATÉGIA DE COMANDO DE MEMS PIEZELÉTRICOS

O comando de MEMS piezelétricos é realizado por referência de tensão, fornecida por uma fonte de tensão e corrente contínuas (fonte DC) e pode ser feito de três maneiras:

Comando direto: o deslocamento do mecanismo é ajustado diretamente na fonte de tensão que fornece energia aos atuadores.

Controle remoto: o operador utiliza uma interface (geralmente microscópico ou uma câmera) para visualizar o micro-sistema e um controle transfere o movimento do homem para o mecanismo.

Comando automático: sensores são usados para medir a posição da garra, dessa maneira podem ser feitos controles em malha fechada.

Um dos problemas dos atuadores eletromecânicos é a determinação da força que a garra exerce no objeto. A determinação dessas forças é de extrema importância para evitar a destruição das microestruturas, e também do manipulador. Com o uso de sensores pode-se determinar os deslocamentos dos elementos e as forças aplicadas pelos micro-manipuladores. Alguns métodos utilizados são:

Sistema integrado de LEDs emissores e receptores associado a um sistema eletrônico de tratamento e transmissão: através do deslocamento relativo entre as garras do manipulador ocorre uma variação de tensão dos LEDs localizados entre as garras. Após uma calibração no aparelho pode-se determinar a função entre a tensão nos LEDs , o deslocamento da garra e a força aplicada pelo manipulador.

Sensores “Strain-Gauge”: esses sensores são colocados onde existem as maiores tensões nos braços dos manipuladores e através de um controle do tipo PI a força exercida pelo manipulador e o deslocamento entre as garras são controlados.

Visão computacional: utilizando uma câmera CCD e algoritmos computacionais, deslocamentos de todos os elementos podem ser medidos. Podendo assim, definir trajetórias e estimar forças do micro-manipulador.

3.6 FABRICAÇÃO

O tamanho reduzido do protótipo, e o nível de detalhamento são fatores decisivos para a escolha do método de fabricação adequado. O processo selecionado foi o de eletroerosão a fio (em inglês, “Wire EDM” ou “Wire Electrical Discharge Machining”), por agregar características fundamentais que são apresentadas a seguir.

Eletroerosão

A eletroerosão é um processo térmico de fabricação não-convencional. O conceito de eletroerosão utilizado atualmente surgiu a partir de observações de Joseph Priestly em 1770. Ele teria percebido que descargas elétricas tinham removido material de eletrodos em seus experimentos. Mais tarde, na década de 40 do século passado, pesquisadores soviéticos utilizaram-se deste conceito e desenvolveram um processo de fabricação que é a base da tecnologia atual.

Este processo é amplamente empregado na usinagem de peças com contornos complexos, em materiais de alta dureza, ponto de fusão bem definido, elevado calor latente, e em processos de difícil usinagem por processos convencionais; porém permite apenas a usinagem de peças isoladas, no máximo em pequenas séries, e é limitado pela necessidade do material ser condutor de eletricidade.

O processo básico de eletroerosão se caracteriza pela remoção de material conseqüente da sucessão de descargas elétricas que ocorrem entre um eletrodo e a peça, através de um líquido dielétrico. Estas descargas são evidentemente decorrência do fluxo de eletricidade. Cada descarga elétrica gera uma grande intensidade de calor, e elevada temperatura, da ordem de 8000° até 12000° Celsius,

o que é suficiente para derreter os materiais em questão. Estas descargas são cuidadosamente controladas e localizadas para que somente afetem a superfície do material, e em menor parte o eletrodo. O líquido dielétrico atua tanto na dissipação do calor quanto na remoção do material erodido.

Na **eletroerosão a fio**, o eletrodo em questão é um fio, geralmente feito à base de ligas de latão, e de diâmetro variando entre 0,02 até 0,33 mm, que é utilizado para cortar o perfil da peça previamente programado. O corte necessariamente atravessa toda a peça, sendo imprescindível então que o corte comece nas bordas, ou então que se abra um furo inicial. Não há contato mecânico entre o eletrodo e a peça.

O princípio de remoção da eletroerosão a fio é ilustrado a seguir.

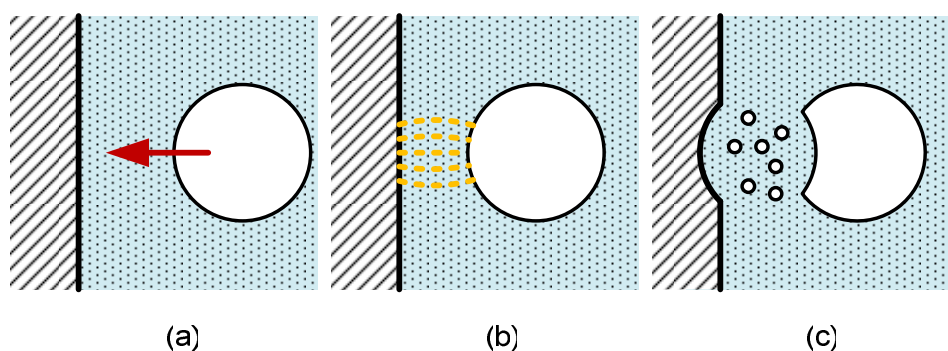


Figura 15. Princípio de remoção de material

Inicialmente, não há fluxo de eletricidade devido à presença do fluido dielétrico. Nesse instante, o fio avança em direção à peça (Figura 15a), até aproximar-se da distância conhecida como “gap” (do inglês, folga), que é definida como a distância mínima entre peça e ferramenta, na qual uma centelha é produzida. Esta aproximação ocasiona um aumento do campo elétrico. Rompe-se o isolamento do dielétrico e o eletrodo passa a atuar como condutor, e neste local acontece a descarga elétrica (Figura 15b). No início de cada descarga, alguns íons livres e elétrons serão acelerados, formando um canal de descarga. A corrente gerada torna-se capaz de circular e a faísca se estabelece entre o eletrodo e a peça, aquecendo os dois localmente e fazendo com que derretam. O fluido dielétrico que circula ao redor se aquece e evapora rapidamente, o que gera uma explosão local.

Isto faz com que o metal derretido se reduza a finas partículas (Figura 15c) que são carregadas pelo fluido que não vaporizou. O processo é contínuo gerando um sulco na peça que cresce gradualmente ao longo do deslocamento do fio que é alimentado continuamente, pois este também sofre erosão, porém em menor escala.

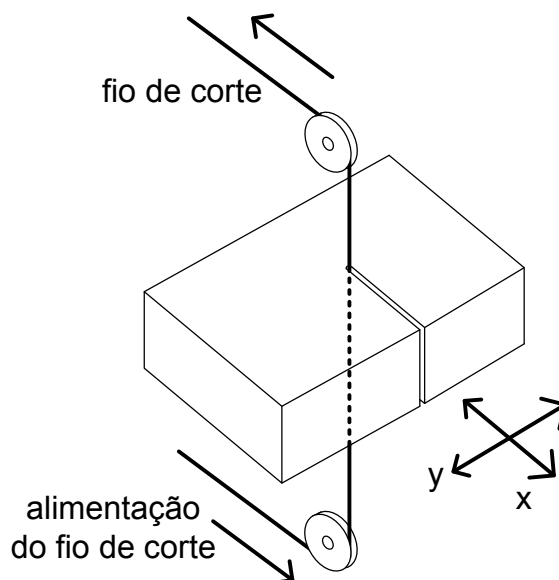


Figura 16. Esquema de uma máquina de eletroerosão a fio

A Figura 16 ilustra o funcionamento de uma máquina de eletroerosão a fio. O fio de corte é alimentado por bobinas produzidas a partir de uma liga de latão. Os fios mais modernos também são revestidos com uma fina camada de estanho, que aumenta a velocidade de corte e a resistência do fio. Uma alternativa são os fios de molibdênio que apresentam maior resistência à tração. A máquina é composta por um sistema elétrico, um sistema mecânico de posicionamento e além disso um sistema de circulação do dielétrico. O fluido dielétrico pode ser comumente água deionizada, petróleo ou óleo mineral. A mesa realiza movimentos em X e Y, mas há soluções com mesa fixa, nas quais o portal se movimenta.

4 SIMULAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS

Para analisar os mecanismos piezelétricos utiliza-se o software ANSYS que permite calcular os deslocamentos e as tensões mecânicas máximas para verificar a viabilidade do mecanismo flexível. Será dada atenção principalmente às tensões máximas de von Mises, deslocamentos máximos e mínimos e modos de ressonância.

ANSYS é um dos softwares comerciais mais usados na Engenharia para resolução de problemas que envolvem MEF. Para realizar uma análise num programa de elementos finitos são necessárias em geral três fases: pré-processamento, solução e pós-processamento.

4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

Vários procedimentos devem ser feitos para criar um modelo:

- **Modelagem da estrutura através da construção de um modelo 3D:** Para a modelagem da estrutura de alumínio e das barras piezelétricas foi utilizado o software CATIA V5. O modelo foi importado para o software ANSYS através do seguinte caminho: **File > Import > Catia V5**.
- **Definição das propriedades dos materiais que serão utilizados:** deve-se informar ao programa as propriedades de cada material através do atalho **Preprocessor > Material Props > Material Models**. Abaixo são apresentadas as propriedades dos materiais utilizados neste trabalho.

Alumínio	
E (módulo de elasticidade)	$6,859 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Densidade	2700 Kg/m^3
Coeficiente de Poisson	0,35
Limite de escoamento	12,7 MPa

Cerâmica piezelétrica classe 5A – simetria de 6 mm	
Densidade	7650 Kg/m ³
Permissividade	$\begin{bmatrix} 8,1066 & 0 & 0 \\ 0 & 7,3455 & 0 \\ 0 & 0 & 8,1066 \end{bmatrix} 10^{-9} F / M$
Rigidez Elástica ¹⁾	$\begin{bmatrix} 12,5 & 7,52 & 7,54 & 0 & 0 & 0 \\ 7,52 & 11,1 & 7,52 & 0 & 0 & 0 \\ 7,54 & 7,52 & 12,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,26 \end{bmatrix} 10^{10} N / m^2$
Limite de Escoamento	100 MPa
Constantes piezelétricas ¹⁾	$\begin{bmatrix} 0 & -5,4 & 0 \\ 0 & 15,8 & 0 \\ 0 & -5,4 & 0 \\ 12,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12,3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C/m^2$

¹⁾-Os valores apresentados levam em consideração uma cerâmica na horizontal (Figura 17)

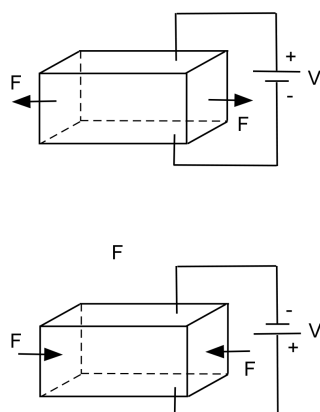


Figura 17. Cerâmica piezelétrica na posição horizontal

- **Definição dos tipos de elementos que serão utilizados na simulação:** O tipo de cada elemento define o número de graus de liberdade e o número de nós por elemento e a forma dos elementos que vão discretizar o modelo. Dois elementos foram utilizados ao longo desse trabalho (**Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete**):

SOLID 226: elemento cúbico com vinte nós e graus de liberdade de um elemento piezoeletrico (posições espaciais e voltagem).

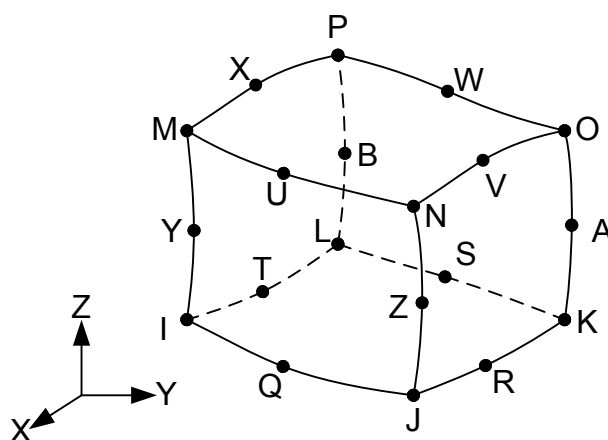


Figura 18. Elemento ANSYS SOLID 226

SOLID45: elemento estrutural com oito nós com formato cúbico.

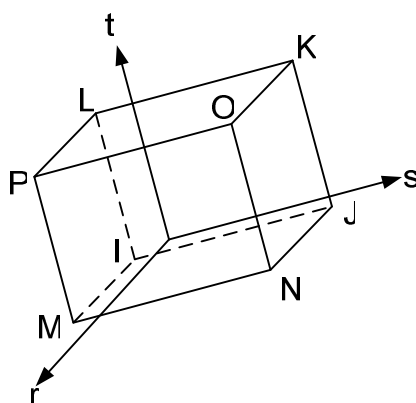


Figura 19. Elemento ANSYS SOLID45

- **Criação de um sistema de coordenadas local para cada piezelétrico:** para cada atuador piezelétrico que não se encontra na posição horizontal é necessário criar um sistema de coordenadas local através do comando **WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > By 3 Keypoints+**
- **Seleção das características do sistema:** para as diferentes estruturas selecionam-se os respectivos atributos (material, elemento e sistema de coordenada de referência) pela função **Preprocessor > Meshing > Meshing Attributes > Picked Volumes**.
- **Conexão entre os piezelétricos e a estrutura:** a conexão entre os atuadores piezelétricos e o restante da estrutura é feita através do comando **Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Volumes**.
- **Criação da malha do modelo:** a discretização da estrutura em elementos é realizada através da opção **Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep**.
- **Definição das condições limites:** finalmente é necessário definir as cargas aplicadas, isto é, selecionar as áreas engastadas e as diferenças de potencial aplicadas nos piezelétricos (**Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement e Volt**).

4.2 SOLUÇÃO

Deve-se escolher um tipo de análise a ser efetuada no sistema através do comando **Solution > New Analysis**. Trabalha-se com dois tipos: análise estática e análise modal.

- **Análise estática:** os efeitos inerciais e de amortecimento são ignorados com exceção de efeitos como a gravidade. Nesse caso encontra-se a solução de equilíbrio do sistema dadas as condições iniciais.

- **Análise modal:** tem como objetivo avaliar as frequências de ressonância do modelo.

4.3 PÓS-PROCESSAMENTO

Uma vez calculadas as soluções podem ser visualizados os resultados utilizando os comandos do ANSYS. Podendo determinar os deslocamentos, os potenciais elétricos e as tensões de von Mises, as frequências de ressonância e visualizar a estrutura deformada para os diferentes modos.

5 O PROJETO DO PROTÓTIPO

Os requisitos do mecanismo micromanipulador e as diversas soluções propostas são apresentados neste capítulo.

5.1 REQUISITOS

Os requisitos definidos para o projeto do mecanismo micromanipulador foram:

- Possuir três graus de liberdade e movimentação no plano XY
- Conter uma garra de manipulação
- Capacidade de centralização e posicionamento
- Atuação piezelétrica
- Tamanho compacto
- Alta precisão de movimento
- Tensão elétrica máxima de 100 V
- Uso de uma estrutura monolítica flexível
- Amplificação mecânica do movimento

5.2 SOLUÇÕES

As soluções basearam-se na utilização de juntas flexíveis com dois conceitos diferentes de amplificação:

Primeiro Conceito

Conceito tipo alavanca para uma amplificação do movimento obtido pela expansão da cerâmica piezelétrica. Para uma deformação δ da cerâmica obtém-se um deslocamento na extremidade da alavanca de aproximadamente $\delta (l + L)/l$

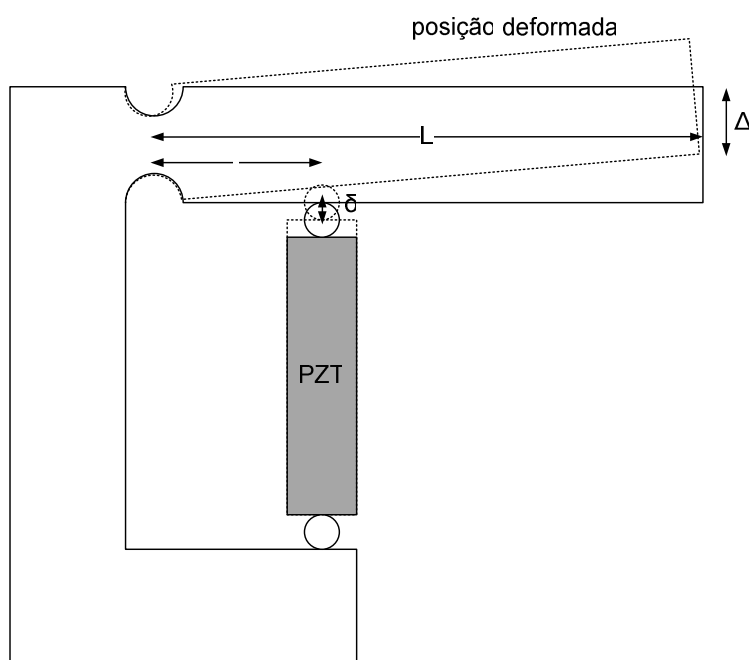


Figura 20. Esquema do primeiro conceito de amplificação

Segundo Conceito

Conceito tipo alavanca no qual uma junta flexível deforma-se permitindo uma amplificação na extremidade mesmo utilizando um piezelétrico de porte pequeno permitindo a construção de um mecanismo compacto. Nesse caso para uma deformação de δ da cerâmica piezelétrica obtém-se um deslocamento Δ de aproximadamente $(L \delta / x)$.

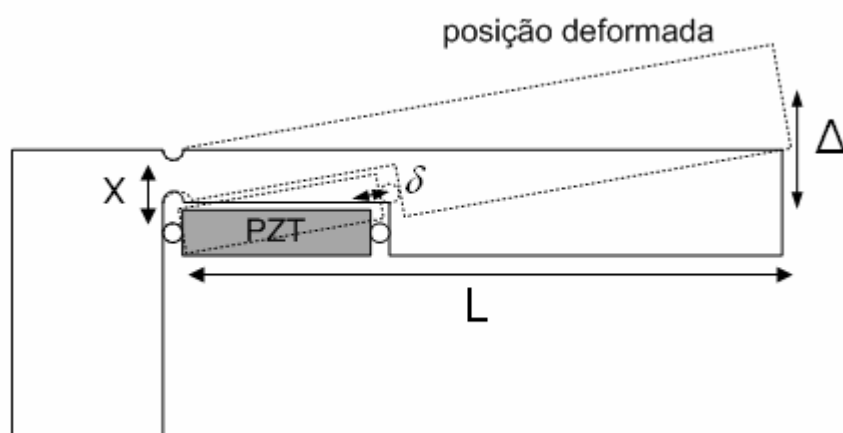


Figura 21. Esquema do segundo conceito de amplificação

5.2.1 Primeira Solução

Garra 1

Baseia-se na ação de três alavancas que se encontram no centro da estrutura e são defasadas espacialmente de 120° . Cada alavanca é acionada por uma cerâmica piezelétrica que utiliza o primeiro conceito de amplificação mecânica apresentado acima.

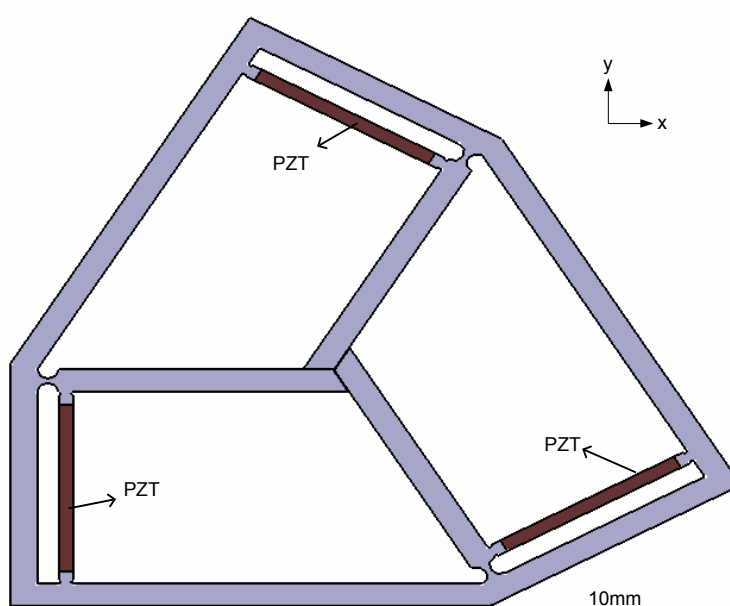


Figura 22: Desenho em CAD da garra 1

Essa garra apresenta um diferencial de ter uma maior área de trabalho em relação a uma garra tipo pinça. A aplicação de uma diferença de potencial nos atuadores provoca o movimento de abrir e fechar da garra como vemos na simulação em ANSYS apresentada na Figura 23. A figura ilustra ainda a distribuição de tensão elétrica no corpo das cerâmicas piezelétricas. O movimento apresentado está amplificado para melhor visualização.

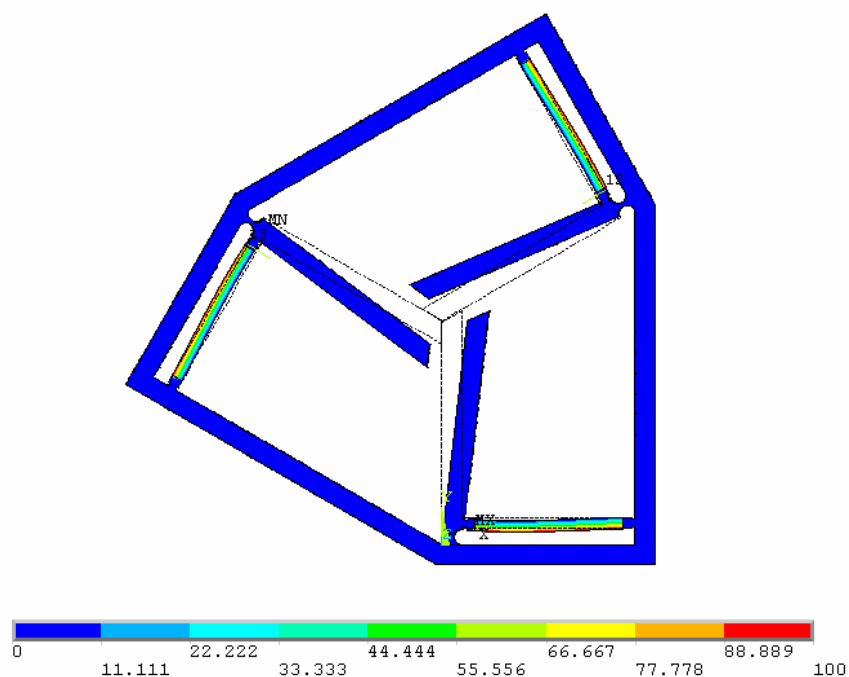


Figura 23. Resultado da aplicação de 100 V em cada cerâmica

Sistema 1

Unindo a garra 1 com duas alavancas num suporte serial obtém-se um mecanismo de movimentação em XY com a garra. Apesar de obter uma elevada amplificação o mecanismo posicionador apresenta uma grande interferência nos movimentos de translação nas direções X e Y, isto é, ao aplicar-se uma tensão em uma das cerâmicas com o intuito de obter-se um deslocamento numa coordenada observa-se um movimento indesejado na outra. A Figura 24 apresenta o sistema em desenho CAD. A Figura 25 apresenta o resultado da simulação da aplicação de uma diferença de potencial de 100 V na cerâmica piezelétrica vertical em termos de deslocamento em Y. Nota-se claramente que há um deslocamento indesejado em X na Figura 26. O centro da garra apresenta deslocamentos da ordem de $1,7 \mu\text{m}$ na horizontal e $2 \mu\text{m}$ na vertical. O que confirma a observação de alta interferência de movimento.

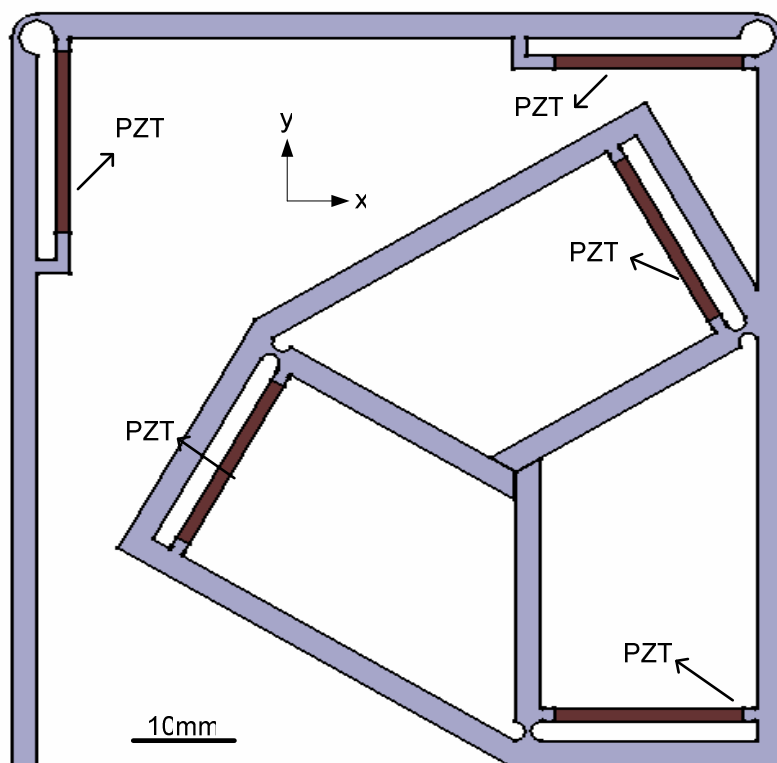


Figura 24. Desenho do sistema 1 de microposicionamento

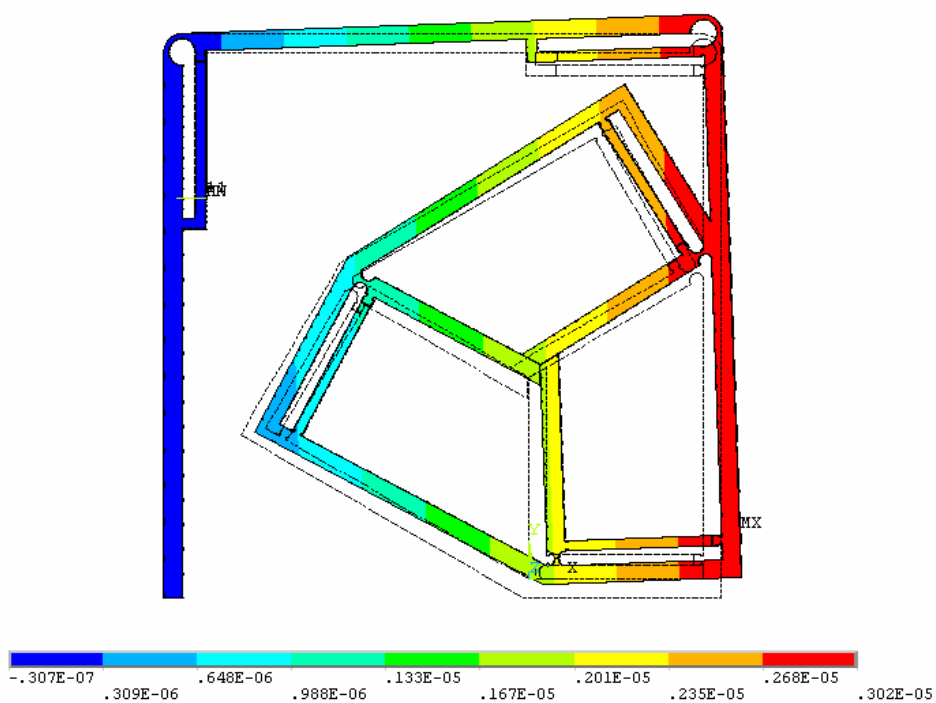


Figura 25. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical

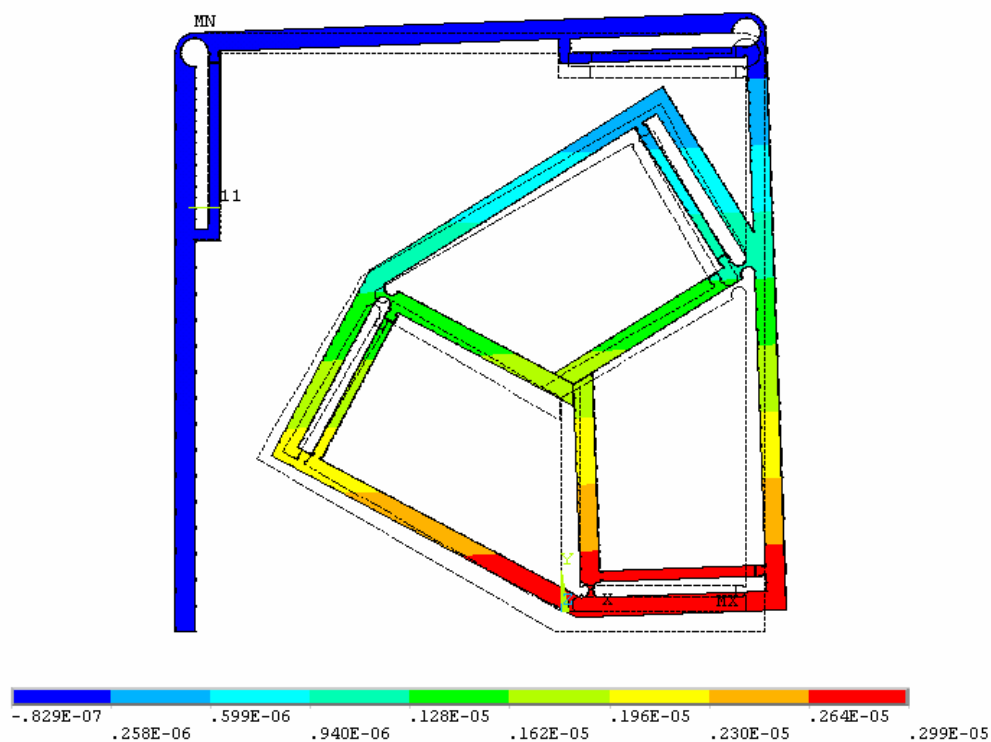


Figura 26. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical

5.2.2 Segunda Solução

Garra 2

Buscando uma garra de estrutura mais compacta e o uso de cerâmicas piezelétricas com menores dimensões a garra 2 foi concebida, utilizando-se o segundo conceito de amplificação, como demonstrado na Figura 27.

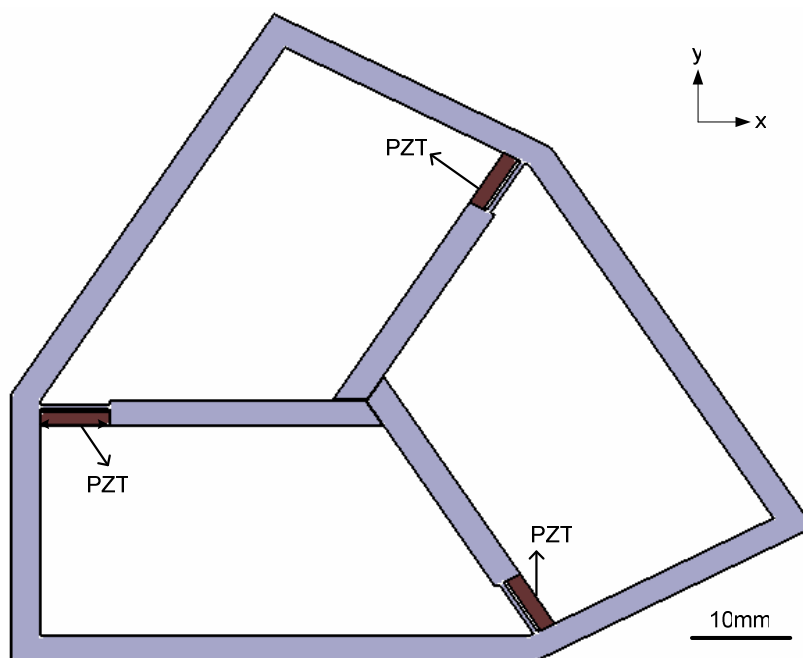


Figura 27. Desenho em CAD da garra 1

A Figura 28 apresenta o resultado simulado de deformação da estrutura para uma aplicação de 100 V em cada cerâmica piezelétrica. Pode-se notar novamente a distribuição de tensão elétrica variando de 0 a 100.

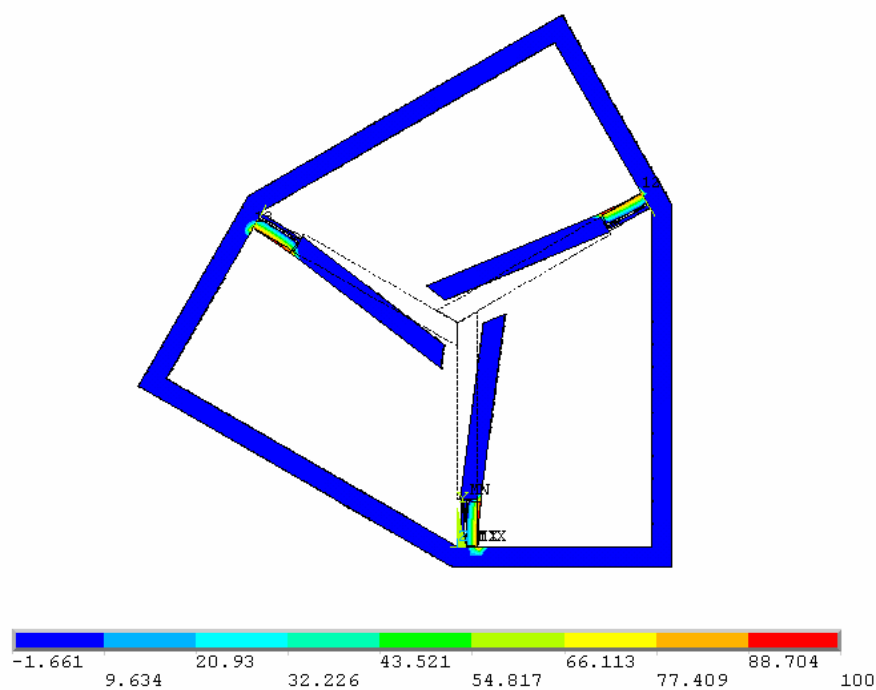


Figura 28. Resultado da aplicação de 100 V em cada cerâmica

Sistema 2

Da mesma forma que a garra, o mecanismo posicionador foi melhorado com uso de duas cerâmicas piezelétricas que foram dispostas perpendicularmente, obtendo-se um sistema mais robusto e compacto como apresentado na Figura 29. Entretanto este mecanismo não consegue resolver o problema das interferências, como se comprova pelas figuras Figura 30 e Figura 31. Há um movimento indesejado em X, ao se aplicar uma tensão de 100 V na cerâmica vertical, ou seja, os movimentos estão acoplados. Os deslocamentos são da ordem de $0,4\ \mu\text{m}$ na horizontal e de $0,3\ \mu\text{m}$ na vertical.

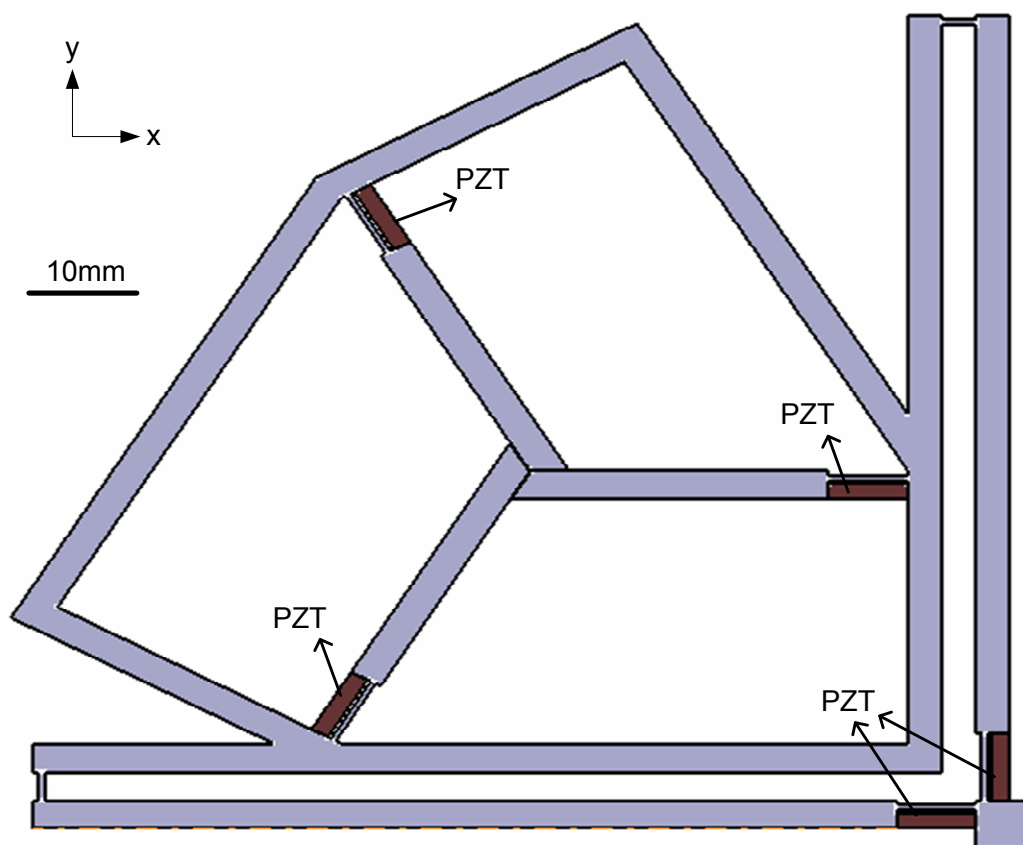


Figura 29. Desenho do sistema 2 de microposicionamento

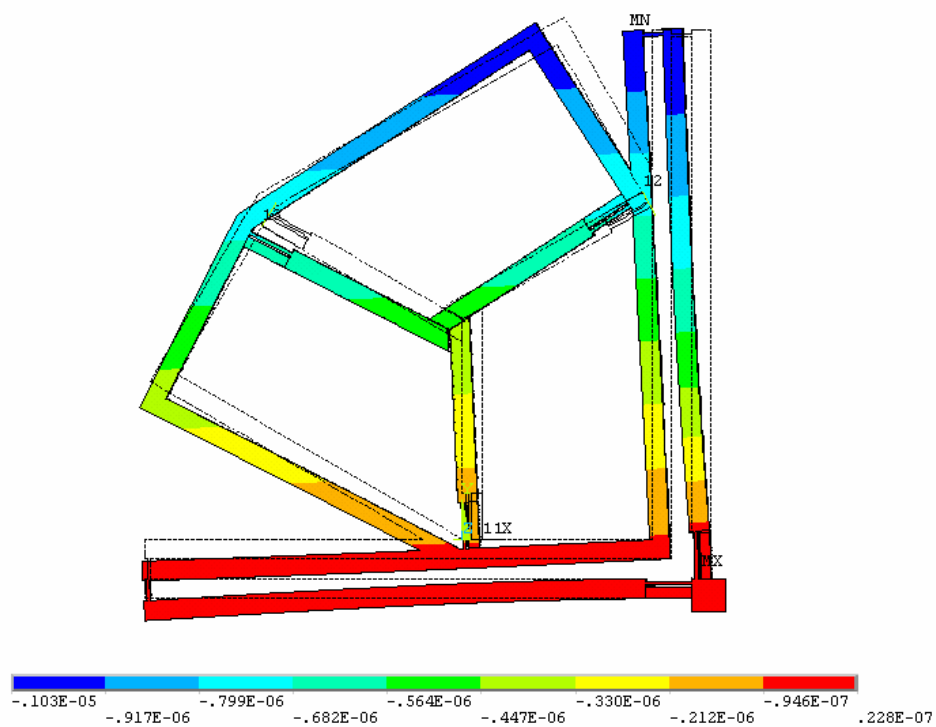


Figura 30. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical

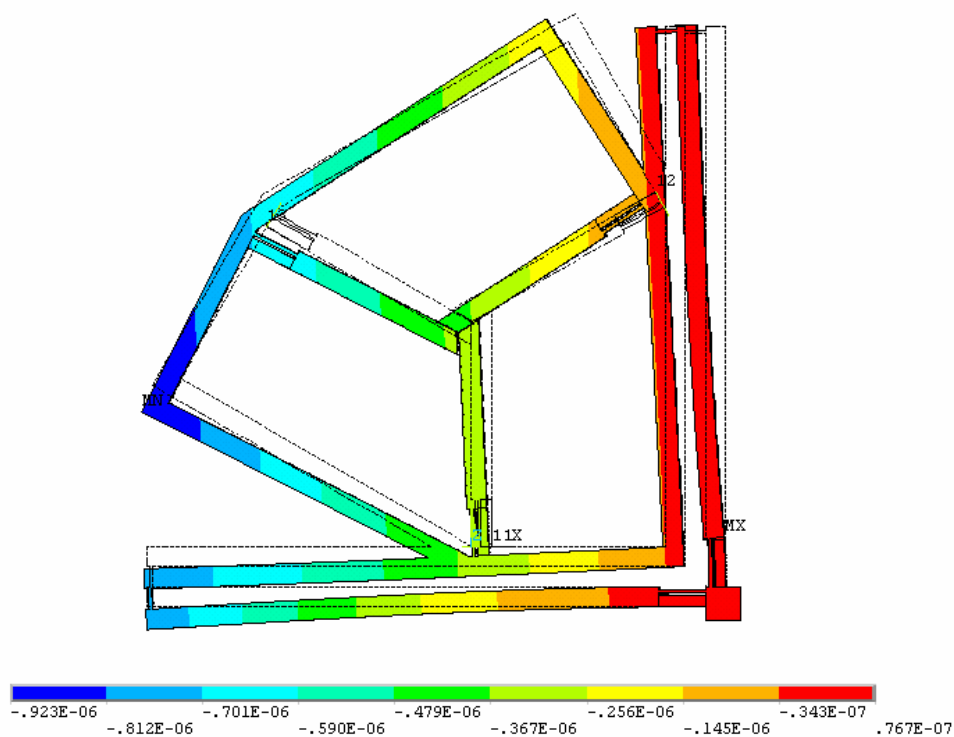


Figura 31. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical

5.2.3 Terceira Solução

Observando que os mecanismos propostos apresentavam uma grande interferência no posicionamento X Y, optou-se por utilizar uma solução de barras paralelas flexíveis que permitem o deslocamento paralelo da estrutura eliminando a rotação do objeto e atenuando a movimento da outra direção.

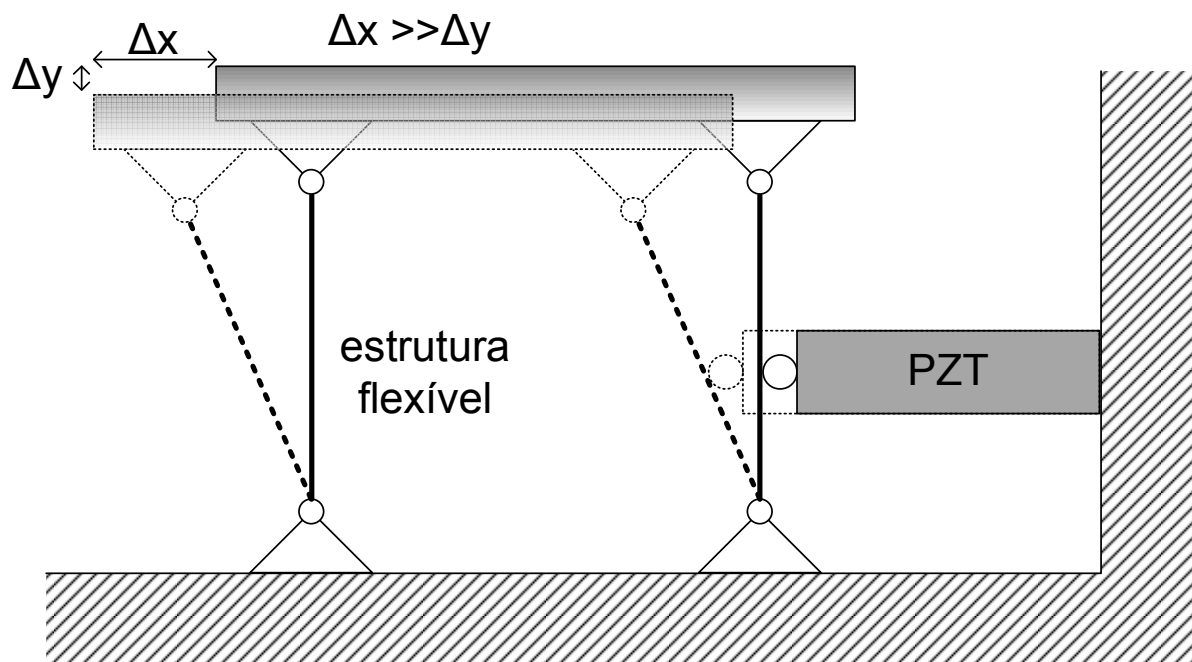


Figura 32. Mecanismo de barras paralelas flexíveis

A arquitetura da garra foi repensada buscando uma simetria e uma maior rigidez para que o acionamento das cerâmicas piezelétricas de posicionamento não influa na abertura da garra. O mecanismo de barras paralelas flexíveis foi empregado na tentativa de desacoplar os movimentos em X e Y. A Figura 33 ilustra o desenho em CAD desta estrutura.

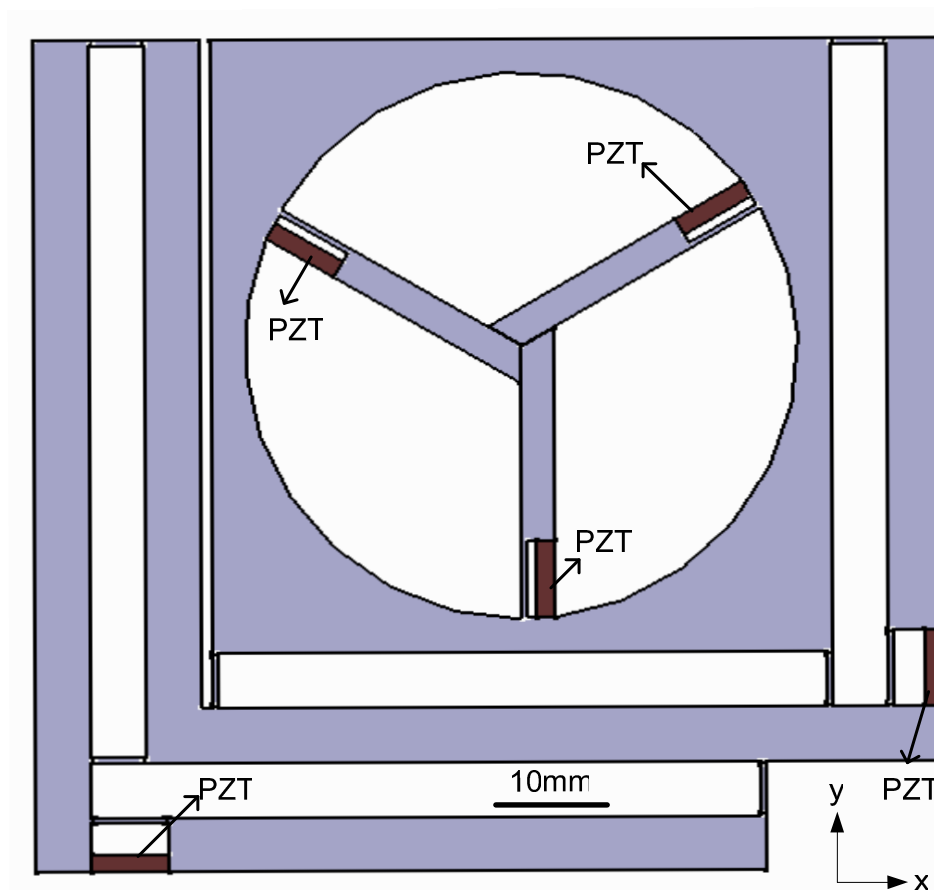


Figura 33. Desenho do terceiro sistema de microposicionamento

Foram realizadas diversas simulações com a estrutura, combinando a atuação de cada cerâmica piezoelétrica de posicionamento. Em seguida é analisado o mecanismo da garra, sob aplicação de tensões mais elevadas.

A Figura 34 apresenta a estrutura deformada em função da aplicação de 100 V na cerâmica horizontal, que controla o posicionamento na vertical. Nota-se um deslocamento vertical da ordem de $0,4 \mu\text{m}$, enquanto que na horizontal da ordem de $0,25 \mu\text{m}$.

Já a Figura 35 apresenta as deformações decorrentes de uma aplicação de 100 V na cerâmica de posicionamento vertical, que controla o deslocamento horizontal. Aqui se observa um deslocamento horizontal da ordem de $0,12 \mu\text{m}$ enquanto na vertical de apenas $0,03 \mu\text{m}$, comprovando a eficiência do mecanismo.

Finalmente a Figura 36 apresenta o deslocamento total em módulo da estrutura decorrente da aplicação de 100 V em cada cerâmica piezelétrica de posicionamento. No centro da estrutura obtêm-se deslocamentos da ordem de 0,5 μm , sendo aproximadamente 0,37 μm em cada direção.

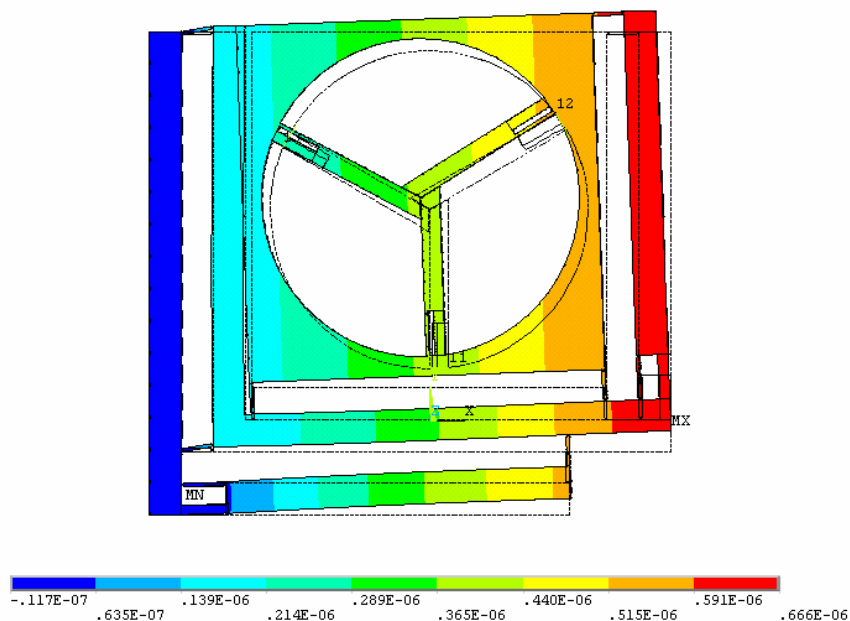


Figura 34. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica horizontal

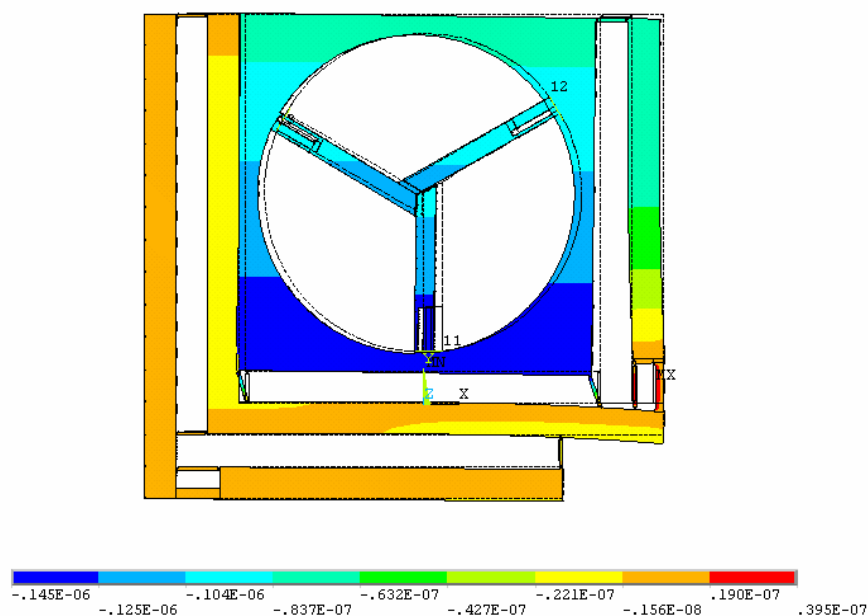


Figura 35. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical

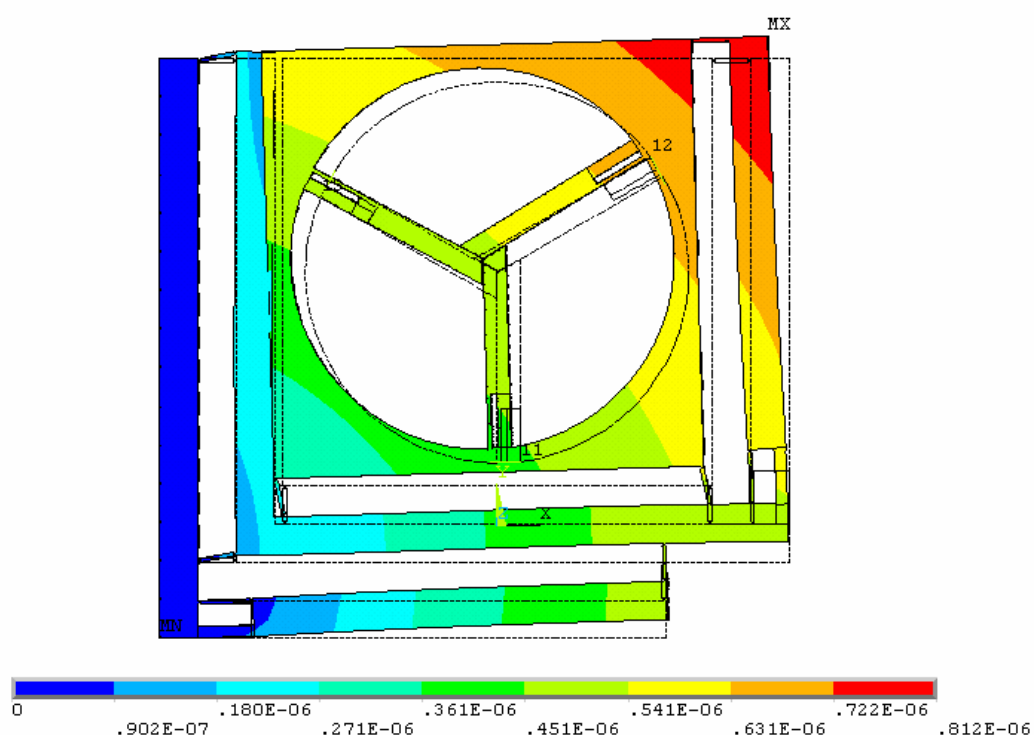


Figura 36. Deslocamento total em módulo devido a uma aplicação de 100 V em cada cerâmica

A Figura 37 abaixo mostra em detalhe a deformação da estrutura de forma exagerada para uma melhor visualização. Além disso, são apresentadas as tensões de von Mises decorrentes dessa deformação. O valor máximo obtido se encontra no contato entre a cerâmica e a estrutura e vale $1,8 \times 10^{-3}$ MPa, valor este que se encontra bem abaixo da tensão de escoamento dos materiais empregados.

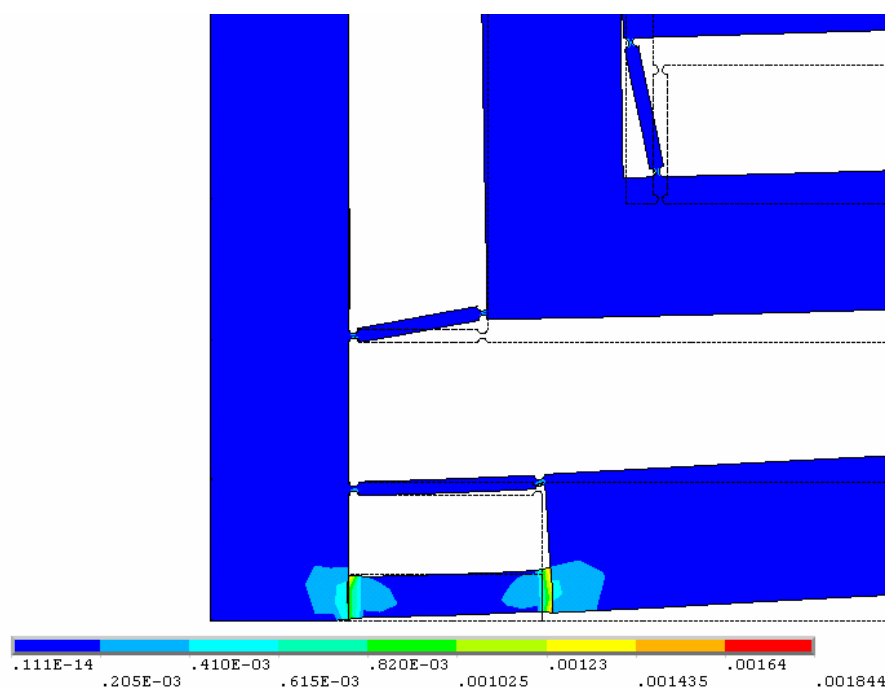


Figura 37. Tensão de von Mises e funcionamento do mecanismo flexível

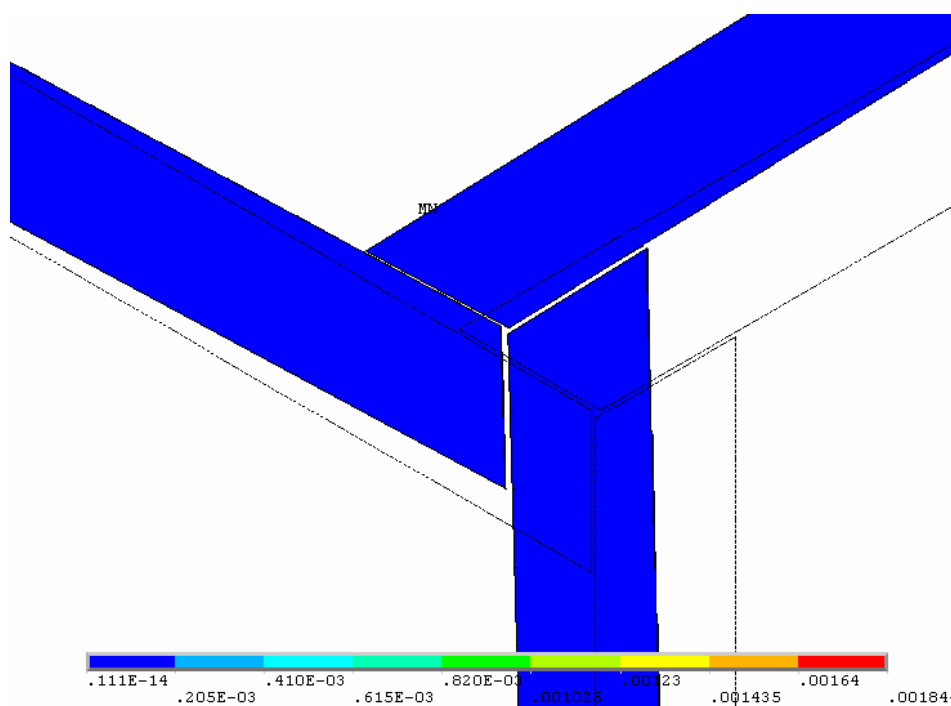


Figura 38. Deslocamento do centro da garra em função da aplicação das voltagens em ambas as cerâmicas

Por fim aplica-se alta tensão (1000V) nas cerâmicas piezelétricas das garras (Figura 39), para verificar as tensões de von Mises (Figura 40), e os máximos deslocamentos (Figura 41).

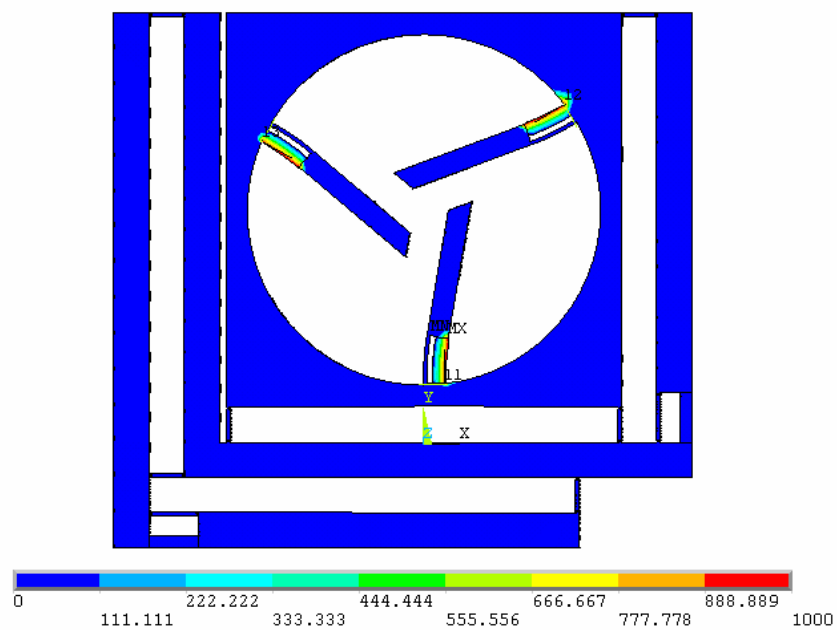


Figura 39. Distribuição de tensões elétricas nas cerâmicas

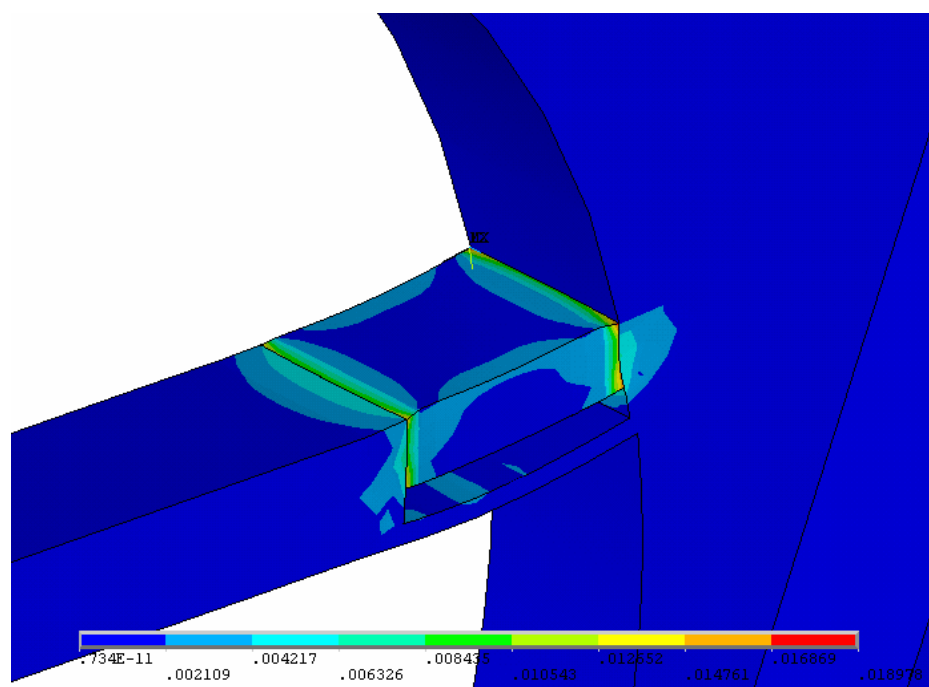


Figura 40. Tensões de von Mises no contato entre piezoeletrico e estrutura. Máximo: 0,02MPa

1

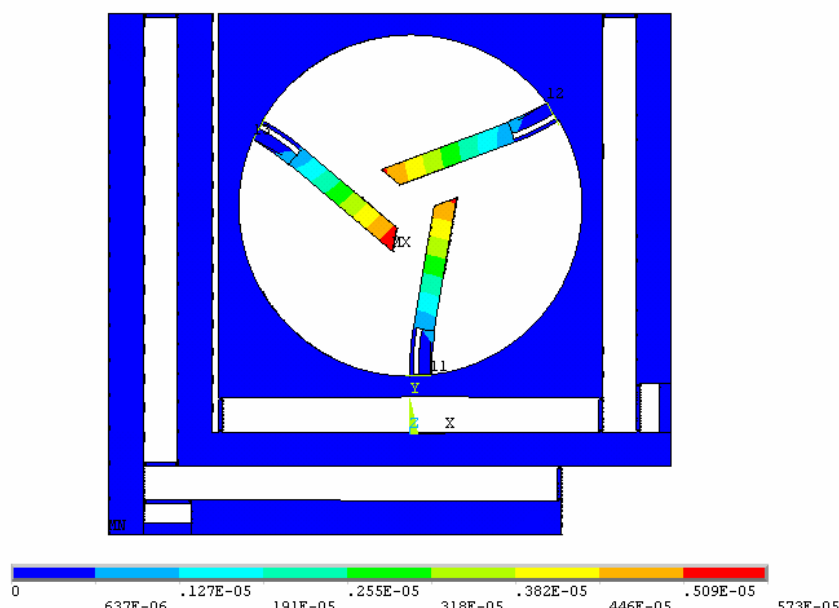


Figura 41. Deformação total das garras – Max. 5 µm

Verifica-se novamente que as tensões de von Mises ficam bem abaixo dos limites de escoamento.

O resultado das simulações sugere que o mecanismo adotado para o posicionamento funciona satisfatoriamente para os deslocamentos em X, porém ainda há certo acoplamento para os movimentos em Y.

5.2.4 Quarta Solução

Tendo em vista as considerações sobre acoplamento dos movimentos, a estrutura do sistema foi novamente aprimorada na tentativa de eliminar a interferência indesejável. O novo conceito (Figura 42) busca tornar a parte central do posicionador mais rígida, evitando deformações que antes se apresentavam na barra em formato L; a nova estrutura busca reforçar o laço estrutural e forma um quadrado que circunda a parte mais interna, que é responsável pelos movimentos horizontais.

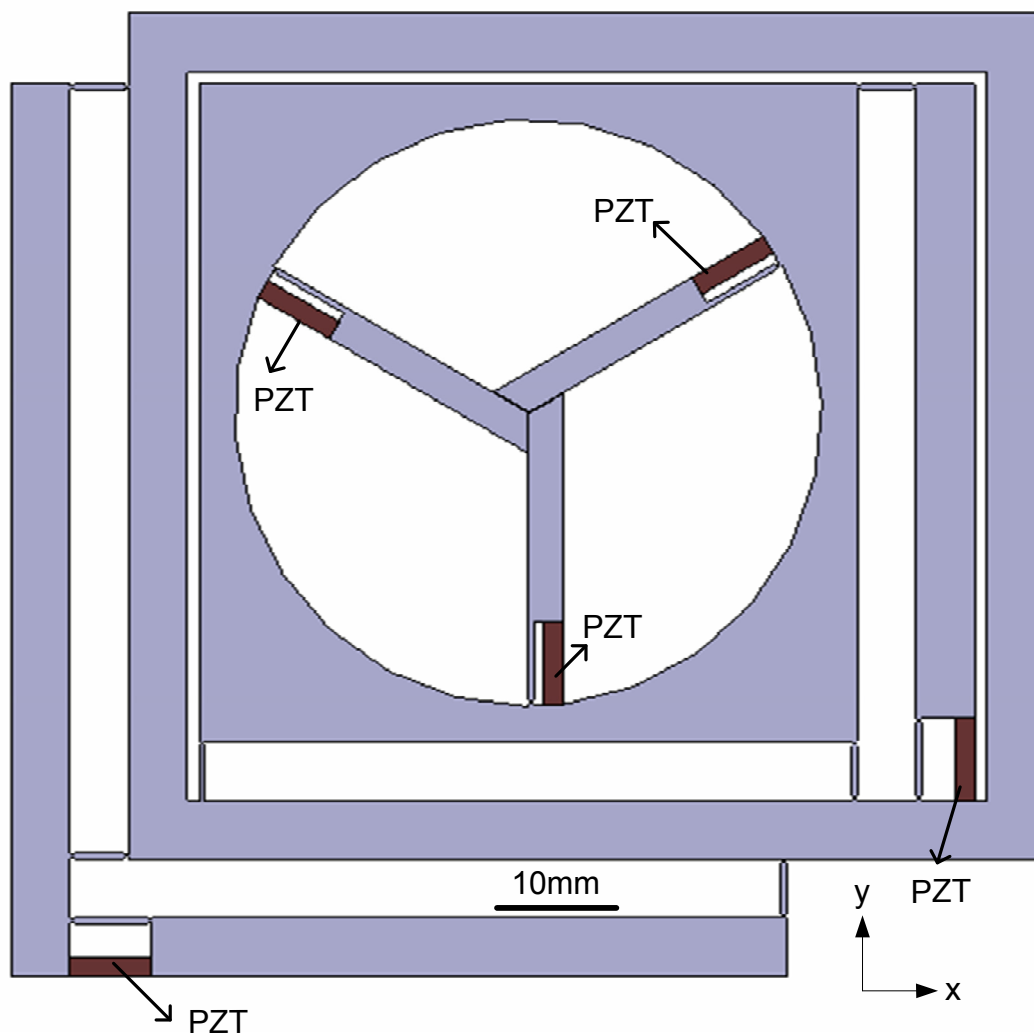


Figura 42. Desenho do quarto sistema de microposicionamento

Para verificar a eficácia da alteração, foram realizadas simulações, nas quais cada cerâmica de posicionamento é atuada isoladamente. Primeiramente aplicou-se uma tensão elétrica de 100V na cerâmica piezelétrica vertical, para deslocar a estrutura horizontalmente. Os deslocamentos obtidos são apresentados na Figura 43.

A Figura 44 apresenta em detalhe o deslocamento das extremidades da garra. O deslocamento máximo em X vale $0,19\ \mu\text{m}$, e em Y é de apenas $0,0076\ \mu\text{m}$. Nota-se então que o deslocamento horizontal é aproximadamente 25 vezes maior que o deslocamento indesejável na vertical.

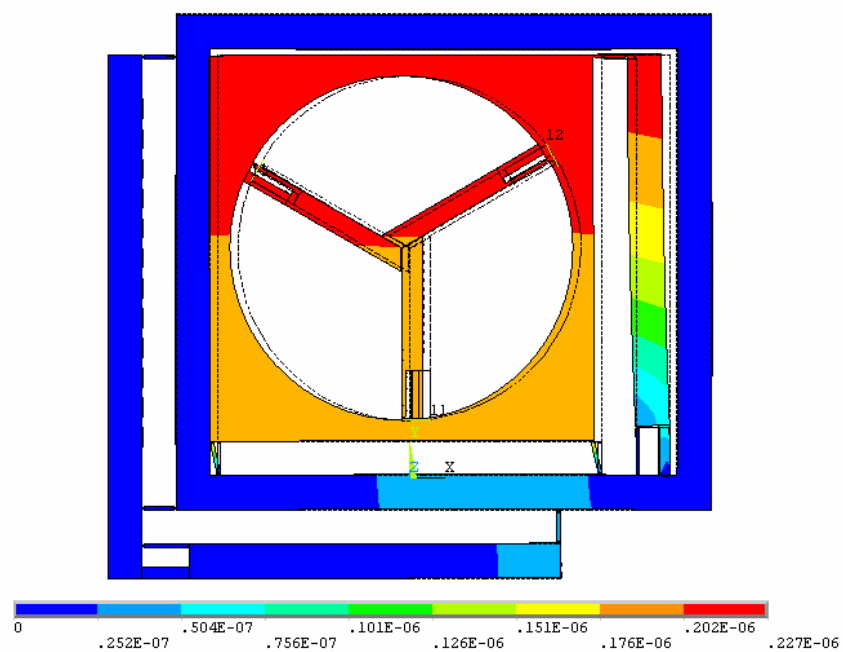


Figura 43. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical

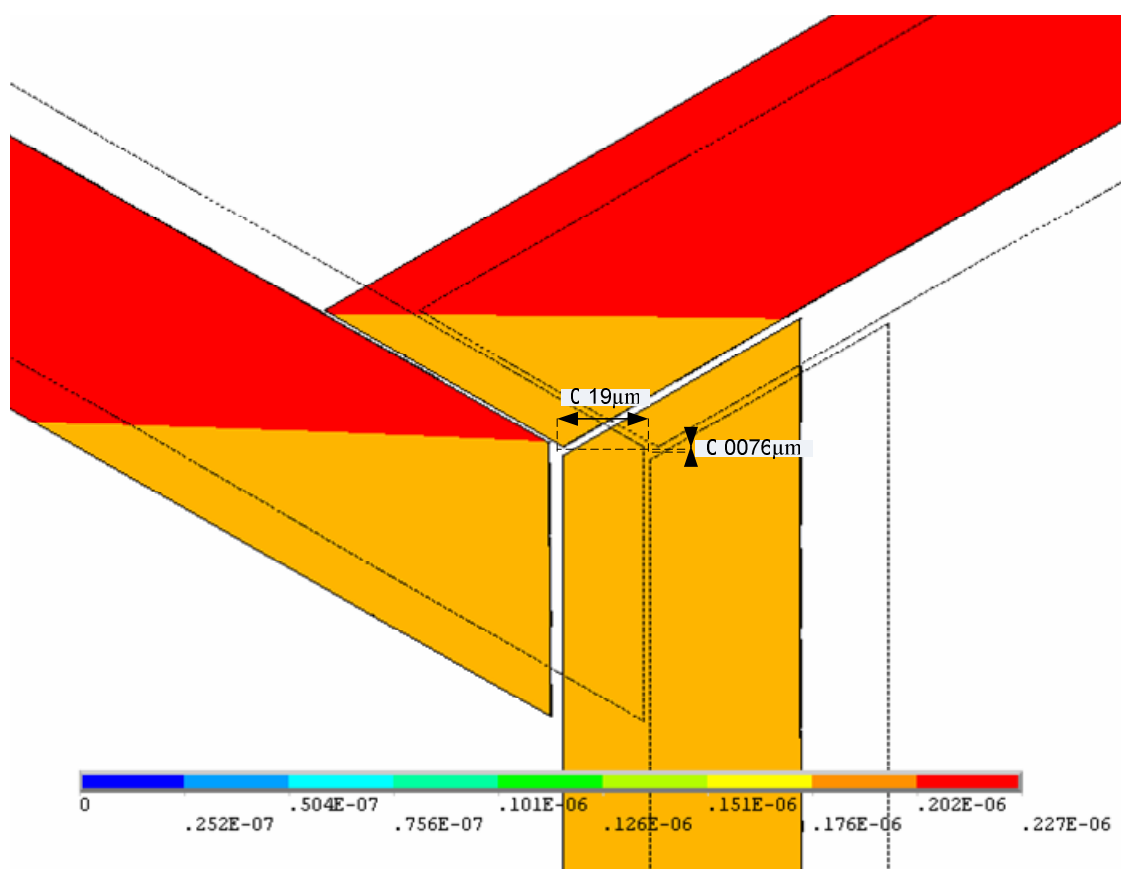


Figura 44. Deslocamento do centro da garra em função da aplicação de 100 V na cerâmica vertical

Em seguida foram aplicados 100V na cerâmica piezelétrica horizontal, para verificar o deslocamento vertical da estrutura. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 45.

A Figura 46 apresenta em detalhe o deslocamento das extremidades da garra. O deslocamento máximo em Y vale $0,29 \mu\text{m}$, e em X é de apenas $0,045 \mu\text{m}$. Nota-se então que o deslocamento vertical é aproximadamente 6 vezes maior que o deslocamento indesejável na horizontal.

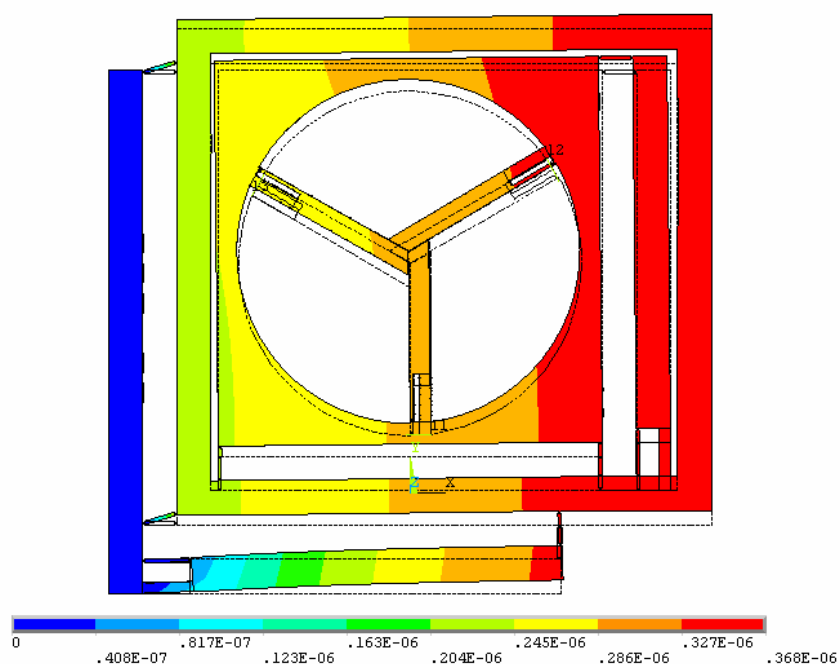


Figura 45. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica horizontal

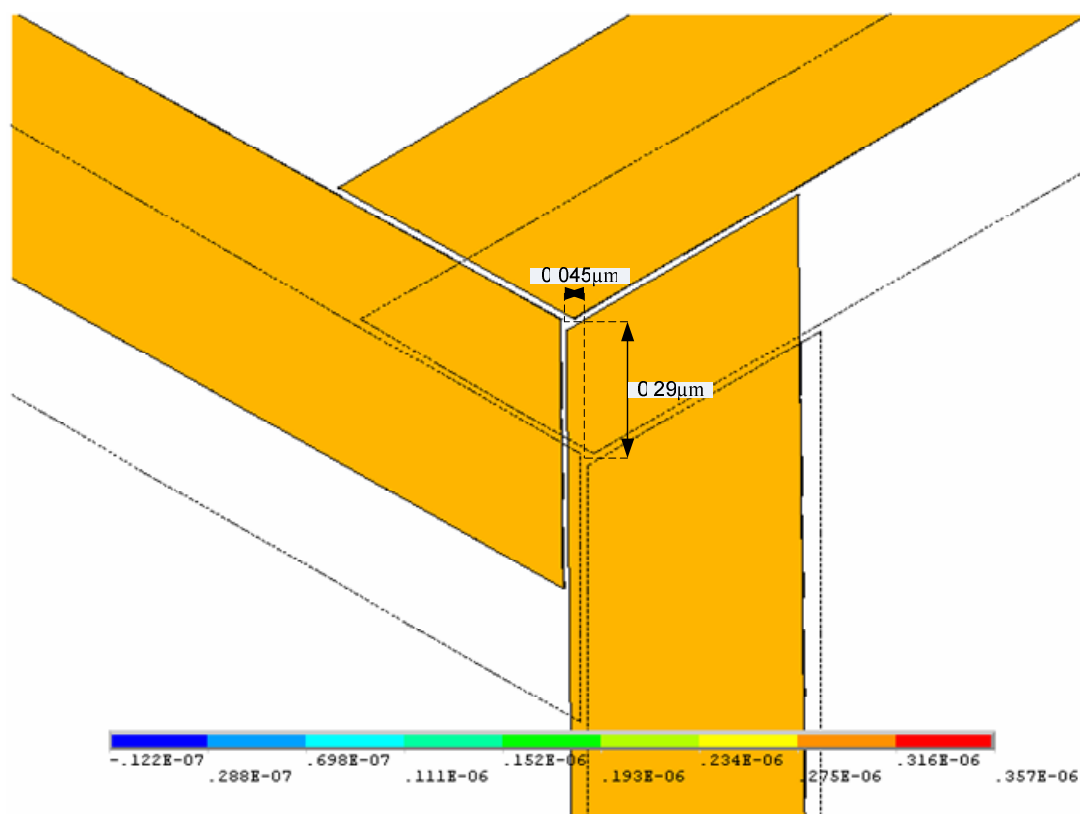


Figura 46. Deslocamento do centro da garra em função da aplicação de 100 V na cerâmica horizontal

As alterações realizadas na estrutura proporcionaram resultados satisfatórios nas simulações em comparação com a solução anterior. Os movimentos horizontais e verticais puderam ser praticamente desacoplados com a utilização da nova estrutura.

5.2.5 Solução Fabricada

Em função de restrições de precisão da máquina de Eletroerosão a fio, e indisponibilidade de fios de corte de menor diâmetro, alguns detalhes da solução final encontrada não puderam ser fabricadas. Os arredondamentos presentes nas estruturas flexíveis do desenho tiveram de ser tratadas como inexistentes no momento da fabricação. Por este motivo, desenhou-se um modelo definitivo (Figura 47) para as simulações, para possibilitar a comparação dos resultados calculados com os experimentais.

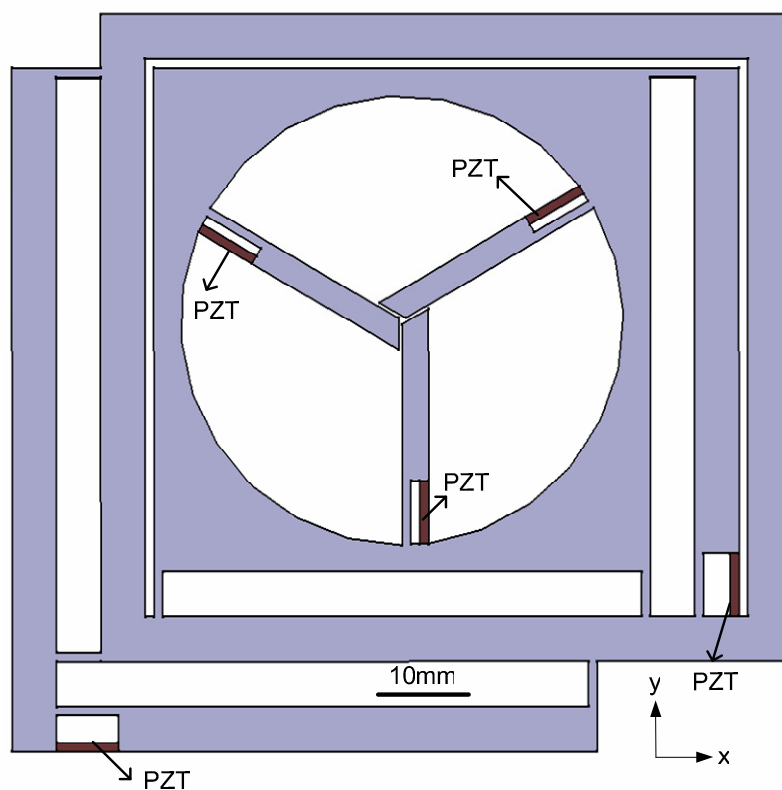


Figura 47. Desenho final do sistema fabricado

Novamente deseja-se verificar as interferências de movimentação em X e Y. Primeiramente aplica-se uma tensão de 100 V na cerâmica horizontal de posicionamento, que controla os movimentos verticais. O resultado da simulação é apresentado na Figura 48, e em detalhe na Figura 49. Nota-se que desta vez o deslocamento desejado na direção Y vale $0,12 \mu\text{m}$, enquanto o deslocamento indesejado em X vale $0,13 \mu\text{m}$, o que indica um fator elevado de acoplamento dos movimentos.

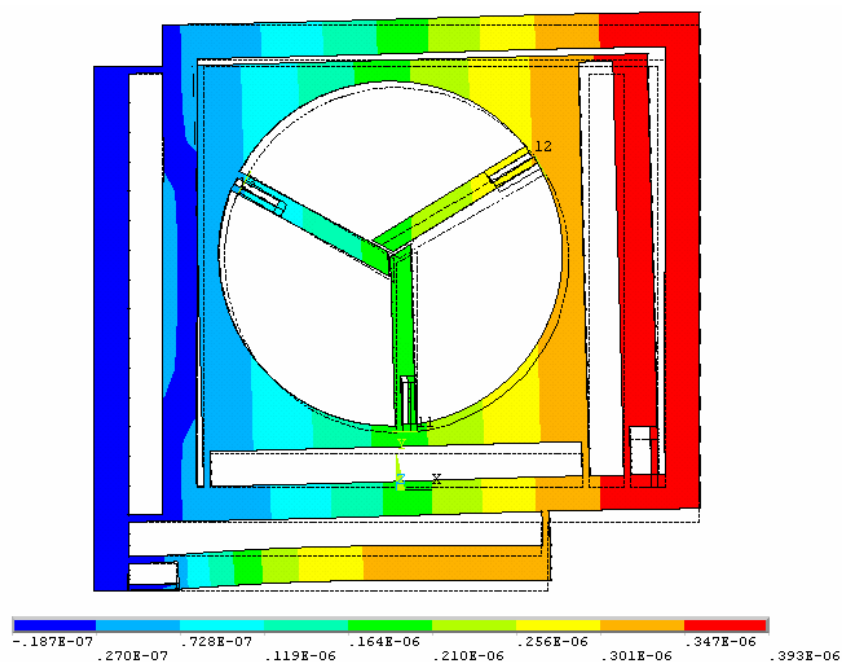


Figura 48. Deslocamento em Y devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica horizontal

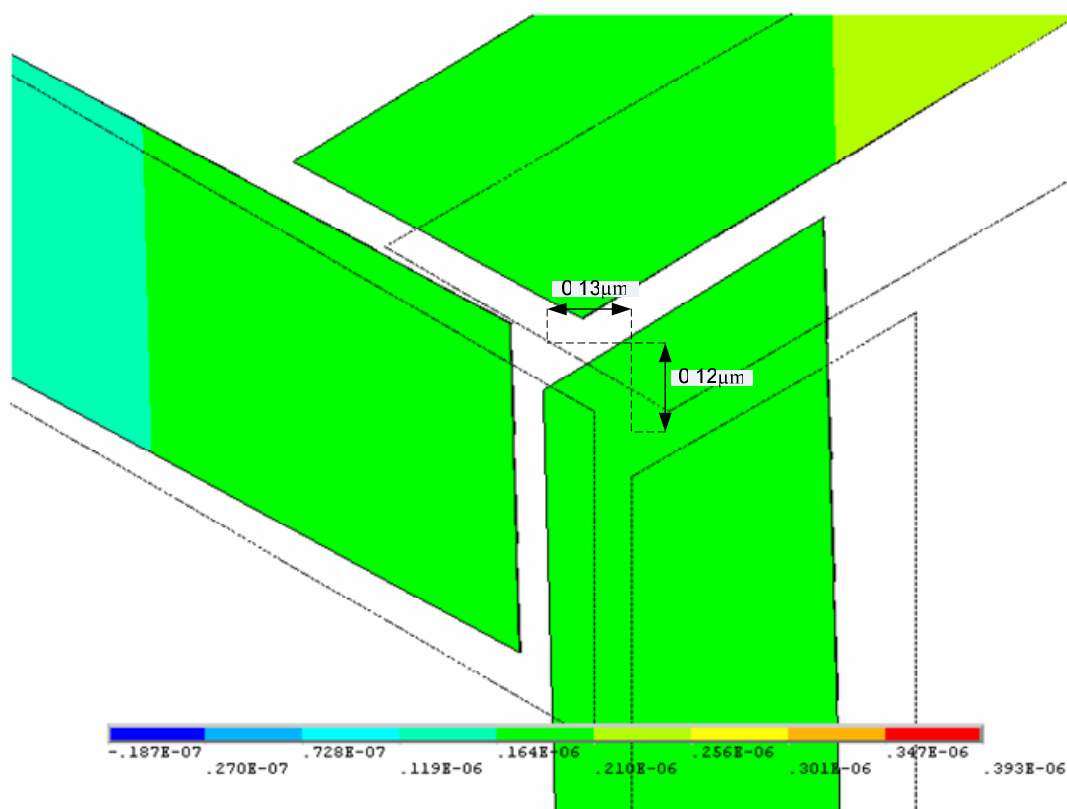


Figura 49. Deslocamento no centro da garra devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica horizontal

Em seguida, aplica-se 100 V na cerâmica vertical de posicionamento, que controla os movimentos em X. Os resultados simulados estão apresentados na Figura 50. A Figura 51 apresenta o deslocamento do centro da garra em detalhe. O movimento desejado em X obtido foi de $0,1\ \mu\text{m}$ enquanto o movimento em Y devido à interferência foi de $0,06\ \mu\text{m}$, o que representa um acoplamento moderado.

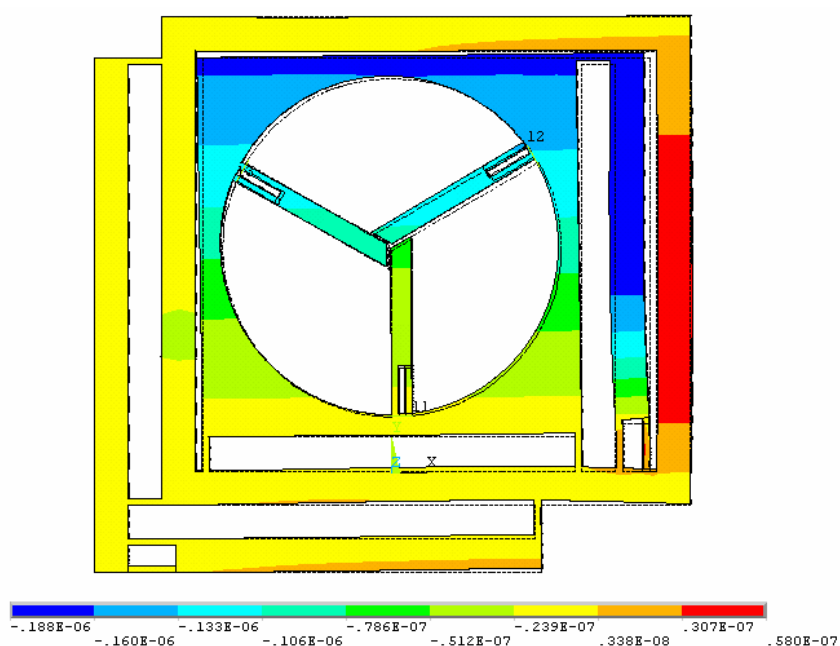


Figura 50. Deslocamento em X devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical

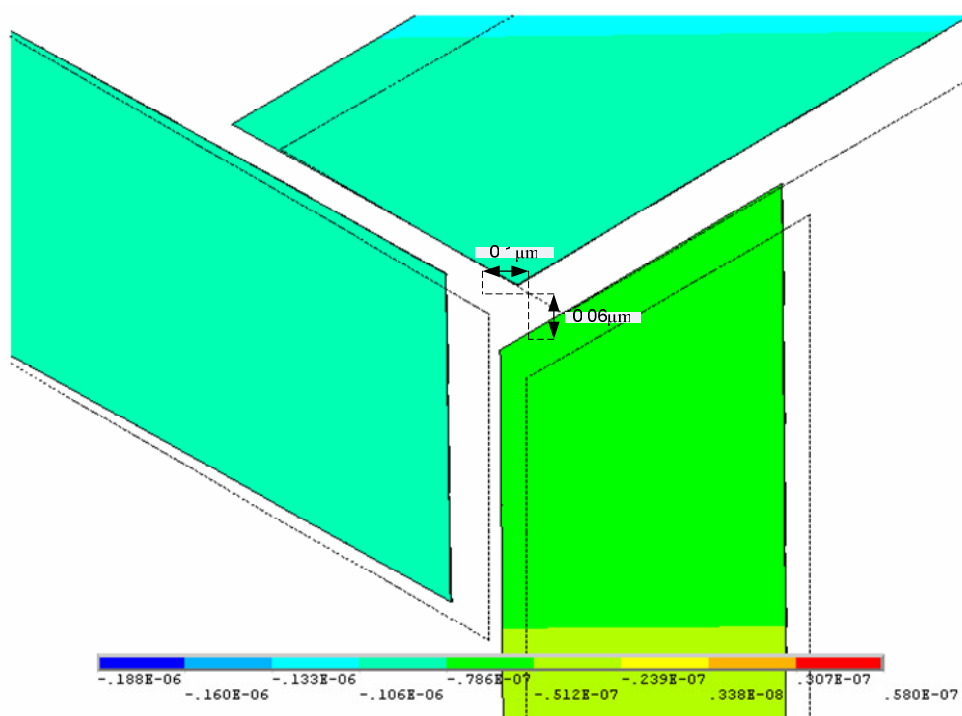


Figura 51. Deslocamento no centro da garra devido a uma aplicação de 100 V na cerâmica vertical

Por último mediu-se os deslocamentos das hastes das garras em função da aplicação de uma tensão de 100 V em cada cerâmica piezelétrica. A Figura 52 apresenta os deslocamentos totais da estrutura. A abertura máxima na ponta de cada haste vale 1,09 μm .

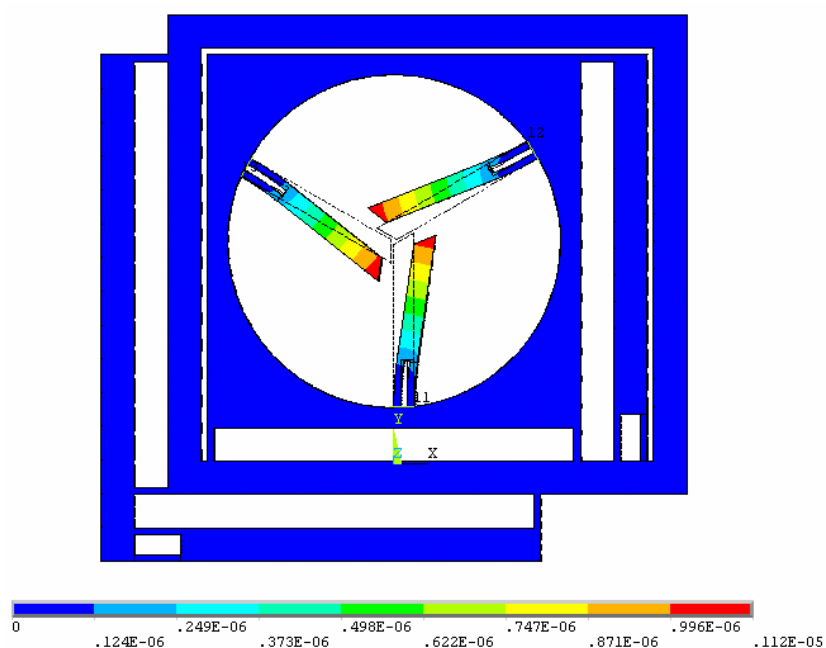
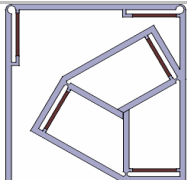
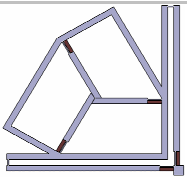
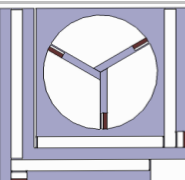
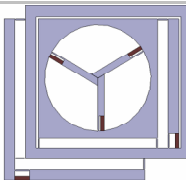
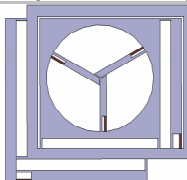


Figura 52. Deformação total das garras

5.2.6 Comparação das soluções

Para efeito de comparação, são apresentados na tabela abaixo os resultados obtidos para as cinco soluções diferentes estudadas.

Tabela 3. Comparação entre as soluções

1	2	3	4	5 (fabricado)
				
Acionamento em X				
Deslocamento desejado em X				
1,7 μm	-	0,12 μm	0,19 μm	0,1 μm
Deslocamento indesejado em Y				
2 μm	-	0,03 μm	0,0076 μm	0,06 μm
deslocamento desejado / deslocamento indesejado				
0,85	-	4	25	1,67
Acionamento em Y				
Deslocamento desejado em Y				
-	0,3 μm	0,4 μm	0,29 μm	0,12 μm
Deslocamento indesejado em X				
-	0,4 μm	0,25 μm	0,045 μm	0,13 μm
deslocamento desejado / deslocamento indesejado				
-	0,75	1,6	6,5	0,92

Com os resultados das simulações, pode-se constatar a piora do sistema em função da não realização dos detalhes de arredondamento das juntas flexíveis. O sistema se tornou muito rígido para que os mecanismos operassem eficientemente. Entretanto, a simulação do protótipo real fabricado é importante, para a comparação e validação dos resultados simulados com os dados experimentais.

5.2.7 Análise Modal

Para verificar as frequências de ressonância do microposicionador, uma análise modal foi feita no programa de elementos finitos ANSYS. O resultado obtido foi de 1468 Hz para a primeira frequência natural (Figura 53). Como a primeira harmônica é muito elevada não haverá problemas com as frequências de excitação que a estrutura estará sujeita nos ensaios experimentais.

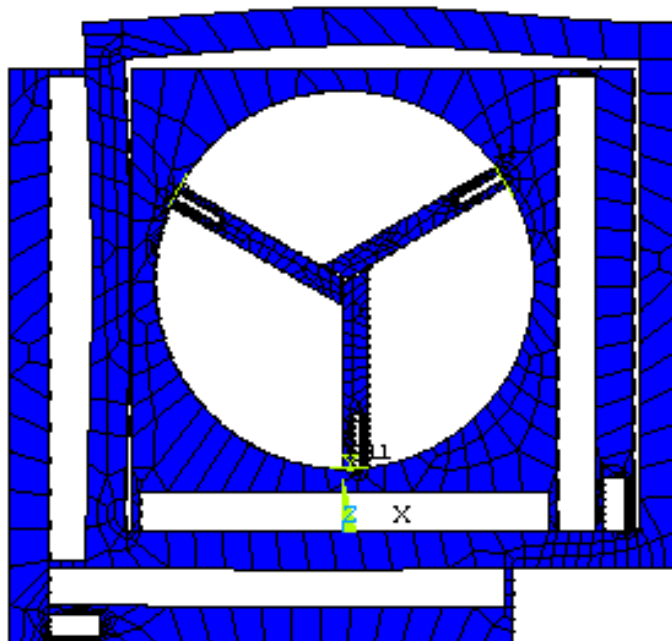


Figura 53. Primeira harmônica da estrutura

6 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Após chegar a uma solução final do posicionador piezelétrico, foi fabricado um protótipo pelo método de eletroerosão a fio. Esse protótipo foi necessário para verificar a viabilidade do projeto tanto em relação a sua fabricação como comparar os resultados obtidos com a simulação de elementos finitos.

6.1 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo foi fabricado na empresa MURATEC localizada em São Bernardo do Campo. Ela dispõe de duas máquinas de eletroerosão a fio ROBOFIL 380 que utilizam um fio de diâmetro de 0,25mm e produzem um “gap” de 0,1mm. Uma placa de alumínio de dimensões de 300x300x5mm foi entregue com o desenho em CAD para a fabricação.

O arquivo entregue é lido pelo software AUTOCAD, e a partir deste é gerado automaticamente o programa em CNC para ser carregado na máquina. Esta trabalha automaticamente, e o operador apenas acompanha o processo caso ocorram erros no processo, como ruptura do fio de corte.

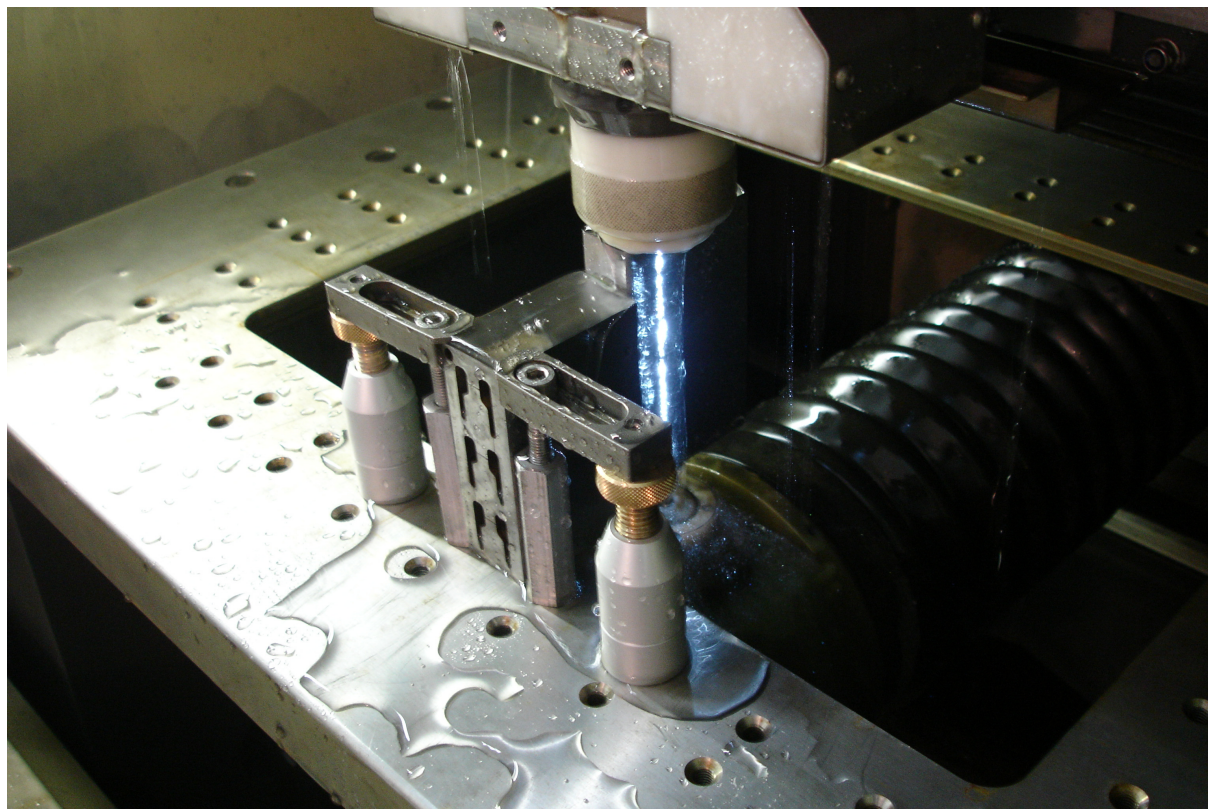


Figura 54. Máquina de eletroerosão a fio em funcionamento

O protótipo fabricado é apresentado na Figura 55, já com as cerâmicas piezelétricas fixadas e as conexões elétricas soldadas.

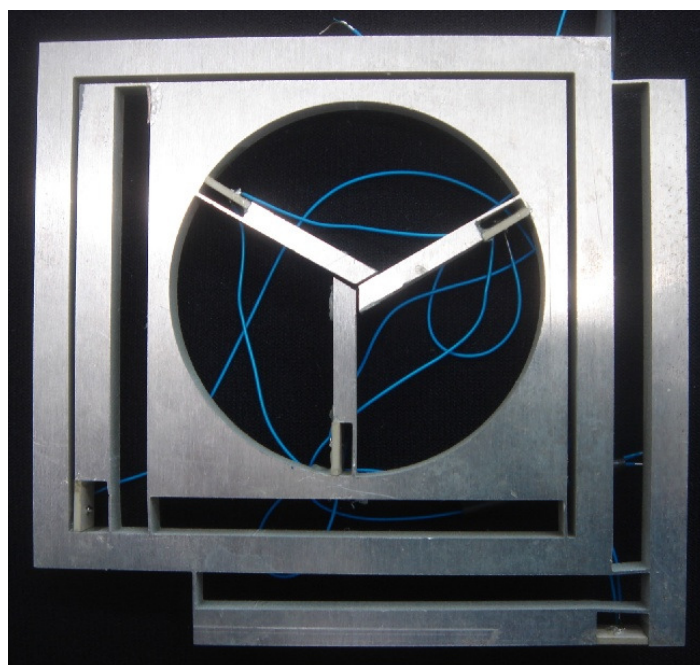


Figura 55. Protótipo fabricado

6.2 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Após a peça ser fabricada, a montagem do protótipo foi realizada seguindo os seguintes passos:

1. Corte de uma chapa de material piezelétrico, utilizando uma serra de precisão (Isomet 4000®), para obter as cinco cerâmicas piezelétricas de atuação com as dimensões de 1x5x7 mm.
2. Soldagem dos fios de cobre nos atuadores piezelétricos
3. Colagem das cerâmicas nos locais desejados, utilizando uma resina Epóxi
4. Verificação se os atuadores piezelétricos estão isolados eletricamente um do outro para evitar curto-circuito do sistema
5. Preparação da fita reflexiva sobre um suporte metálico para atenuar a sua vibração
6. Fixação da fita nas áreas de interesse do manipulador piezelétrico

6.3 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Para verificar o movimento obtido pelo manipulador piezelétrico e comparar com os valores obtidos na simulação em MEF foi utilizado um sistema de comando remoto e medição por interferometria, como ilustrado abaixo:

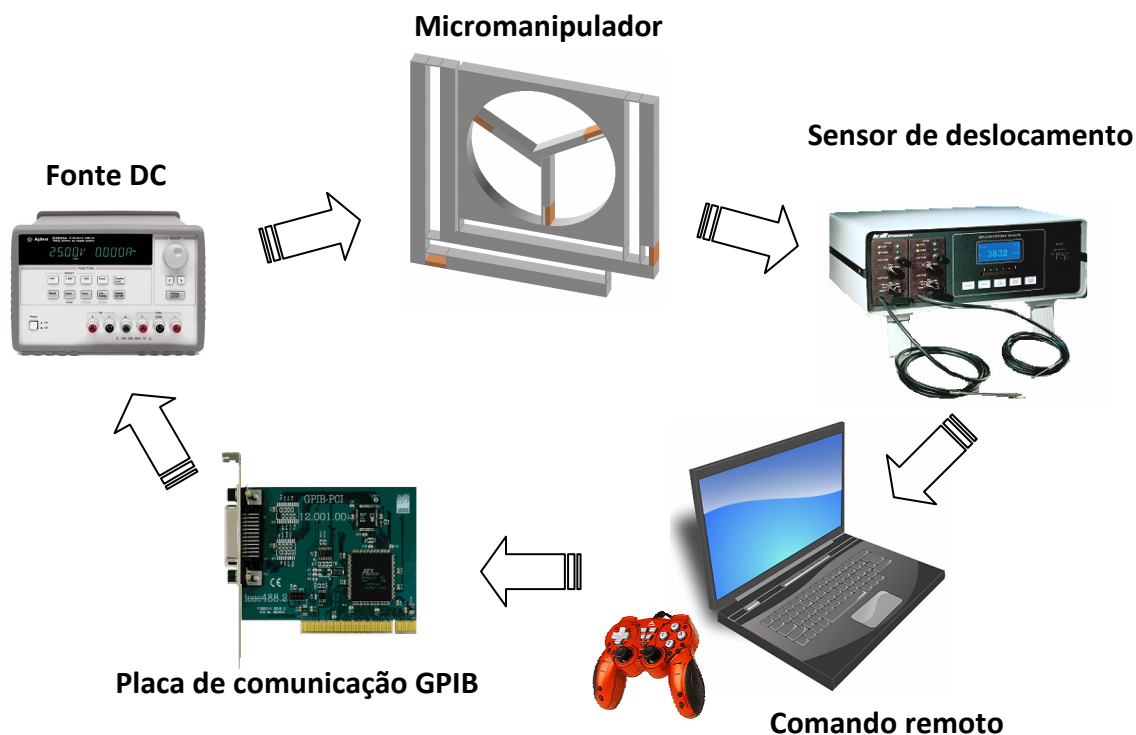


Figura 56. Esquema do método experimental

- **Computador:** responsável por receber os comandos do usuário, comandar as tensões aplicadas na estrutura através do programa MATLAB e analisar os dados enviados pelo interferômetro.
- **Placa de comunicação GPIB:** interface para a transferência de dados entre o programa MATLAB e a fonte DC.
- **Fonte DC:** fonte controlável que aplica a diferença de potencial nas cerâmicas piezelétricas.
- **Sensor de deslocamento MTI 2100:** um sensor do tipo fotônico foi utilizado para medir os deslocamentos na estrutura do mecanismo posicionador, pois possibilita medir pequenos deslocamentos com grande precisão.

Os experimentos foram realizados em duas etapas. A primeira tinha o objetivo de medir os deslocamentos efetivos do micromanipulador e consistia em uma fonte de tensão não-controlável, e o sensor de deslocamento; a segunda tinha a finalidade de testar o comando eletrônico, e possuía assim uma fonte DC controlável

remotamente, um computador equipado com uma placa GPIB e um joystick. Essa divisão se mostrou necessária, pois a fonte DC controlável remotamente proporciona tensões máximas de 60 V, o que dificulta a visualização do deslocamento do manipulador. Em função disto utilizou-se uma fonte de maior capacidade, que fornecia tensões de até 1000 V. A Figura 57 apresenta a primeira montagem experimental, na qual, com auxílio do sensor de deslocamento, mediram-se os deslocamentos desejados a partir das tensões fornecidas. Já na Figura 58 vê-se o experimento realizado onde a tensão é controlada remotamente.



Figura 57. Primeira montagem experimental

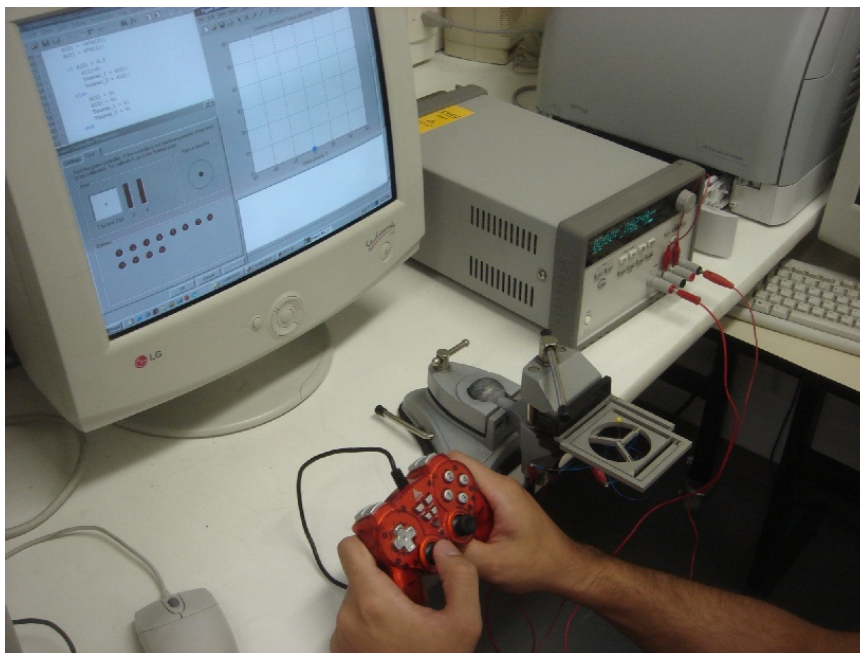


Figura 58. Segunda montagem experimental

6.3.1 Sensor MTI 2100

O sensor empregado para medir os deslocamentos foi o MTI 2100. O MTI-2100 é um sensor com dois canais que usa um sistema de fibras óticas sem a utilização de contato e inibe vibrações no equipamento. Por usar uma tecnologia baseada em fibra ótica, o sensor não impõe carga, não afeta o campo magnético e elétrico do manipulador.

O sensor mede deslocamentos de 0,25 nm até 5,08 mm com freqüência de até 150 kHz. O MTI-2100 apresenta uma alta versatilidade e facilidade de operação, possibilitado uma vasta gama de uso e alta qualidade de medição.

O princípio de funcionamento se baseia na existência de uma ponta de medição com pares adjacentes de fibras óticas, um transmissor e outro receptor de luz. No contato, “gap” zero, toda a luz do emissor é direcionada diretamente para a mesma fibra ótica, produzindo um sinal de saída igual à zero. Aumentando-se a distância entre o sensor e a amostra, a quantidade de luz captada pelo sensor aumenta até que toda área do receptor esteja iluminada. A partir deste ponto, um

aumento da distância provoca uma redução da intensidade da luz refletida e a fibra ótica receptora capta uma menor quantidade de luz diminuindo a voltagem de saída.

Por esses motivos para cada ponta de medição têm-se dois campos de medição (Figura 59). O primeiro campo de medição apresenta uma maior sensibilidade, utilizado para medir menores deslocamentos, enquanto o segundo campo é menos sensível a variação de deslocamento. Antes de utilizar o sensor, é necessário calibrar a ponta de medição para um determinado campo e ajustar para que o ponto de operação esteja localizado aproximadamente no centro deste campo, onde se localiza a região de maior linearidade.

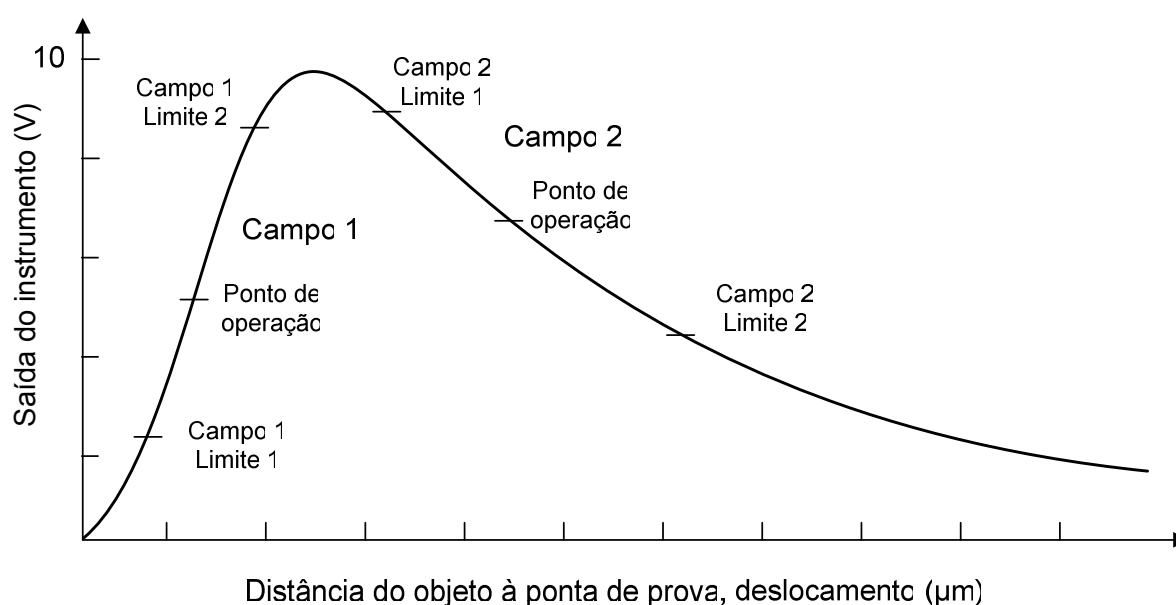


Figura 59. Curva de calibração do sensor

Para obter uma boa reflexão da superfície de medição, uma fita reflexiva foi colada nos locais de interesse do posicionador.

6.3.2 Interface com o usuário

A comunicação entre o computador e a fonte de tensão é feita pelo MATLAB pelo intermédio do barramento GPIB através do "Instrumet Control Toolbox". O GPIB é uma interface para a transferência de dados entre computador e instrumentos, sendo amplamente utilizada para controlar remotamente equipamentos. Suas principais características são:

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

O “Instrument Control Toolbox” é uma biblioteca de funções que o MATLAB usa na comunicação de instrumentos que suportam a interface GPIB; para se realizar o comando de uma fonte DC deve-se:

- Inicializar-se a comunicação fornecendo os parâmetros da porta de comunicação,
- Configurar-se as propriedades de comunicação
- Conectar a aplicação na fonte DC
- Definir-se uma voltagem a ser aplicada na fonte
- Desconectar os aparelhos

Os valores de tensão fornecidos pela fonte DC são definidos pelo uso de um Joystick previamente instalado no sistema operacional, conectado através de uma porta Universal Serial Bus. Através de uma biblioteca “dll” que transforma os dados de entrada no Joystick para valores binários, desta forma a manipulação do Joystick produz diferentes valores de tensão na fonte DC.

6.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.4.1 Primeira montagem experimental

Utilizando a primeira montagem experimental, mediram-se os deslocamentos da estrutura com auxílio do sensor MTI-2100. Inicialmente calibrou-se o sensor seguindo as instruções do fabricante. Então, posicionou-se o micromanipulador de forma que o sensor ficasse bem próximo da fita reflexiva, presa no centro do micromanipulador, que serviu como ponto de referência em todas as medições e simulações. Para cada cerâmica de posicionamento aplicou-se uma tensão conhecida, e verificou-se o valor de tensão elétrica fornecido pelo sensor. Na seqüência repetiu-se o procedimento para a fita reflexiva posicionada

perpendicularmente. O valor de tensão lido no visor do MTI-2100 deve ser convertido de milivolt para micron, utilizando-se o fator de conversão fornecido pelo fabricante, de acordo com a região de operação (vide Figura 59).

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4. Comparação entre resultados experimentais e simulações

		Valor medido	Valor simulado	Diferença
Acionamento em X	Movimentação em X (μm)	0,12	0,10	18,20%
	Movimentação em Y (μm)	0,04	0,06	-33,33%
Acionamento em Y	Movimentação em X (μm)	0,06	0,13	-50,51%
	Movimentação em Y (μm)	0,06	0,12	-48,52%

6.4.2 Segunda montagem experimental

Em razão da fonte DC ter apenas dois canais de saída de voltagem e o manipulador possuir três graus de liberdade, não se pode atuar todos os graus de liberdade simultaneamente. Então três formas diferentes de operação podem ser definidas: movimentação X e Y, movimentação de um dos eixos e abertura/fechamento da garra.

Inicialmente as três formas diferentes de atuação foram utilizadas, porém os deslocamentos foram muito pequenos. Para contornar essa situação, as duas saídas de 60 V da fonte DC foram curto-circuitadas para se obter um canal de 120 V. Dessa forma foi possível perceber a atuação do microposicionador ao segurar-se um objeto (agulha) com a garra, e então atuando as cerâmicas para soltá-lo (Figura 60).

Observou-se uma boa repetibilidade e sensibilidade do comando, porém uma fonte de maior potência seria útil para produzir maiores deslocamentos.



Figura 60. Detalhe de objeto preso pelo micromanipulador

7 CONCLUSÃO

Após uma extensa pesquisa bibliográfica dos mecanismos de micromanipulação os requisitos do projeto foram definidos: micromanipulador de 3 graus de liberdade, mecanismo compacto e atuação piezelétrica.

Na definição do protótipo diversos mecanismos foram simulados utilizando o software comercial de elementos finitos ANSYS. Verificando as deformações e as tensões de von Mises além das interferências de movimento; aperfeiçoamentos foram sugeridos até obter-se um microposicionador que uni estrutura flexível, amplificação de movimentos e atenuação de interferências em ambas as direções. A utilização da simulação computacional foi de fundamental importância para o desenvolvimento do projeto, permitindo grande flexibilidade no teste de alterações e correções para o protótipo, de forma ágil e econômica.

A escolha do método de fabricação se mostrou correta, porém, limitações do fabricante inviabilizaram o atendimento das especificações de projeto.

Tais dificuldades na fabricação impossibilitaram a realização das juntas flexíveis, e o protótipo desta forma apresentou rigidez superior à esperada. Para possibilitar comparações entre simulações e medições, foi desenvolvido um novo modelo computacional com as características do protótipo fabricado. Os valores simulados e medidos indicaram alta interferência de movimento em X e Y. As diferenças encontradas entre os valores simulados e os medidos se devem principalmente à presença de imperfeições no modelo, como a imprecisão das condições de contorno, e de detalhes não considerados, como o método de fixação dos piezelétricos. Apesar disso o protótipo apresentou boa repetibilidade de atuação e capacidade de prender os objetos de acordo com os comandos do usuário.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] OUYANG, P. R. et al. **Micro-motion devices technology** : The state of arts review. London: Springer-Verlag, 2007.
- [2] OLIVAS, J. D.; BOLIN, S.; Advancements in MEMS Materials and Processing Technology. **Emerging Technologies** – Overview. 1998
- [3] JUST, E.; **Entwicklung eines Formgedächtnis-Mikrofreifers**. 2001. Tese (Doutorado). Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2001.
- [4] BIES, A.; **Piezo-Aktoren**. Saarbrücken: Hochschule für Technik und Wirtschaft, 2000. Apostila para disciplina de graduação do departamento Sensor und Feinwerktechnik, Aktoren.
- [5] PHYSIC INSTRUMENTE (PI) GmbH & Co ; **Online Piezo Tutorial**. Disponível em <<http://www.physikinstrumente.com/en/> > Acesso em: 29 abr. 08.
- [6] NAH, S. K.; ZHONG, Z. W., **A microgripper using piezoelectric actuation for micro-object manipulation**, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapura, abril 2006
- [7] CECIL, J.; POWELL, D.; VASQUEZ, D., **Assembly and manipulation of micro devices**- A state of the art survey, Virtual Enterprise Engineering Laboratory (VEEL), Center for Information Based Manufacturing (CINBM), Department of Industrial Engineering, EUA, maio 2006
- [8] GOTZE, H.; PAGEL, L., **Development of a micro-manipulator based on piezoelectric-technology**, Department of Electrical Engineering and Information Technology, University of Rostock, Alemanha, fevereiro 2007
- [9] BALLANDRAS, S. et al, **Microgrippers fabricated by the LIGA technique**, Institut des Microtechniques de Franche-Comté, França, dezembro 2006

- [10] HUBERT, A., **Microrobotique**: micromanipulation et microrobots autonomes, LAB CNRS, França, 2003
- [11] CARROZZA, M et al, **Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices**, Scuola Superiore Sant'Anna - MiTech Lab, Itália, março 2000
- [12] UCHINI K., GINIEWICZ J. R, **Micromechatronics**, Marcel Dekker, 2003
- [13] GIRISH S. MALI, **Novel Escapement Mechanism using a Compliant Mechanism and a Piezoelectric Actuator**, Worcester Polytechnic Institute, 2007

ANEXO A – DESENHO DE FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

ANEXO B – CÓDIGO FONTE DO SOFTWARE DE COMANDO

```

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

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

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

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

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

% Communicating with instrument object, obj1.
data1 = query(obj1, '*IDN?');
Tensao_1=0;
Tensao_2=0;

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

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
bP = 0;

while bP ~= 1
    d = getsample(ai)
    d(2) = -6*d(2);
    d(1) = 6*d(1);

    if d(2) > 0.5
        d(1)=0;
        Tensao_1 = d(2);
        Tensao_2 = d(2);
    end
end

```

```

else
    d(1) = 0;
    d(2) = 0;
    Tensao_1 = 0;
    Tensao_2 = 0;
end

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

% decoding the data from dll: JoyIn.cpp
ButtonsPressed = round((10+d(5))*32768/10); %so pra pegar os botoes
bP = ButtonsPressed;
set(hJoy, 'XData', d(1), 'YData', d(2));
set(hJoy2, 'XData', -10, 'YData', -10);
set(hTitle, 'String', ['Controle Acionado! Tempo decorrido: '
num2str(etime(clock,t0))]);
set(hXAxis, 'String', ['Botao primido: ', num2str(bP)]);
tt = [tt; etime(clock,t0)];
axis([-60 60 0 60 ])
drawnow;
grid on;

if bP == 2
    Tensao_1 = 0;
    Tensao_2 = 0;
    bP = 1;
end

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

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

% Clean up all objects.
delete(obj1);

```