

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA
E DE SISTEMAS MECÂNICOS

ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UM
MICROPOSICIONADOR (*MEMS*) COM ATUAÇÃO POR PENTES DE
CAPACITORES

ANDRÉ DA COSTA TEVES
ANDRÉ TAKASHI KOBAYASHI

SÃO PAULO

2009

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA
E DE SISTEMAS MECÂNICOS

ANÁLISE, CARACTERIZAÇÃO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UM
MICROPOSICIONADOR (*MEMS*) COM ATUAÇÃO POR PENTES DE
CAPACITORES

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de graduação em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Mecatrônica

André da Costa Teves

André Takashi Kobayashi

Orientador:

Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva

SÃO PAULO

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Teves, André da Costa

Análise, caracterização, simulação e otimização de um microposicionador (*MEMS*) com atuação por pentes de capacitores / A.C. Teves, A.T. Kobayashi – São Paulo, 2009

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. 1. Sistema Microeletromecânicos, 2 Mecatrônica, 3. Eletroestática. I. Kobayashi, André Takashi II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Emílio Carlos Silva, nosso orientador, pela confiança e motivação inspiradas e pela contínua supervisão durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Placid Ferreira (*University of Illinois at Urbana-Champaign*), por ter despertado um grande interesse na área de MEMS em seus alunos, além de disponibilizar infraestrutura e recursos para a fabricação do protótipo estudado neste trabalho.

Ao Professor Marcelo Carreño, por disponibilizar a infraestrutura utilizada na caracterização do protótipo.

Ao Mestrando Bonjin Koo (*University of Illinois at Urbana-Champaign*), que durante o ano de 2008 trabalhou em conjunto com um dos Autores na fabricação do protótipo.

Ao Graduando Murilo Zubioli Mielli, do curso de Sistemas Eletrônicos, que foi fundamental para a realização dos testes no protótipo.

Aos nossos pais e amigos que indiretamente contribuíram e nos apoiaram durante essa longa jornada.

RESUMO

Tendo como contexto a tecnologia de *MEMS* (*Micro Electro Mechanical Systems*), este trabalho realizará uma análise de engenharia reversa em um microposicionador com dois graus de liberdades translacionais (X e Y), fabricado na Universidade de Illinois em Urbana-Champaign nos Estados Unidos. O estudo será dividido nas etapas de análise do projeto do dispositivo e de seus processos de fabricação, simulação computacional no software Ansys e caracterização experimental através da medição de deslocamentos e voltagens e comparação com os resultados obtidos computacionalmente. O projeto do dispositivo é baseado no mecanismo de cinemática paralela (*PKM – parallel kinematics mechanism*), o qual objetiva desassociar as movimentações nas direções X e Y. Dois pentes de capacitores (*comb-drives*) são os responsáveis pela atuação do micro-posicionador nessas direções. Na sua fabricação foi utilizada como substrato uma *wafer* de silício sobre isolante (*SOI – silicon-on-insulator*) e foram aplicadas técnicas de microfabricação, como usinagem de superfície (*surface micromachining*) e corrosão profunda por íons reativos (*DRIE – deep reactive ion etching*). Após o término dessas etapas iniciais, todo o conhecimento obtido sobre o protótipo será utilizado em uma análise de otimização topológica no software Matlab, com o objetivo de se obter uma versão otimizada do microposicionador. Existem inúmeras aplicações para o dispositivo a ser estudado: atuadores para microscópios de varredura, armazenagem de informação, interruptores de fibra ótica, sensores de micro-força, entre muitas outras.

ABSTRACT

Taking into consideration the MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology, this work will perform a reverse engineering analysis in a monolithic micro positioning two degree-of-freedom translational (XY) stage, fabricated at University of Illinois at Urbana-Champaign in the United States. This study will be divided into four initial steps: analysis of the device's design parameters and its fabrication processes, computer simulation using the software Ansys and experimental characterization by measuring displacements and voltages and comparing the results with those predicted by computer simulations. The design of the MEMS stage is based on a parallel kinematics mechanism (PKM), which aims to decouple the motion in the XY directions. Two sets of electrostatic linear comb-drives are used to actuate the stage mechanism in the X and Y directions. The stage is fabricated on a silicon-on-insulator (SOI) wafer using surface micromachining and a deep reactive ion etching (DRIE) process, among other processes. All the knowledge obtained from these initial steps will be used to perform a topological optimization analysis in the software Matlab in order to obtain an improved version of the stage. By providing controlled displacement in one or two degree of-freedom these manipulators have been used in many applications, such as actuators for scanning probe microscopy; data storage; fiber optical switches; micro-force sensors, and micro optical lens scanners; among many others.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1 – Características dos diferentes tipos de resiste.....	36
Tab. 2.2 – Comparação entre corrosão úmida e à seco.....	45
Tab. 4.1 – Sequência de fabricação.....	70
Tab. 8.1 – Compilação dos resultados (dimensões em μm).....	97

LISTA DE SÍMBOLOS

C	capacitância
ϵ	permissividade elétrica
ϵ_0	permissividade elétrica do vácuo
A	área das placas de um capacitor de placas paralelas
g	espaçamento (<i>gap</i>)
Q	carga nas placas de um capacitor de placas paralelas
V	voltagem
E	campo elétrico
F	Força eletroestática
z	deslocamento da mola
k	constante da mola
g_0	posição inicial da mola
D	vetor de deslocamento elétrico (MEF)
ϵ	matriz de permissividade elétrica (MEF)
E	vetor campo elétrico (MEF)
I	corrente elétrica (MEF)
t	tempo (MEF)
v	velocidade de abertura do <i>gap</i> (MEF)
F_0	força no ponto de operação (MEF)
I_0	corrente no ponto de operação (MEF)
D	matriz de amortecimento (MEF)
K	matriz de rigidez (MEF)
Δx	<i>gap</i> entre o ponto de operação e a solução real (MEF)
ΔV	variação de tensão entre o ponto de operação e a solução real (MEF)
K_{xx}	rigidez eletrostática (MEF)
K_{vv}	condutividade do movimento (MEF)
T	espessura resultante do polímero a ser depositado (Litografia)
κ	constante de calibração (Litografia)
M	concentração do polímero em g/100mL (Litografia)
η	viscosidade; ω = rotações por minuto (rpm) (Litografia)

α	constante dependente do equipamento (Litografia)
β	constante dependente do equipamento (Litografia)
λ	constante dependente do equipamento (Litografia)
f	Força aplicada (MOT)
v	campo de deslocamento (MOT)
u	campo de deslocamento (MOT)
L_2	Energia mútua (MOT)
L_3	Energia de deformação (MOT)
G	Função objetivo (MOT)
C_z	flexibilidade angular do mancal flexível
α_z	deformação angular do mancal flexível em relação ao eixo z (rad)
M_z	torque externo aplicado ao mancal flexível
e	menor dimensão do mancal flexível
I	momento de inércia
σ_p	tensão de ruptura
k_d	rigidez de uma viga bi-engastada na direção do movimento
k_l	rigidez de uma viga bi-engastada na direção lateral ao movimento
E	módulo de Young do material
h	largura da viga
L	comprimento da viga
w	espessura da viga
R	raio de circunferência

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i> ou Deposição Química de Vapor
DLP	<i>Digital Light Processing</i> ou Processamento Digital de Luz
DMD	<i>Digital Micromirror Device</i> ou Dispositivo Microespelhado Digital
DRAM	<i>Dynamic random access memory</i>
DRIE	<i>Deep Reactive Ion etching</i> ou Corrosão Profunda por Íons Reativos
Fig.	Figura
FPW	<i>Flexural plate wave</i> ou Flexão de Placa por Onda
GDL	Grau de Liberdade
IBM	International Business Machines
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MOT	Método de Otimização Topológica
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i> ou Liga de Metais com Memória
PKM	<i>Parallel Kinematics Mechanism</i> ou Mec. de Cinemática Paralela
PLS	Programação Linear Sequencial
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i> ou Deposição Física de Vapor
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
RIE	<i>Reactive Ion etching</i> ou Corrosão por Íons Reativos
SOI	<i>Silicon on Insulator</i> ou Silício sobre Isolante
Tab.	Tabela
UV	Ultravioleta
Wafer	Substrato em formato circular

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1 – INTRODUÇÃO.....	15
1.1 – Plataformas Microposicionadoras MEMS.....	15
1.2 – Tecnologias de Atuação em MEMS.....	17
1.3 – Objetivos.....	24
1.4 – Justificativas.....	25
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1 – Atuação Eletroestática.....	26
2.2 – Método dos Elementos Finitos.....	29
2.3 – Fabricação de MEMS.....	34
2.4 – Otimização Topológica.....	48
.....	50
.....	51
.....	51
.....	51
.....	51
3 – ANÁLISE DO PROJETO DO MEMS.....	59
3.1 – Mecanismo de Cinemática Paralela.....	59
3.2 – Mancais Flexíveis.....	62
3.3 – Estrutura Suspensa.....	63
3.4 – Pente de Capacitores.....	65
3.5 – Estrutura Treliçada.....	65
4 –PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO “MEMS”.....	67
4.1 – Sequência de fabricação.....	67
5 – MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	73
5.1 – Passo a passo da simulação no Ansys.....	73
5.2 – Resultados obtidos.....	81

6 – CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO MEMS.....	87
.....	91
7 – PROJETO UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	92
7.1 – Implementação Numérica.....	92
7.2 – Resultados: exemplos.....	92
7.3 – Resultados: versão do “MEMS” otimizada.....	94
O tempo de processamento para essas condições de entrada foi da ordem de 35 min, utilizando um processador Intel(R) Core(TM)2 Duo 2.2GHz. O resultado obtido pelo algoritmo é apresentado nas figuras 7.5 a 7.7.....	95
.....	95
Com a interpretação da topologia e considerando a simetria, pode-se obter a estrutura completa (figura 7.8).....	96
O deslocamento máximo obtido na direção da força de atuação foi de 13,7 μm a 60V, valor maior do que na configuração anterior. Porém, na direção perpendicular à força foi observado um deslocamento de 1,9 μm , caracterizando o acoplamento entre eixos.....	97
8 –CONCLUSÃO.....	98
9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
10 – ANEXOS.....	103
Anexo A – Desenho Técnico do MEMS.....	103
.....	103
Anexo B – Fluxograma de funcionamento do software de otimização topológica.....	104
Anexo C – Relação dos parâmetros iniciais.....	105
Anexo D – Código do software de otimização implementado em Matlab.....	106
11 – BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.....	107

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Plataformas Microposicionadoras *MEMS*

Sistemas microeletromecânicos, ou *MEMS* (*Micro Electro Mechanical Systems*), são sistemas mecânicos projetados em escala micrométrica. Através do uso de técnicas de microfabricação, adaptadas da indústria de semicondutores, é realizada a integração entre estruturas móveis, sensores, atuadores e eletrônica, tornando possível a implementação de sistemas completos miniaturizados. O potencial das micromáquinas já era conhecido muito antes das técnicas capazes de desenvolvê-las existirem [1].

Essa é uma tecnologia que permite o desenvolvimento de produtos inteligentes, aumentando a capacidade computacional da microeletrônica com a percepção e as capacidades de controle de microsensores e microatuadores, expandindo assim o espaço de projetos e aplicações. Como os dispositivos *MEMS* são fabricados usando técnicas de fabricação em lote, níveis sem precedentes de funcionalidade, confiabilidade e sofisticação podem ser colocados em um pequeno chip de silício a um custo relativamente baixo.

Atualmente os *MEMS* já se tornaram realidade e entre suas principais aplicações devem ser ressaltadas as seguintes categorias de produtos: 1) sensores de pressão, tanto para a indústria automotiva (pressão de pneus) como para a área biomédica (pressão sanguínea); 2) sensores inerciais como acelerômetros, giroscópios, muito comuns nas indústrias automotiva e aeroespacial; 3) dispositivos microfluídicos ou *bioMEMS* como os bicos injetores de tinta em impressoras inkjet, biosensores para ensaios de compatibilidade de proteínas, caracterização de anticorpos, etc; 4) *MOEMS*, dispositivos ópticos-eleto-mecânicos, como os micro-espelhos utilizados para projeção de imagem, interruptores de fibra ópticas, etc; 5) *MEMS RF*, dispositivos com funcionalidade de rádio frequência, como os ressonadores presentes em celulares, micro-antenas, interruptores e filtros; 6) outros produtos como ferramentas de micro-cirurgia na área biomédica, mecanismos de precisão como os presentes em máquinas fotográficas ou no cabeçote leitor de um disco rígido de computador, armazenamento de informação em alta densidades, etc.

De acordo com Yole Developpement, o mercado global de *MEMS* atingiu US\$ 5,5 bilhões em 2008 e tem previsão de crescimento anual de 10% entre 2009 e 2013. Esse valor pode ainda ser considerado pequeno quando comparado à indústria de semicondutores (US\$ 250 bilhões em 2008, de acordo com a Associação das Indústrias de Semicondutores), sua precursora. Mas há dois aspectos que a tornam muito interessante: a taxa de crescimento prevista para os próximos anos é muito elevada; chips *MEMS* agregam muito valor ao produto final, sendo que na média o sistema baseado em *MEMS* terá 8 vezes mais valor do que o preço dos chips isoladamente.

Uma importante classe de dispositivos *MEMS* são as plataformas de micro posicionamento (*positioning micro stages*), as quais são geralmente fabricadas em silício e representam uma importante ferramenta para a micro e nanomanipulação e para a tecnologia de sonda. Através do controle de deslocamento em um, dois ou três graus de liberdade esses manipuladores têm sido utilizados em diversas aplicações, como interruptores de fibra ótica [2], sensores de micro-força [3], atuadores para microscópios de varredura [4], armazenagem de informação [5], micro-scanners ópticos [6], entre outras. Para esse tipo de sistema de posicionamento, tamanho, amplitude de movimento, frequência natural e associação de movimento entre os diferentes graus de liberdade são as características mais importantes para definir o desempenho do dispositivo e têm sido o foco de interesse de muitos grupos de pesquisa em todo mundo.

Essas plataformas, com dimensões menores que as de uma pequena moeda, podem ser construídas de forma a produzirem movimentos lineares no plano XY e/ou movimentos rotacionais em relação a um eixo perpendicular ao plano e/ou movimento vertical em Z. Diferentes tecnologias são utilizadas como forma de atuação: atuadores piezelétricos [7], ligas de metais com memória de forma [8], atuadores eletromagnéticos [9], eletrotermomecânicos [10], eletroestáticos [2-6], entre outras.

A seguir será realizada uma breve descrição das principais tecnologias de atuação em *MEMS* e algumas de suas aplicações.

1.2 – Tecnologias de Atuação em *MEMS*

Existem diversas formas de atuação de dispositivos *MEMS*, entre elas, as principais são: eletroestática, piezelétrica, térmica, liga de metais com memória de forma (*Shape Memory Alloy*) e eletromagnética. As mais largamente utilizadas são as três primeiras, no entanto, cada uma apresenta vantagens e desvantagens sobre as demais.

1.2.1 –Eletroestática

Qualquer objeto com carga elétrica cria ao seu redor um campo elétrico, o qual pode aplicar uma força sobre qualquer outro objeto carregado eletricamente. Esse princípio, amplamente conhecido desde os tempos de Maxwell, não foi muito utilizado nas últimas décadas.

O maior problema do efeito eletroestático é que a sua intensidade decai com o quadrado da distância entre os dois objetos, porém, em escala micrométrica, devido a baixa razão de aspecto, essa distância é muito pequena. Essa é uma das razões pelas quais a tecnologia *MEMS* possui grande interesse em atuadores desse tipo, sendo a forma de atuação mais utilizada.

Em *MEMS*, esse tipo de atuador é comumente implementado através de uma estrutura chamada de pente de capacitores (*comb-drives*): dentes paralelos formam capacitores, um grupo de dentes (ou pente) está fixado ao substrato enquanto que o outro grupo está fixado a uma massa móvel, a diferença de voltagem entre os pentes gera uma força eletrostática capaz de deformar a mola suspensa e assim produzir deslocamento na direção desejada.

As principais vantagens da atuação eletroestática são: fácil integração com as demais partes da estrutura; alto grau de compatibilidade com as técnicas utilizadas em microfabricação como micro-usinagem de superfície; não são necessários passos extras de processamentos e nem deposição de materiais adicionais; baixa potência, a atuação é realizada por voltagem, sendo a corrente praticamente zero; rápido tempo de resposta, permitindo uma alta frequência de operação.

As principais desvantagens são: força e distância inversamente proporcionais, para obter grande força, a distância deve ser pequena; em algumas aplicações

necessita de encapsulamento, pois pequenas partículas podem ser depositadas nos pequenos espaçamentos da estrutura; vulnerável ao fenômeno de adesão (*stiction*) devido às forças moleculares; em alguns dispositivos pode necessitar de soltura por sacrifício (*sacrificial release*), nesse caso os materiais sacrificados devem ser removidos de forma limpa e eficiente; é impossível controlar o deslocamento através de todo o *gap*, apenas 1/3 da distância do *gap* pode ser atuado com confiabilidade; voltagem de operação é relativamente alta.

Entre as principais aplicações desses atuadores estão: microposicionadores, acelerômetros, giroscópios, ressonadores, micromotores e micro-espelhos controláveis. Essa última representa uma das aplicações de *MEMS* mais populares e rentáveis para a indústria atualmente. Trata-se do processamento digital de luz (*Digital Light Processing* ou *DLP*) desenvolvido pela Texas Instruments [9]. Em projetores *DLP*, a imagem é criada por espelhos microscópicos organizados em uma matriz sobre um chip semicondutor, conhecido como Dispositivo Microespelhado Digital (*Digital Micromirror Device* ou *DMD*). Cada espelho representa um pixel na imagem projetada, o número de espelhos corresponde à resolução dessa imagem.

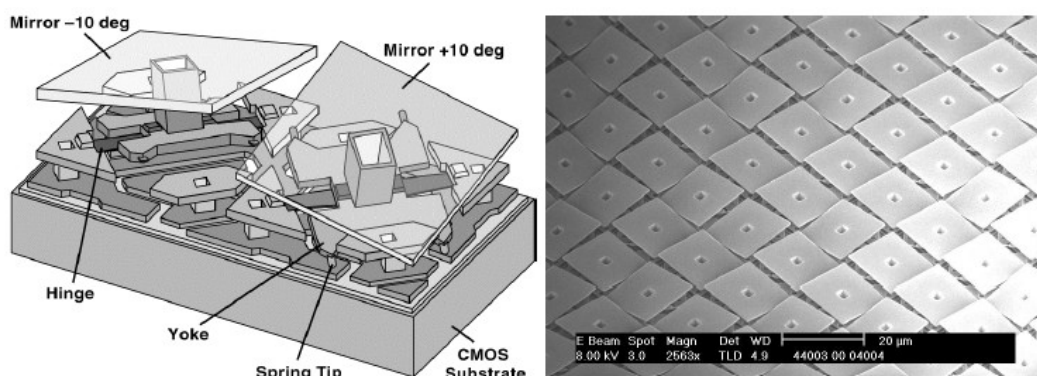


Fig 1.1 – Dispositivo Microespelhado Digital (*DMD*) [11].

1.2.2 – Piezelétrica

O efeito piezelétrico consiste na conversão de energia elétrica em energia mecânica através da aplicação de campo elétrico em materiais (em geral, cerâmicas) especificamente polarizados. Este efeito é conhecido desde 1880, quando foi observado em quartzo pelos irmãos Jacques e Pierre Curie. Eles constataram que quando certos tipos de cristais sofrem a ação de tensão mecânica, a carga resultante

causa a sua polarização e um campo elétrico é criado. Esse fenômeno é conhecido por efeito piezelétrico direto. O contrário também é verdadeiro, se aplicado um campo elétrico no cristal, ocorre o aparecimento de forças mecânicas (efeito piezelétrico inverso)

Esse efeito é característica de todos os cristais ferroelétricos, porém a grande maioria dos materiais naturais exibe esse efeito de maneira muito fraca, por isso para a aplicação em engenharia foi necessário o desenvolvimento de novas cerâmicas como o BaTiO_3 , Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), entre outras.

As principais vantagens da atuação piezelétrica são: baixa potência; alta frequência de operação; não produzem campos magnéticos e também não são afetados por eles; diferentemente dos dispositivos eletroestáticos, uma força de grande intensidade é facilmente obtida; não é sujeito a desgaste mecânico.

As principais desvantagens são: fabricação complexa e mais cara: são necessários passos extras de fabricação e materiais adicionais; o material necessita possuir um alto grau de pureza; processo de deposição do filme de material piezelétrico é pouco compatível com os demais processos; as propriedades piezelétricas do material são perdidas acima da temperatura de Curie; voltagem de operação alta.

Entre suas aplicações estão: acelerômetros, sensores de pressão, microposicionadores, biosensores, micromotores, entre outras. Dentro da categoria de biosensores, uma aplicação muito interessante são os sensores de flexão de placa por onda (*Flexural plate wave* ou *FPW*), nos quais a detecção é realizada através do monitoramento da mudança da frequência de ressonância e do fator de amortecimento quando o sensor interage com a amostra [12].

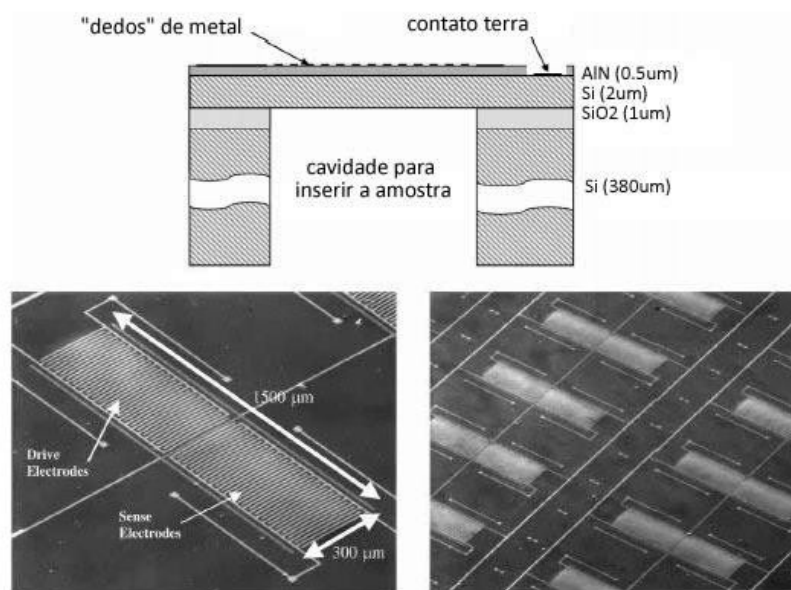


Fig. 1.2 – Sensor do tipo *FPW* [12].

1.2.3 – Eletrotermomecânica

O atuador eletrotermomecânico baseia-se na expansão térmica do sólido que o compõe, que é explicado pela dilatação do material sob aquecimento. Esse fenômeno é causado pelo aumento da distância média interatômica de todos os materiais sólidos quando aquecidos, a intensidade desse fenômeno varia de acordo com as características do material.

A forma de aquecimento mais comumente utilizada é a energia elétrica, na qual é aplicada uma tensão sobre o material e que através da resistência do mesmo, propicia o surgimento de uma potência elétrica que gera uma diferença de temperatura.

Para esse tipo de atuação, necessita-se que o material tenha altos valores de coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade. Existem diversos materiais compatíveis, em geral, utiliza-se o alumínio para a fabricação de dispositivos dessa classe, sendo que o níquel e o cobre também são largamente utilizados.

Mesmo com a escolha adequada de materiais, esse fenômeno ainda gera uma expansão pequena. Por isso, para fabricar um micro-atuador eficientemente, é necessário utilizar arranjos de vigas para que a atuação seja baseada na diferença de deslocamentos entre elas ao invés do deslocamento absoluto de uma única viga. Em

MEMS, esse tipo de atuador costuma ser implementado como vigas paralelas de braços assimétricos (diferentes larguras), vigas bimetálicas apoiadas num único ponto (*cantilever*) e termopares baseados no efeito *Seebeck*.

As principais vantagens dos atuadores térmicos são: amplitude de movimento relativamente grande; capacidade de gerar força de grande intensidade; possui grande densidade de trabalho;

As principais desvantagens são: alta potência devido ao fato de ser operado por corrente; baixo tempo de resposta.

Entre suas aplicações estão: sensores de fluxo, sensores infravermelho (microbolômetro), dispositivos de armazenagem de informação (Millipede), interruptores térmicos bimorfes e cartuchos de impressão para impressoras ink-jet.

O Millipede, ainda em processo de desenvolvimento pela empresa IBM, objetiva combinar as melhores características das memórias do tipo *DRAM* e dos discos rígidos. Ele utiliza muitas sondas de força atômica (*atomic force probes*) para ler e escrever um enorme número de bits simultaneamente na superfície de um polímero termo ativo [13].

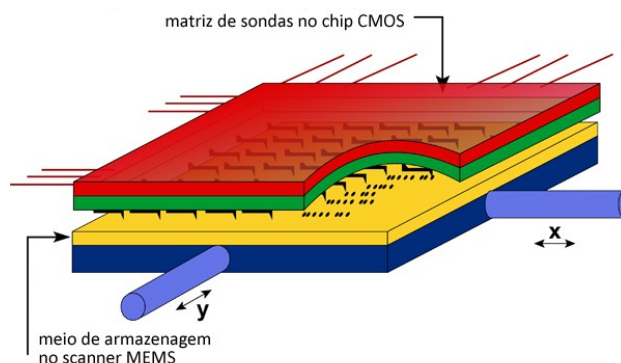


Fig. 1.3 – Ilustração esquemática do IBM Millipede.

Na figura 1.4 é apresentado o esquema básico de funcionamento de um cartucho de impressão para impressoras do tipo *inkjet*, a principal aplicação comercial de *MEMS* até o momento [14]. A figura 1.5 ilustra a localização dos bicos de impressão (*nozzles*) no cartucho.

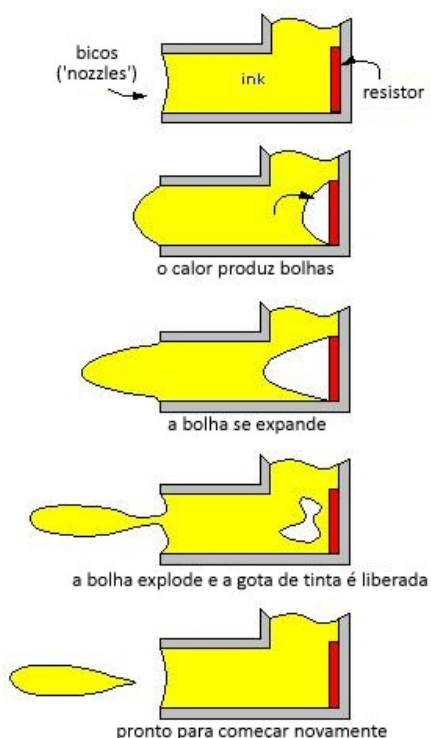


Fig. 1.4 – Princípio de Funcionamento impressoras *inkjet* [14].

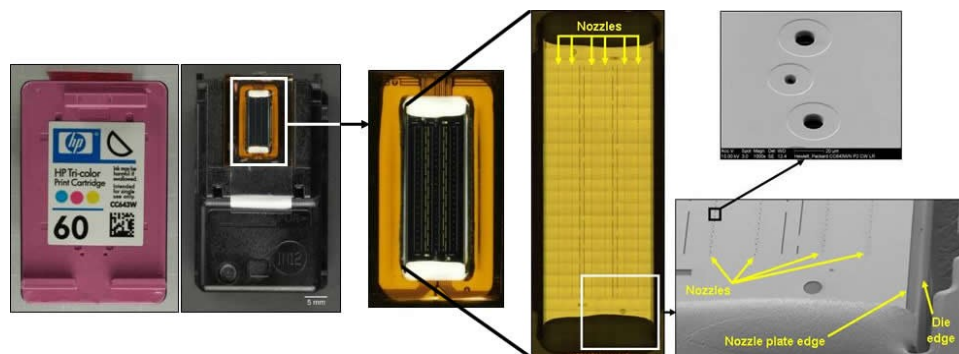


Fig. 1.5 – Localização dos bicos (*nozzles*) no cartucho de impressão.

1.2.4 – Liga de metais com memória de forma

Trata-se de uma forma bastante específica de atuadores térmicos descoberta em 1951. Ligas de metais com memória de forma (*Shape Memory Alloys* ou *SMA*s) como NiTi passam por uma transformação na sua estrutura cristalina de um estado fraco e facilmente deformável em baixas temperaturas para um estado duro e difícil de ser deformado em altas temperaturas. De maneira geral, o material é primeiramente deformado na forma desejada e aquecido muito acima da temperatura

de transição, nessas temperaturas a estrutura do cristal é austenita. O Resfriamento transforma o material em martensita, que deforma plasticamente em até 10% com a aplicação de uma tensão relativamente baixa. Quando ele é aquecido novamente acima da temperatura de transição, ele reverte sua forma e pode exercer uma força muito grande (em torno de 100Mpa) [15].

As principais vantagens dos atuadores baseados em *SMA*s são: capacidade de gerar força de grande intensidade; baixa voltagem de operação; maior densidade de trabalho entre todos os atuadores utilizados em *MEMS* [16].

As principais desvantagens são similares às apresentadas pelos atuadores térmicos: baixas frequências de operação; fabricação complexa; baixa eficiência energética (tipicamente abaixo de 10%); sujeita ao fenômeno da fadiga [16].

Em *MEMS* essa forma de atuação encontra aplicações na área de microfluidos como microválvulas e microbombas, entre outras. Além disso, a indústria aeronáutica e algumas áreas da medicina e bioengenharia estão desenvolvendo aplicações inovadoras para as *SMA*s.

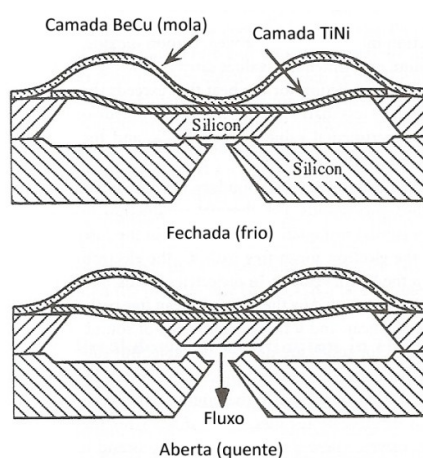


Fig. 1.6 – Seção transversal de uma micro-válvula baseada em *SMA* [15].

1.2.5 – Eletromagnética

No mundo macro, forças eletromagnéticas dominam o desenvolvimento de atuadores como os motores convencionais. No entanto, devido à natureza tridimensional dos magnetos e solenóides, sistemas eletromagnéticos são difíceis de ser fabricados utilizando as técnicas convencionais de microfabricação planar.

Entre as áreas de maior interesse para *MEMS* estão: levitação magnética (*maglev*), no desenvolvimento de micromotores e magneto-estrictiva ou piezo magnetismo, no desenvolvimento de sensores de torque, materiais de flexibilidade variável e amortecedores de vibração [17].

As principais vantagens desse tipo de atuador são: extenso alcance de trabalho; relativamente insensível a contaminações nos *gaps*; baixa voltagem de operação; alta densidade de energia de campo;

As principais desvantagens são: difícil miniaturização; fabricação complexa; frequências de operação intermediárias; baixa eficiência energética; fenômeno não linear.

Entre suas aplicações estão: micromotores, microbombas, micro-espelhos, entre outras.

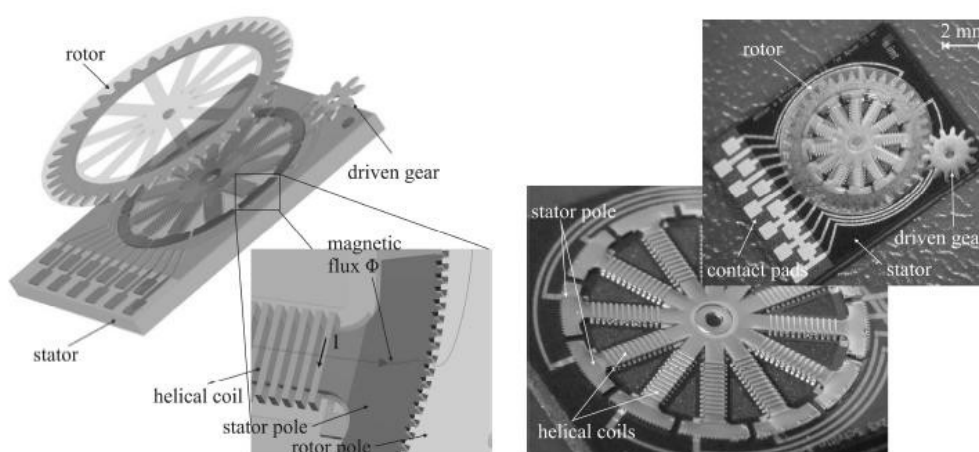


Fig. 1.7 – Conceito de micromotor (esq.) e foto do dispositivo fabricado (dir.) [17].

1.3 – Objetivos

O objetivo deste trabalho será inicialmente estudar o comportamento de um microposicionador com dois graus de liberdade XY e com atuação baseada em pentes de capacitores (*comb-drives*).

O protótipo a ser estudado foi fabricado com recursos do *Nano-CEMMS* (*Center for Nanoscale Chemical-Electrical-Mechanical Manufacturing Systems*) da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign nos Estados Unidos, coordenado pelo Professor Dr. Placid M. Ferreira. Tratou-se de um trabalho em conjunto do

aluno de graduação André da Costa Teves da Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e do mestrando Bonjin Koo da Engenharia Mecânica da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign.

Esse estudo envolverá as seguintes etapas:

- Análise do projeto do dispositivo e de seus processos de fabricação: visando agregar conhecimento sobre as considerações de projeto e fabricação utilizadas, etapa importante para o decorrer do trabalho;
- Modelagem e simulação computacional: será utilizado o software Ansys para a análise estática e modal do microposicionador;
- Caracterização e testes do protótipo: através da medição de deslocamentos e voltagens e comparação com os resultados obtidos na etapa de simulação computacional;

Ao término de todas essas etapas, o conhecimento agregado sobre o protótipo será somado a um estudo de otimização topológica com o objetivo de se obter uma versão otimizada do microposicionador.

1.4 – Justificativas

Este trabalho apresenta o resultado de uma parceria na área de nanotecnologia entre duas das mais renomadas instituições de ensino do mundo, a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Brasil) e o Colégio de Engenharia da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (Estados Unidos). A sua característica mais importante é a transferência de tecnologia e conhecimento entre esses dois países, com ganhos significativos para ambos.

De um lado, um protótipo fabricado com tecnologia não disponível no Brasil será fornecido pela instituição americana. De outro, um estudo muito criterioso será realizado com o objetivo final de se atingir um projeto otimizado desse dispositivo.

O protótipo a ser estudado é uma plataforma de microposicionamento, uma importante classe de dispositivos *MEMS* da atualidade, utilizados para a micro e nanomanipulação e para a tecnologia de sonda. O domínio sobre o seu ciclo de desenvolvimento representa um componente importante para a evolução dessa tecnologia no país.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – Atuação Eletroestática

Em *MEMS*, os tipos de atuação eletroestática mais utilizadas são: capacitor de placas paralelas, para atuação fora do plano e pente de capacitores (*comb-drives*), para atuação no plano.

2.1.1 – Capacitor de placas paralelas

O transdutor mais básico de *MEMS* é um capacitor de placas paralelas, com uma de suas placas móvel. Devido à presença de cargas elétricas opostas nas placas, sempre haverá força de atração entre elas.

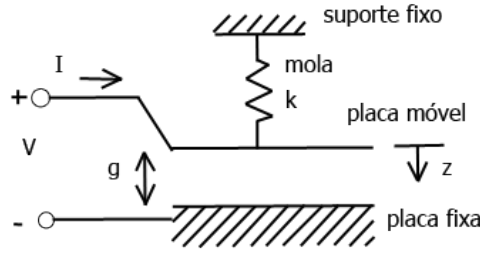


Fig. 2.1 – Esquemático de capacitor e suas variáveis.

Do ponto de vista elétrico, as equações que regem esse sistema são:

$$C = \frac{\epsilon A}{g} \quad (2.1)$$

$$W = \frac{CV^2}{2} \quad (2.2)$$

$$Q = \left. \frac{\partial W}{\partial V} \right|_g \quad CV = \frac{\epsilon A}{g} V \quad (2.3)$$

$$F = \left. \frac{\partial W}{\partial g} \right|_V = \frac{\epsilon AV^2}{2g^2} \quad (2.4)$$

onde A = área das placas paralelas, ϵ = permissividade elétrica, g = espaçamento (*gap*) entre as placas, W = energia capacitiva armazenada, V = tensão aplicada, Q = carga nas placas, F = Força de atração entre as placas.

Do ponto de vista mecânico, as seguintes equações devem ser consideradas:

$$z = \frac{F}{k} \quad (2.5)$$

$$g = g_o - z \quad (2.6)$$

onde z = deslocamento da mola, k = constante da mola, g_o = posição inicial da mola.

Resolvendo o sistema formado pelas eq. (2.4), (2.5) e (2.6) conclui-se que:

$$g = g_o - \frac{\varepsilon AV^2}{2kg^2} \quad (2.7)$$

Existe uma voltagem crítica que torna o sistema instável fazendo com que o *gap* g vá repentinamente a zero. O estudo dessa voltagem (*snap-down voltage*) é muito importante no projeto de um dispositivo *MEMS* eletroestático, pois exceder a voltagem máxima resultará em danos permanentes a estrutura e a relação voltagem/deslocamento não pode ser controlada de forma linear.

Para se determinar a voltagem crítica deve ser feito um estudo de estabilidade do equilíbrio. A uma dada voltagem V e um *gap* g , a força resultante na massa é dada por:

$$F_{result} = \frac{\varepsilon AV^2}{2kg^2} - k(g_o + g) \quad (2.8)$$

É interessante observar como a força resultante varia com uma pequena variação de g :

$$\left. \frac{\partial F_{result}}{\partial g} \right|_V = \left(\frac{\varepsilon AV^2}{g^3} - k \right) \quad (2.9)$$

Se $\partial F > 0$ para $\partial g > 0$ então o sistema encontra-se em um ponto instável de equilíbrio, isto é, um pequeno aumento em g resulta em uma força que aumentará g ainda mais. Por isso, para atingir a estabilidade é necessário que a seguinte inequação seja satisfeita:

$$\left(\frac{\varepsilon AV^2}{g^3} - k \right) < 0 \quad (2.10)$$

Para projetar a mola de forma adequada é necessário que:

$$k > \frac{\varepsilon AV_{snap}^2}{g_{snap}^3} \quad (2.11)$$

A distância e voltagem críticas são [18]:

$$g_{snap} = \frac{2}{3} g_o \quad (2.12)$$

$$V_{snap} = \sqrt{\frac{8kg_o^3}{27\epsilon A}} \quad (2.13)$$

Note que a eq.(2.12) restringe o movimento das placas para apenas 1/3 da distância total entre elas.

2.1.2 – Pente de capacitores (*comb-drives*)

Esse atuador recebe esse nome pela sua grande semelhança com pentes de cabelo. Ele é formado por dois conjuntos (ou pentes) cada um com uma grande quantidade de dentes paralelos. Um dos pentes é fixo ao substrato enquanto que o outro é conectado a uma massa móvel através de feixes de molas, a diferença de voltagem entre os pentes gera uma força eletrostática que resulta em movimento da massa móvel. A figura 2.2 ilustra um dispositivo que possui um pente de capacitores como forma de atuação:

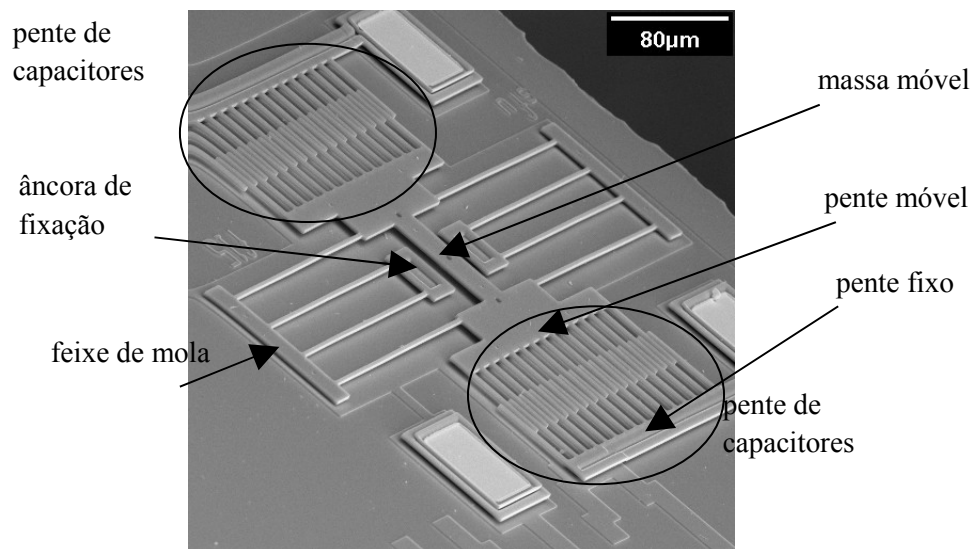


Fig. 2.2 – Dispositivo *MEMS* com pente de capacitores.

Esse tipo de atuador pode ser dividido basicamente em duas classes: pente de capacitores com movimento paralelo aos dentes ou com movimento normal aos dentes. O primeiro é normalmente utilizado em atuadores, devido a sua relativamente

grande amplitude de movimento, enquanto o segundo é mais comumente encontrado em sensores, devido a sua maior sensibilidade.

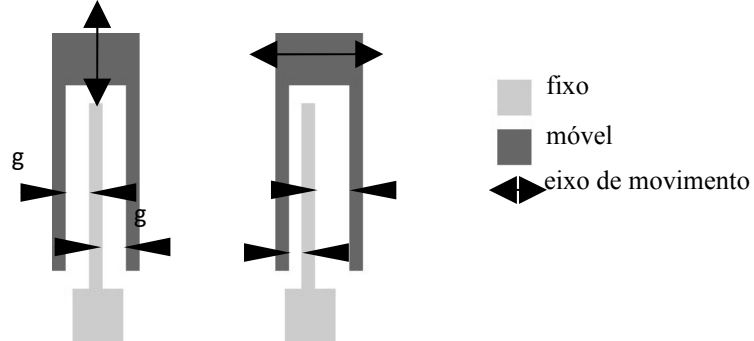


Fig. 2.3 – Pontes de capacitores com movimento paralelo e normal ao dente

Será dado foco a primeira categoria, pois trata-se da configuração utilizada no dispositivo em estudo nesse trabalho.

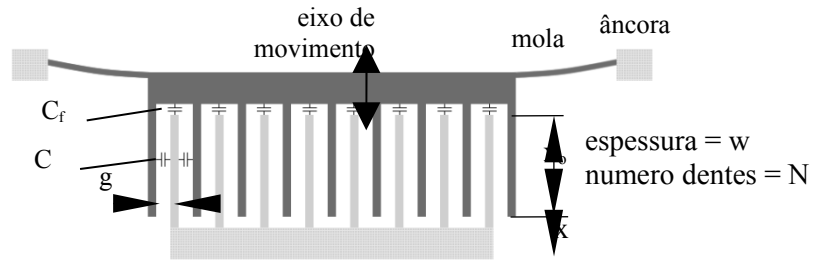


Fig. 2.4 – Pente de capacitores com movimento paralelo aos dentes.

Nesse caso, a capacitância total é proporcional a sobreposição e espessura dos dentes e inversamente proporcional à distância. Para o cálculo da capacitância do conjunto considera-se cada par de dentes como um capacitor de placas paralelas, resultando assim na seguinte equação:

$$C = N \left[\frac{2\epsilon_o w (x_o + x)}{g} \right] C_f \quad (2.14)$$

A força de atração é dada por:

$$F = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} C V^2 \right) = \frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{N \epsilon_o w}{g} V^2 \quad (2.15)$$

2.2 – Método dos Elementos Finitos

Devido à necessidade de estudos mais complexos das estruturas dos projetos elaborados e com o grande avanço do processamento computacional, é comum nos

dias de hoje, utilizar-se de métodos que simplificam a análise e permitem uma melhor visualização do comportamento da estrutura. Nesse contexto, tem-se o desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos.

O método de Elementos finitos é um procedimento numérico que pode ser utilizado para obter soluções para uma variedade abrangente de problemas em Engenharia envolvendo análise de tensões, transferência de calor, eletromagnetismo, comportamento de fluídos, entre outras.

Ele tem como objetivo dividir o sistema complexo em diversos elementos mais simples e nós, e a partir dessa divisão elaborar cálculos de forma que o resultado obtido para cada subdomínio represente uma aproximação adequada do sistema final agrupado. Toma-se como pressuposto para esta divisão que os deslocamentos nos nós (pontos comuns a vários elementos), sejam compatíveis e as forças internas estejam em equilíbrio.

As equações para cada elemento podem ser derivadas através da aplicação de leis fundamentais ou princípios da natureza para o sistema estudado. Assim, discretizando o objeto em estudo em pequenos elementos pode-se obter a equação de movimento do sistema global. Dessa forma, o estudo do movimento em um ponto no interior de cada elemento é possível por intermédio de interpolação onde as funções interpolação são polinômios de grau reduzido e iguais para elementos do mesmo tipo.

Outra vantagem desse método é a facilidade com que ele pode ser generalizado tanto para estruturas bidimensionais, quanto tridimensionais. Além de ser possível utilizá-lo para vários materiais e fronteiras irregulares.

Como dito anteriormente, o Método dos Elementos Finitos não apresenta uma solução exata para o problema, sendo que o resultado obtido convergirá para essa solução quanto mais elementos forem utilizados na discretização do modelo.

Nesse trabalho será utilizado o software ANSYS para a modelagem e simulação do dispositivo em estudo.

2.2.1 – Equações constitutivas

As equações constitutivas para análise de dispositivos capacitivos, como os *comb-drives*, são dadas por:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E} \quad (2.16)$$

onde \mathbf{D} é o vetor de deslocamento elétrico, $\boldsymbol{\varepsilon}$ é a matrix de permissividades elétricas e \mathbf{E} é o vetor de campo elétrico.

Na forma matricial, a equação acima fica definida na seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Esta equação será resolvida pela formulação de MEF para cada um dos elementos da malha.

2.2.2 – Modelagem no Ansys

O Ansys apresenta uma série de ferramentas que auxiliam na modelagem, simplificando a estrutura do modelo. No caso deste trabalho, por se tratar de um sistema eletromecânico, o Ansys apresenta métodos que permitem analisar simultaneamente as forças eletrostáticas com as soluções estruturais, encontrando as interdependências dessas duas propriedades físicas.

O pacote de multi-física do Ansys possui 3 elementos [19] para a análise eletrostática-estrutural: TRANS109, ROM144 e TRANS126. Nesse trabalho será utilizado especialmente o elemento TRANS126 [20].

TRANS 126 - Transdutor Eletromecânico

Para a análise estrutural pelo método dos elementos finitos, o software Ansys oferece um elemento de natureza capacitiva que converte energia eletrostática em mecânica (e vice-versa), além de permitir o armazenamento de energia. Esse

transdutor é utilizado para a simulação de componentes micro-eletromecânicos (*MEMS*) e possibilita a análise estática, modal, harmônica e transiente.

O elemento possui até dois graus de liberdade em cada nó: movimento translacional na direção do eixo e potencial elétrico.

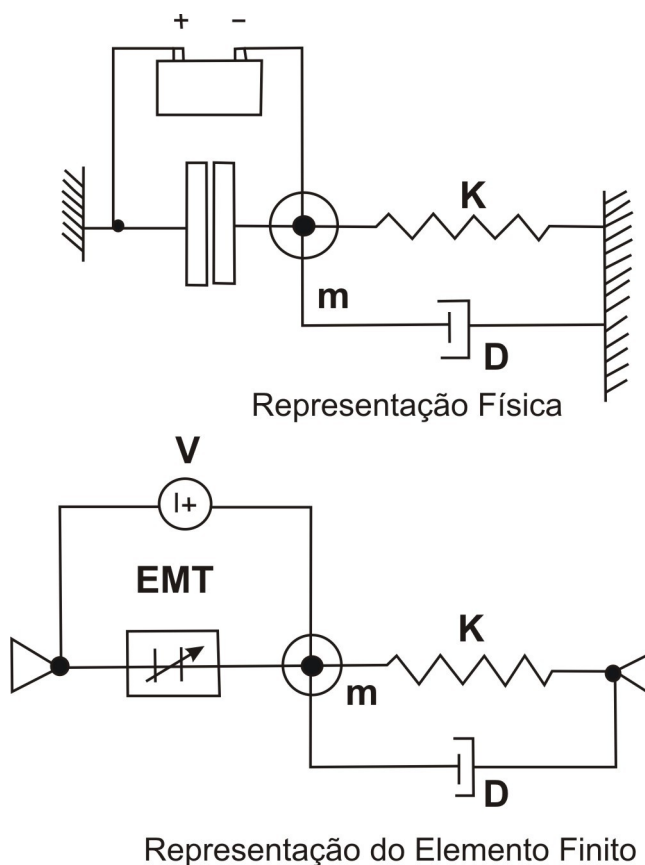


Fig. 2.5 – Elemento TRANS 126.

Para o funcionamento correto do TRANS126 na simulação do ANSYS, deve-se posicionar o elemento de forma correta, sendo que são necessários dois nós para definir a posição do mesmo. Esses dois nós devem estar alinhados com um dos eixos cartesianos ou com um sistema de coordenadas arbitrário.

Outro cuidado a ser tomado no posicionamento é a ordem que são definidos os nós, onde o deslocamento relativo do nó J em relação ao nó I deve ser sempre positivo, com a intenção de se abrir o GAP.

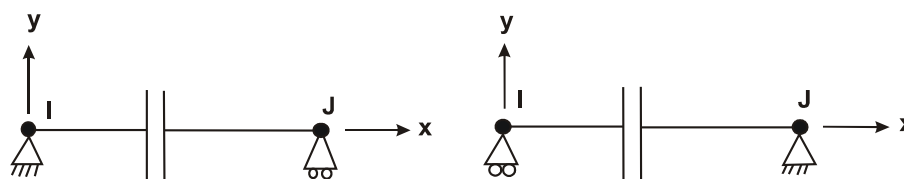


Fig. 2.6 - Orientações válidas do TRANS126.

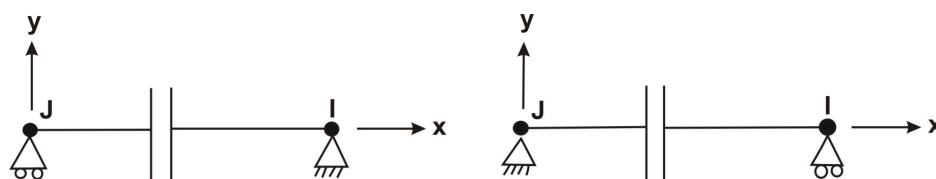


Fig. 2.7 - Orientações Inválidas do TRANS126.

Para a realização da simulação, também deve ser informado ao Ansys, a curva de capacitância que os elementos TRANS126 devem seguir, através de constantes ou através de pares capacitância-posição que o Ansys irá utilizar para estimar os valores intermediários da curva.

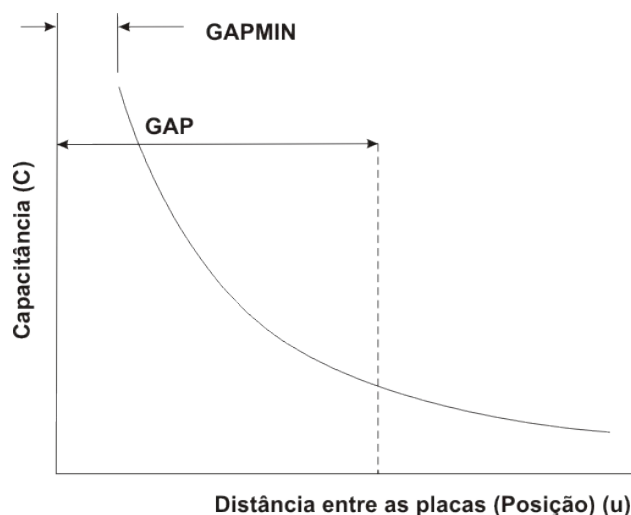


Fig. 2.8 – Curva capacitância-posição.

A corrente que percorre o sistema é dada por:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = C \frac{dV}{dt} + \frac{dC}{dx} v V \quad f(V, x, w, v) \quad (2.18)$$

onde I = corrente, t = tempo, x = tamanho do *gap*, v = velocidade de abertura do *gap* ($=dx/dt$), C = capacitância, V = tensão entre os eletrodos do capacitor e w = taxa de variação da tensão ($=dV/dt$).

O primeiro termo é a corrente capacitiva devido à variação da tensão e o segundo termo é a corrente induzida pelo movimento.

A força de atração entre os dois pratos é dada por:

$$F = \frac{1}{2} \frac{dC}{dx} V^2 \quad F(V, x, w, v) \quad (2.19)$$

Para análise de sinais pequenos, as eq. (2.18) e (2.19) podem ser expandidas em série de Taylor, mantendo-se apenas os termos de primeira ordem. O resultado, como obtido em [20], é dado por:

$$I = I_o + D_{vX} \frac{dv}{dt} + D_{vV} \frac{dV}{dt} + K_{vX} x + K_{vV} \Delta V \quad (2.20)$$

$$F = F_o + D_{xX} \frac{dv}{dt} + D_{xV} \frac{dV}{dt} + K_{xX} x + K_{xV} \Delta V \quad (2.21)$$

onde:

$$K_{vV} = \frac{dI}{dV}; \quad K_{vX} = \frac{dI}{dx}; \quad K_{xV} = \frac{dF}{dV}; \quad K_{xX} = \frac{dF}{dx} \quad (2.22)$$

$$D_{vV} = \frac{dI}{dw}; \quad D_{vX} = \frac{dI}{dv}; \quad D_{xV} = \frac{dF}{dw}; \quad D_{xX} = \frac{dF}{dv} \quad (2.23)$$

K e D são as matrizes tangenciais de rigidez e amortecimento que descrevem a resposta do transdutor a pequenas perturbações, F_o = força no ponto de operação, I_o = corrente no ponto de operação, Δx = *gap* entre o ponto de operação e a solução real, ΔV = variação de tensão entre o ponto de operação e a solução real.

Uma descrição mais detalhada do elemento TRANS126 pode ser encontrada em [21].

2.3 – Fabricação de MEMS

Uma parte muito importante da tecnologia utilizada para fabricação de dispositivos *MEMS* foi aproveitada da tecnologia de fabricação de circuitos integrados. Como ocorre com os circuitos integrados, os *MEMS* são fabricados a partir de processos de microfabricação, os quais podem ser divididos basicamente em dois tipos: microfabricação em volume (*bulk micromachining*) e microfabricação de superfície (*surface micromachining*).

Microfabricação em volume significa que estruturas tri-dimensionais serão geradas no volume do material, através da remoção de grande porções de material do próprio substrato. Em contraste, estruturas fabricadas através de microfabricação de superfície são construídas camada por camada na superfície do substrato, sem alterar

significativamente o mesmo. Ambos processos se iniciam a partir de um substrato, silício por exemplo, e de um ou mais passos de litografia.

O substrato geralmente é um disco circular (*wafer*) de material semicondutor com diâmetro entre 2 e 12 polegadas e espessura entre 300 e 800 μ m, sendo que silício é o material mais utilizado. Esses discos são formados de um material de altíssimo grau de pureza, apresentam estrutura mono-cristalina quase perfeita e podem ser do tipo p ou n dependendo do dopante utilizado. Além disso, dependendo da aplicação, podem possuir diferentes tipos de acabamento ou polimento.

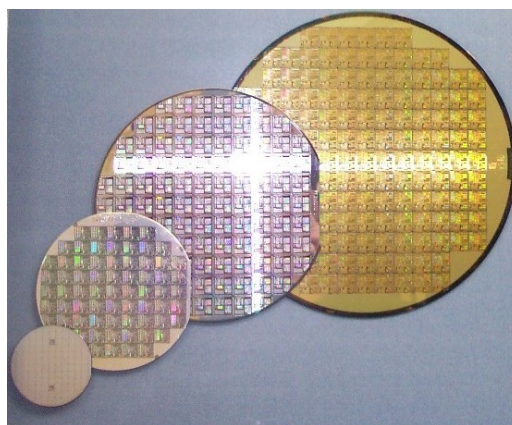


Fig. 2.9 – *Wafers* de diferentes tamanhos com chips.

Nesse estudo foi utilizado um tipo de *wafer* muito específico chamada de silício sobre isolante (*silicon on insulator* ou *SOI*), que recebe esse nome devido a sua estrutura em três camadas, silício-isolante-silício: uma fina camada de silício com espessura entre 1-50 μ m (*device layer*), abaixo da qual encontra-se a camada de isolante, normalmente óxido de silício, com espessura entre 1-5 μ m e uma última camada espessa de silício (*handle layer*) que funciona como suporte.

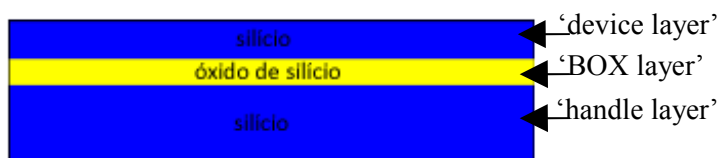


Fig. 2.10 – Estrutura de 3 camadas de uma 'wafer' de silício sobre isolante.

Essa tecnologia começou a ser utilizada pela IBM em 2000 e atualmente está presente em grande parte dos processadores fabricados. Suas principais vantagens são: a camada intermediária de SiO₂ pode ser utilizada como material isolante,

material de sacrifício ou como excelente barreira (*etch-stop*) para processos de corrosão; controle preciso da espessura da primeira camada de silício; redução dramática no número de processos necessários; entre outras.

Os principais processos utilizados em microfabricação são: litografia, oxidação, deposição de filmes, ataque químico ou corrosão (*etching*) e dopagem por difusão ou por implantação de íons.

Eles podem ainda ser divididos em duas categorias: aditivos e substrativos. A deposição e oxidação são técnicas aditivas, enquanto o ataque químico é substrativo. Todos esses processos, com exceção de dopagem e oxidação, foram utilizados na fabricação do dispositivo em estudo e por isso serão detalhados nas próximas seções.

2.3.1 – Litografia

Um dos aspectos mais importantes da microfabricação é a litografia ou fotolitografia, técnica através da qual se define os contornos desejados e que serão posteriormente processados pelas demais técnicas.

A litografia pode ser classificada nos seguintes processos:

Deposição do resiste: O substrato é fixado em uma base por sucção a vácuo e deposita-se sobre ele uma camada de um polímero orgânico viscoso e sensível a luz ultra violeta, chamado de resiste (*photoresist*). Finalmente, o substrato é colocado para girar em alta velocidade (1500-8000 rpm). As forças centrífugas presentes nessa velocidades fazem com que o resiste flua radialmente para fora, de forma a produzir um filme uniforme sobre a superfície. A espessura resultante T do polímero pode ser estimada através da seguinte fórmula empírica [15]:

$$T = \frac{\kappa M^{\beta} \eta}{\omega^{\alpha}} \quad (2.24)$$

onde κ = constante de calibração; M = concentração do polímero em g/100mL; η = viscosidade; ω = rotações por minuto (rpm); α, β, λ = constantes dependentes do equipamento.

O resiste possui três componentes básicos: resina, solvente e sensibilizador. Existem dois tipos de resists, positivos e negativos, sendo que a diferença básica entre eles está no sensibilizador utilizado. Em um resiste positivo, a parte exposta a

luz se torna solúvel no desenvolvedor (*developer*) e a parte não exposta continua insolúvel. O oposto ocorre no resiste negativo. A tabela 2.1 [15] ilustra as principais características de cada resiste.

Tab. 2.1 – Características dos diferentes tipos de resiste.

	Positivo	Negativo
Adesão ao silício	razoável	Excelente
Custo	mais caro	menos caro
Desenvolvedor	base aquosa	solvente orgânico
Tempo de desenvolvimento	curto	grande, insensível ao sobre desenvolvimento (<i>overdeveloping</i>)
Resolução mínima	abaixo 0,5 μm	2 μm
Estabilidade térmica	boa	razoável

Aquecimento do resiste: após a deposição, o resiste ainda contém solvente e pode estar sobre tensão mecânica. Sendo assim, a *wafer* é aquecida (*soft baking*) a 75-110° entre 3-10min para remover o solvente residual, a tensão e para promover a adesão entre as superfícies.

Alinhamento da máscara ao substrato: A máscara possui o padrão que se deseja transferir ao substrato. Ela é composta de um substrato transparente sobre o qual existe uma camada de material opaco a luz ultra violeta, que exhibe o padrão a ser transferido para a *wafer*. O padrão opaco na máscara é obtido por outro processo litográfico, que necessita possuir resolução mínima melhor do que a própria litografia, em geral é utilizada litografia por feixe de elétrons (*E-beam lithography*) ou por feixe de íons (*Ion-beam lithography*).

Com o objetivo de construir dispositivos complexos, os padrões de diferentes passos litográficos devem estar muito bem alinhados uns com os outros. O primeiro padrão transferido normalmente inclui um conjunto de marcas de alinhamento que são utilizadas como referência para os passos subsequentes. Ao fornecer a localização da

marca de alinhamento é fácil para o operador posicionar a próxima máscara em um curto espaço de tempo.

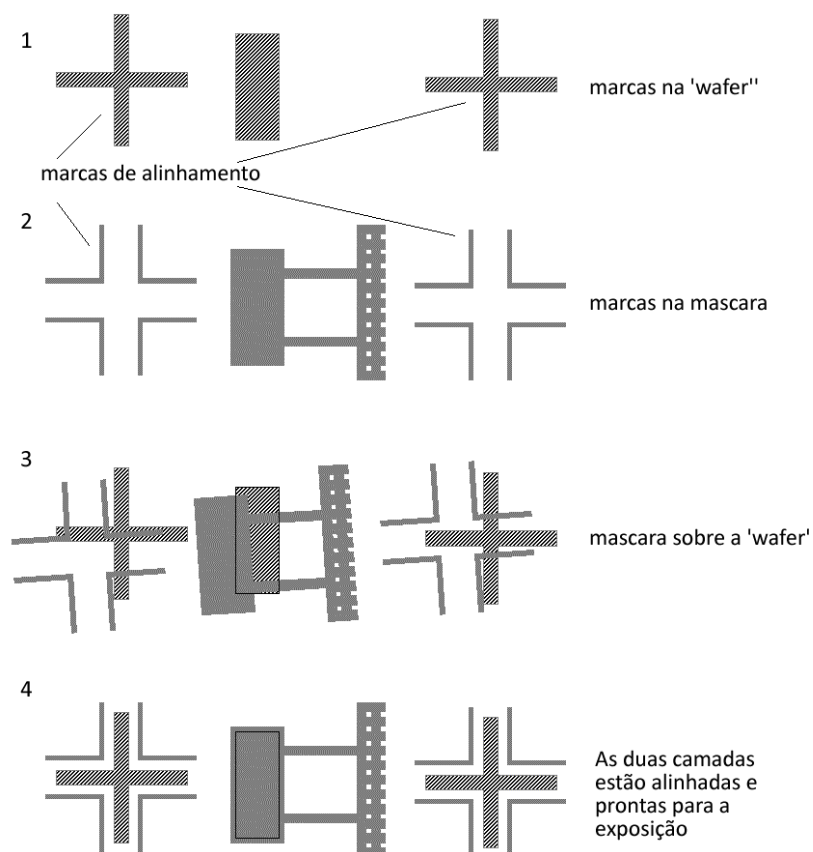


Fig. 2.11 – Processo de alinhamento da máscara com o substrato [22].

Exposição do resiste: Após o alinhamento, uma quantidade controlada de radiação UV expõe o resiste através das janelas da máscara.

Revelação do resiste: Depois da exposição, o padrão transferido necessita ser revelado. Existem dois tipos principais de revelação: úmido e a seco. No primeiro caso são utilizados soluções com solventes (*developer*): resistes positivos são desenvolvidos em solução alcalina aquosa e resistes negativos em soluções orgânicas. No caso da revelação a seco utilizam-se processos baseados em fase gasosa ou plasma, muito menos prejudiciais ao meio ambiente.

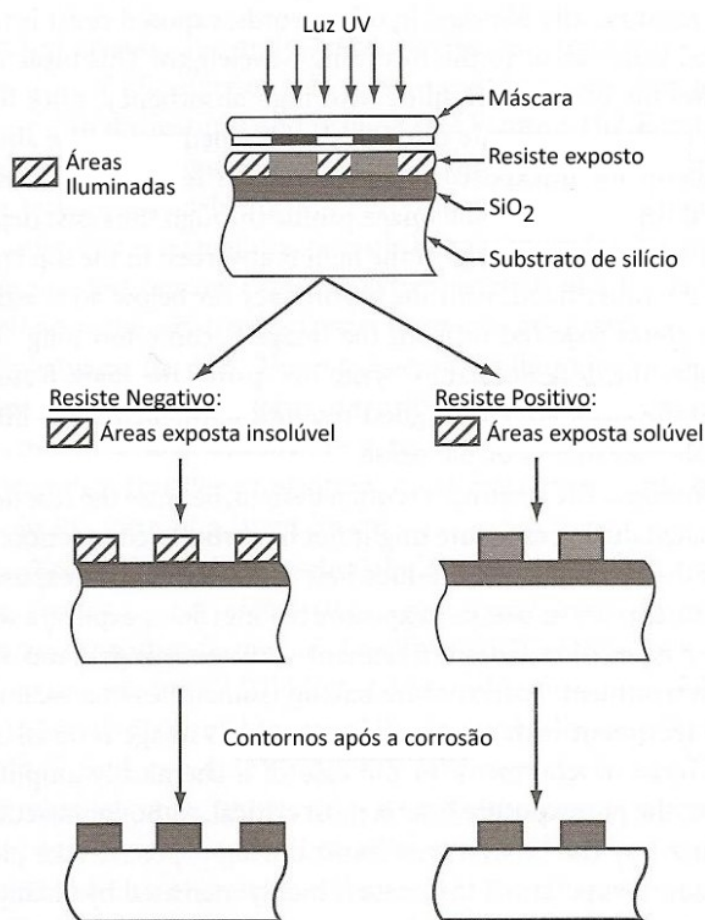


Fig. 2.12 – Resistes positivos e negativos após o desenvolvimento e corrosão.

Pós-aquecimento: Caso se deseje utilizar o padrão revelado de resiste como máscara para um próximo processo de corrosão, é necessário pós-aquecimento (*hard baking*). Esse processo geralmente ocorre a temperaturas mais altas (120°C) por um tempo prolongado (20 min) com o objetivo de remover solventes residuais, restaurar a adesão entre as superfícies que pode ter sido afetada pelo processo de revelação e aumentar a dureza do filme de resiste.

Remoção do resiste: Quando o resiste não é mais necessário, o mesmo deve ser removido através de uma solução chamada de removedor (*stripper*), um ácido forte como o H_2SO_4 ou uma combinação ácido-oxidante como $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-Cr}_2\text{O}_3$. A figura 2.13 ilustra os processos descritos acima de forma sequencial.

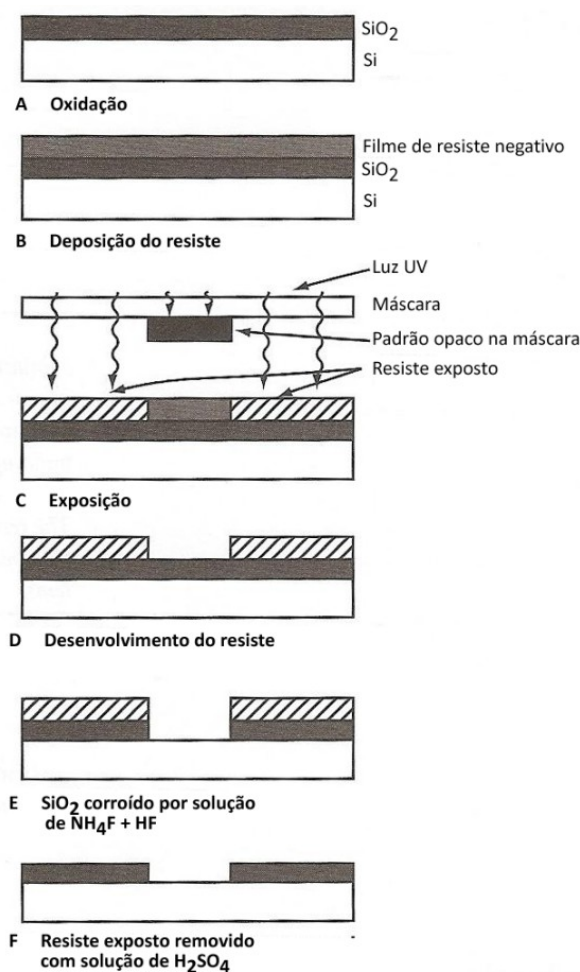


Fig. 2.13 – Sequência de litografia e transferência de padrão.

Uma *wafer* oxidada com SiO₂ (A) é revestida com uma camada de resiste (B). Após a exposição a luz ultra violeta (C), a *wafer* é enxaguada em uma solução de desenvolvimento que remove as áreas não expostas (no caso de resiste negativo) e deixa um padrão ou contorno bem definido na superfície (D). Em um passo bastante comum, após o desenvolvimento a *wafer* é colocada em uma solução de ácido flúídrico (HF) que atacará apenas o óxido e não afetará o resiste ou o silício (E). Posteriormente, o resiste que havia sido exposto e já não é mais necessário deve ser removido através de uma solução chamada de *stripper* que atacará apenas o resiste mas não o óxido ou o silício (F).

A sequência descrita acima se repete inúmeras vezes na fabricação de um dispositivo *MEMS*. Muitos processos são descritos pelo número de passos de litografia necessários, ou seja, quanto mais máscaras ou passos são necessários, mais complexo é o processo.

2.3.2 – Deposição de filmes

Um dos blocos construtivos básicos da microfabricação é a habilidade de depositar filmes finos de material sobre um substrato. A tecnologia de deposição pode ser classificada em dois grupos [22]:

Deposições que ocorrem a partir de uma reação química: Deposição Química de Vapor (*Chemical Vapor Deposition* ou *CVD*), eletrodeposição, crescimento Epitaxial e oxidação térmica. Esses processos exploram a criação de materiais sólidos diretamente de reações químicas em gases e/ou líquidos ou com o material do substrato. O material sólido depositado não costuma ser o único produto formado pela reação, podem ser produzidos outros gases, líquidos e até sólidos.

Deposições que ocorrem a partir de uma reação física: Deposição Física de Vapor (*Physical Vapor Deposition* ou *PVD*) ou Fundição. Comum a esses processos é o fato do material depositado se mover fisicamente até o substrato, em outras palavras, não existe reação química na formação dos materiais depositados.

A oxidação térmica também pode ser compreendida como uma outra forma de deposição de filmes finos. Entre todos esses processos, apenas Deposição Física de Vapor foi utilizada na fabricação do dispositivo proposto, portanto esse será o foco desse estudo.

Deposição Física de Vapor

A *PVD* consiste da técnica de deposição de metais mais utilizada atualmente, seguida de *CVD*. É mais popular que o *CVD* pois além de ser mais barata, apresenta riscos menores de operação [22]. A qualidade do filme é inferior, o que do ponto de vista de metais significa maior resistividade e para os isolantes, mais defeitos. A cobertura por passo também não é tão boa quanto a alcançada por *CVD*.

Essa técnica abrange diversas tecnologias de deposição nas quais material é liberado de uma fonte e transferido para o substrato. Dentre elas, as duas mais importante são evaporação e *sputtering*. A última foi utilizada na fabricação do dispositivo em estudo.

Sputtering

Sputtering é uma tecnologia em que o material é liberado da fonte em uma temperatura muito inferior do que a evaporação. O substrato é posicionado em uma câmara de vácuo com o material fonte, aqui chamado de alvo, e um gás inerte (Argônio) é introduzido a baixa pressão. Um plasma é gerado através de uma fonte de energia RF (radio-frequência), o que provoca a ionização do gás. Os íons são acelerados em direção ao alvo de forma a bombardeá-lo, com isso os átomos do material são liberados na forma de vapor e se alojam em todas as superfícies da câmara incluindo o substrato.

Essa técnica é preferida em relação a evaporação devido a grande gama de materiais com que se pode trabalhar, melhor cobertura por passo e melhor adesão ao substrato.

Um diagrama esquemático de um típico sistema *Sputtering* RF é apresentado na figura 2.14.

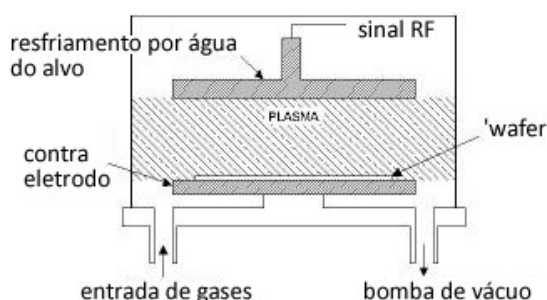


Fig. 2.14 – Configuração típica de um ‘Sputtering’ RF.

2.3.3 – Corrosão

Para fabricar dispositivos *MEMS*, é fundamental poder corroer (*etch*) filmes previamente depositados e/ou o próprio substrato. O processo de corrosão costuma ser dividido em duas classes distintas:

Corrosão úmida na qual o material é dissolvido quando imerso em uma solução química;

Corrosão a seco: na qual o material é removido ou dissolvido através de íons reativos ou químicos corrosivos na forma de gás.

A seguir serão discutidos cada um desses processos.

Corrosão úmida

À primeira vista, trata-se de uma tecnologia de corrosão bastante simples, pois tudo que ela requer é um recipiente contendo a solução química que será utilizada para dissolver o material em questão. No entanto existem algumas complicações.

A primeira delas é o fato de normalmente ser necessário uma máscara para corroer o material de forma seletiva, deve ser utilizada uma máscara que não dissolva ou pelo menos que seja consumida em um ritmo muito mais lento do que o material alvo.

Em segundo lugar, alguns materiais monocristalinos, como o silício, exibem corrosão anisotrópica dependendo do químico utilizado, o que significa taxas diferentes de corrosão em diferentes planos cristalográficos do material. O exemplo mais clássico é o do plano cristalino $\langle 111 \rangle$ que surge quando corroe-se um buraco em uma *wafer* de silício com orientação $\langle 100 \rangle$ utilizando um químico como o hidróxido de potássio (KOH). O resultado é um buraco no formato de uma pirâmide ao invés de um buraco arredondado que surgiria no caso do uso de um químico isotrópico. Esse princípio está ilustrado na figura 2.15.

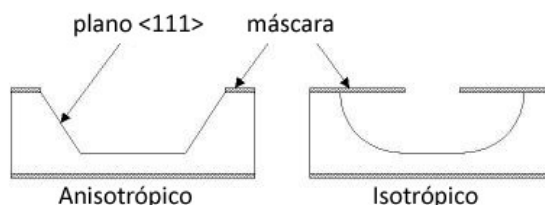


Fig. 2.15 – Perfil Anisotrópico e Isotrópico.

Note a ocorrência de sob-corte (*under cutting*) no caso do perfil isotrópico: mesmo com a proteção da máscara ocorre corrosão do material logo abaixo dela na mesma distância da profundidade.

A figura 2.16 apresenta uma imagem obtida através de microscópio de varredura de uma *wafer* com orientação $\langle 100 \rangle$ submetida a corrosão por KOH.

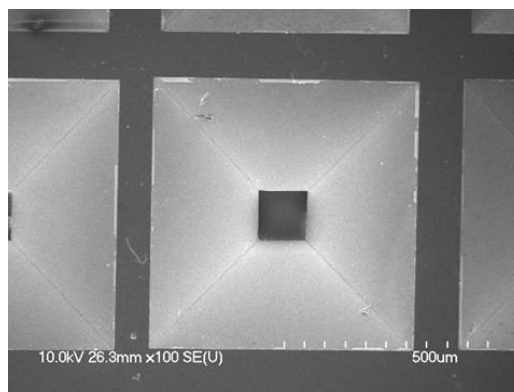


Fig. 2.16 – Furo passante gerado por corrosão com KOH em uma *wafer* <100>.

Corrosão a seco

A corrosão a seco pode ser dividida em três classes separadas: corrosão por íons reativos (*Reactive Ion Etching* ou *RIE*), corrosão sputter e corrosão por gases.

No *RIE*, o substrato é colocado dentro de um reator no qual diversos gases são introduzidos. Um plasma é formado através de uma fonte de energia RF, causando a quebra das moléculas dos gases. Os íons são acelerados em direção a superfície do substrato e reagem com ela formando outros materiais gasosos. Essa é a parte química do *RIE*, que pode ser considerada isotrópica. Existe também a parte física que é similar em natureza ao processo de deposição *sputtering*, isto é, se os íons tiverem energia suficiente, eles podem deslocar os átomos do material do substrato sem a ocorrência de uma reação química, processo altamente anisotrópico. Balanceando essas duas partes é possível influenciar o grau de anisotropia do processo. Um desenho esquemático de um sistema de corrosão por íons reativos é ilustrado na figura 2.17.

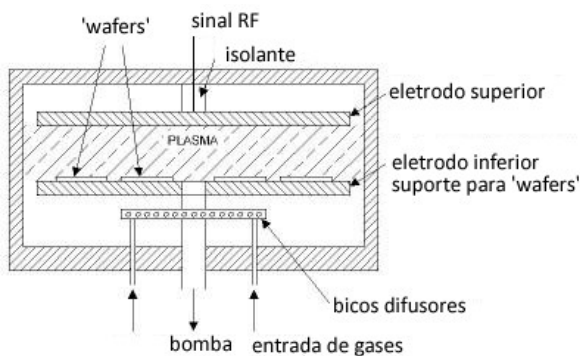


Fig. 2.17 – Configuração típica de um sistema *RIE*.

Uma subclasse muito especial do *RIE* é o *RIE* profundo (*DRIE*). Nesse processo, buracos com profundidades de centenas de microns, com altíssima razão de aspecto, podem ser fabricados. A tecnologia é conhecida como processo Bosch e se utiliza da alternância entre dois gases diferentes no reator. O primeiro gás cria um polímero na superfície do substrato e o segundo efetivamente corrói o substrato. O polímero é imediatamente consumido pela parte física do processo nas superfícies horizontais, mas não nas paredes laterais. O polímero se dissolve muito lentamente pela parte química permitindo assim que razões de aspecto muito altas sejam atingidas. Abaixo uma imagem (figura 2.18) obtida com microscópio de varredura da seção transversal de uma *wafer* submetida a um processo *DRIE*.

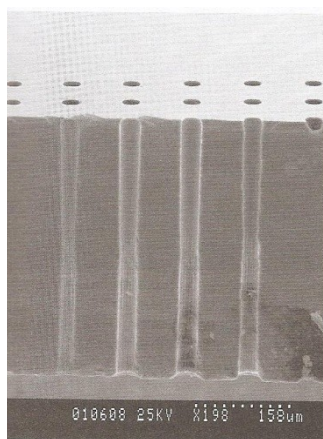


Fig. 2.18 – Seção transversal de uma *wafer* submetida a *DRIE*.

Corrosão *Sputter* é essencialmente *RIE* sem a utilização de íons reativos. O sistema é muito similar ao utilizado em deposição *sputtering*, a maior diferença é que agora o substrato é bombardeado pelos íons ao invés do material alvo.

Corrosão gasosa pode ser realizada com equipamentos mais simples do que *RIE*. Nesse processo, o substrato é colocado dentro de uma câmara na qual gases são introduzidos. O material da superfície é corroído através de uma reação química com as moléculas dos gases. Os dois processos mais comuns são corrosão de dióxido de silício (SiO_2) utilizando ácido fluorídrico (HF) e corrosão de silício utilizando XeF_2 , ambos isotrópicos.

Tab. 2.2 – Comparação entre corrosão úmida e à seco .

	Seca	Úmida
Direcionalidade	altamente direcional com a maioria dos materiais	direcional apenas com materiais cristalinos
Impacto ambiental	baixo	alto
Custo	alto	baixo
Controle da taxa de corrosão	razoável	difícil
Taxa de corrosão	Lenta: $\sim 0.1 \mu\text{m}/\text{min}$	rápida: $\sim 1 \mu\text{m}/\text{min}$
Aderência da máscara	não crítica	muito crítica
Seletividade	baixa	alta
Teoria envolvida	complexa, não muito bem compreendida	melhor compreendida

2.3.4 – Salas Limpas

Todos os processos até aqui descritos ocorrem de forma geral em um tipo especial de laboratório chamado de sala limpa. Uma sala limpa é um ambiente tipicamente utilizado em fabricação e pesquisa científica em diversas áreas do conhecimento humano. Ela possui um reduzido nível de poluentes, como poeira, micróbios tipicamente presentes no ar, entre outros. Mais precisamente, uma sala limpa possui controle sobre o nível de partículas contaminantes presentes, que é dado pelo número de partículas de um tamanho específico por metro cúbico. Além disso, geralmente esses laboratórios possuem pressão e umidade controladas e baixa vibração do piso. Como forma de comparação, o ambiente externo de uma cidade como São Paulo pode conter mais de 35 milhões de partículas por metro cúbico, com diâmetro maiores ou iguais a $0,5 \mu\text{m}$.

A figura 2.19 ilustra as classes de sala limpas de acordo com a norma *U.S Federal Standard 209b* e sua equivalente ISO 14644-1. O ambiente de uma cidade como São Paulo poderia ser classificado como classe 1.000.000 ou ISO 9.

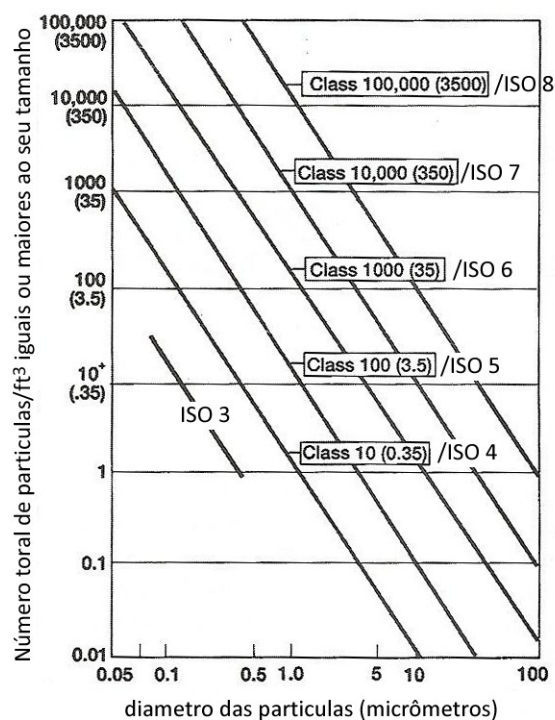


Fig. 2.19 – Classes de sala limpa.



- 1 – touca
- 2 – véu para a face
- 3 – capuz
- 4 – roupa cobre-tudo (*coverall*)
- 5 – luvas de nitrilo
- 6 – botas
- 7 – óculos de segurança

Fig. 2.20 –Roupas protetoras necessárias em uma sala limpa de classe 100.

Foram utilizados dois laboratórios do tipo sala limpa para a fabricação do microposicionador aqui descrito. O primeiro foi o *Micro-Nano Mechanical Systems (MNMS) Laboratory*, laboratório de classe 100 que possui uma área aproximada de 350m² e é dividido em duas salas limpas dedicadas exclusivamente a pesquisas e fabricação de sistemas *MEMS*. Possui diversos equipamentos de microfabricação, inspeção e teste, entre eles os mais utilizados na fabricação do microposicionador

foram: *Oxygen / Argon RF RIE*, *Flood exposure*, *High speed spinner*, *Chemical fume hoods*, *Confocal 3-gun RF* e *Pulsed-DC sputtering system* e *Micro-mechanical probe statio*'.

O segundo foi a sala limpa do *Micro and Nano Technology Laboratory (MNTL)*, composto de 16 laboratórios de 45m² cada, metade deles classe 100 e a outra metade classe 1000. As linhas de pesquisa principais desse laboratório são nanofotônica, nanoeletrônicos, *MEMS* e bio-nanotecnologia. Possui mais de 70 equipamentos, entre eles os utilizados na fabricação do microposicionador foram: *Karl Suss MJB3 Contact Mask Aligner*, *Quintel Q7000 IR Backside Mask Aligner*, *Hitachi S-4500 Field Emission Scanning Electron Microscope*, *STS Advanced Silicon Etcher* e *Chemical fume hoods*.

2.4 – Otimização Topológica

Em *MEMS*, a utilização de mecanismos articulados não é eficiente, dadas as dificuldades relativas à montagem de micro componentes e às folgas geradas nesse processo. Além disso, em se tratando de peças dessa ordem de grandeza, a hipótese de corpo rígido é muitas vezes inválida, já que tais componentes são suscetíveis à deformação elástica por tensões residuais oriundas do processo de fabricação [23].

Dessa forma, atuadores em *MEMS* são essencialmente mecanismos flexíveis. Dada a complexidade do comportamento desses mecanismos, métodos de tentativa e erro são muito utilizados em seus projetos. Entretanto, essas técnicas de projeto dependem da intuição física e da experiência do projetista e tornam-se ineficientes com o aumento do número de variáveis de projeto. Uma abordagem bastante utilizada para sistematizar o projeto é o Método de Otimização Topológica (MOT). Ele permite a mudança da topologia da estrutura (ou seja, encontra vazios no interior da peça) durante o processo de otimização. O MOT, originalmente utilizado para gerar estruturas com máxima rigidez e menor peso possível, já foi adaptado com sucesso ao projeto de mecanismos flexíveis [23-25].

Resumidamente, o método de otimização topológica resolve o problema de distribuir material em um domínio de projeto sujeito à cargas e restrições de deslocamento, de forma a obter a estrutura que maximize uma determinada função objetivo (por exemplo, rigidez estrutural ou flexibilidade). Desde a sua introdução em

1988 por Bendso e Kikuchi, o método tem ganho muita popularidade e atualmente é utilizado no projeto de automóveis, aviões, sistemas *MEMS*, entre outros.

Inicialmente são fornecidos o domínio de projeto, o carregamento aplicado e as condições de contorno (vínculos) da estrutura. Em seguida, o domínio é discretizado em elementos finitos. A partir disto, a estrutura inicial é analisada e, em seguida, modificada por um algoritmo de otimização de modo a se obter um aumento no valor da função objetivo. Com novos valores das variáveis de projetos, é feita uma nova iteração até que se obtenha a estrutura ótima. O resultado final deve ser interpretado e verificado em um software de elementos finitos comercial (Ansys) antes de ser fabricado. Esse processo é ilustrado na figura 2.21.

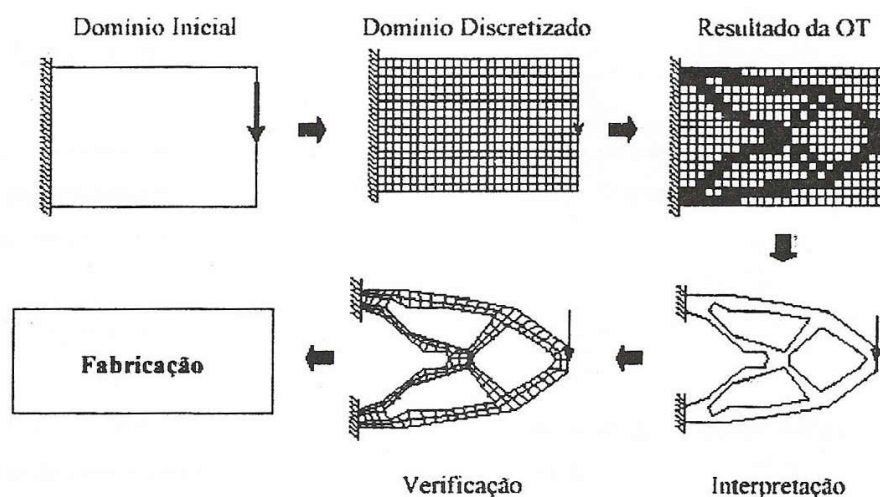


Fig. 2.21– Projeto utilizando MOT.

Para um problema que envolva mecanismos flexíveis, a solução ótima deve satisfazer requisitos cinemáticos e estruturais [26]. Os primeiros consistem em maximizar a deformação de um ponto específico (saída) ao longo de uma certa direção, na situação em que a força de entrada é aplicada [27]. Já os requisitos estruturais correspondem a maximizar a rigidez da estrutura na situação em que o ponto de aplicação da força de entrada é fixado e o mecanismo sofre a ação de reação do corpo manipulado por ele [25]. Dessa forma, a função objetivo deve ser uma relação entre estes dois objetivos.

Mais especificamente, no caso deste trabalho será utilizado um domínio como o ilustrado na figura 2.22, composto de células básicas de treliças. Durante o processo de discretização serão reservadas áreas específicas para o posicionamento

do elemento capacitivo do Ansys TRANS126. As molas no canto superior direito representam a rigidez ao deslocamento de saída da estrutura.

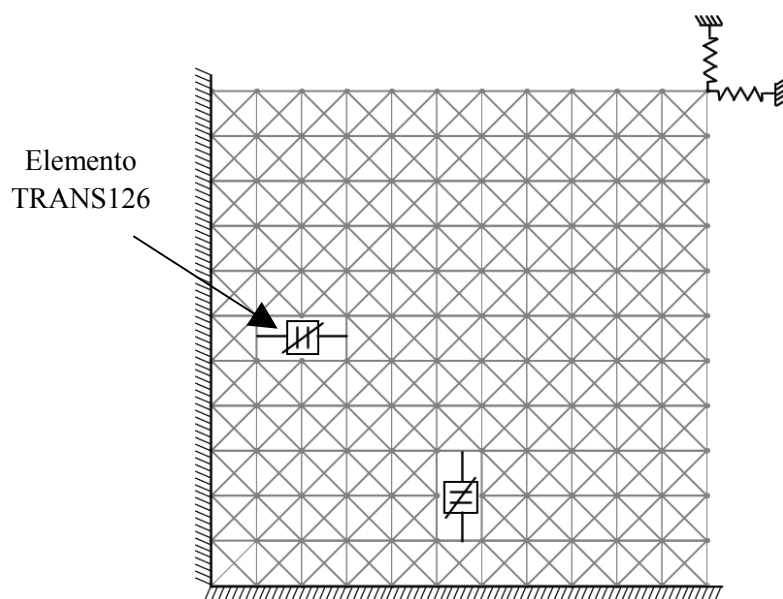


Fig. 2.22 – Domínio a ser estudado com o TRANS 126.

A figura 2.23 contém um exemplo meramente ilustrativo do resultado obtido em diferentes fases do processo de otimização.

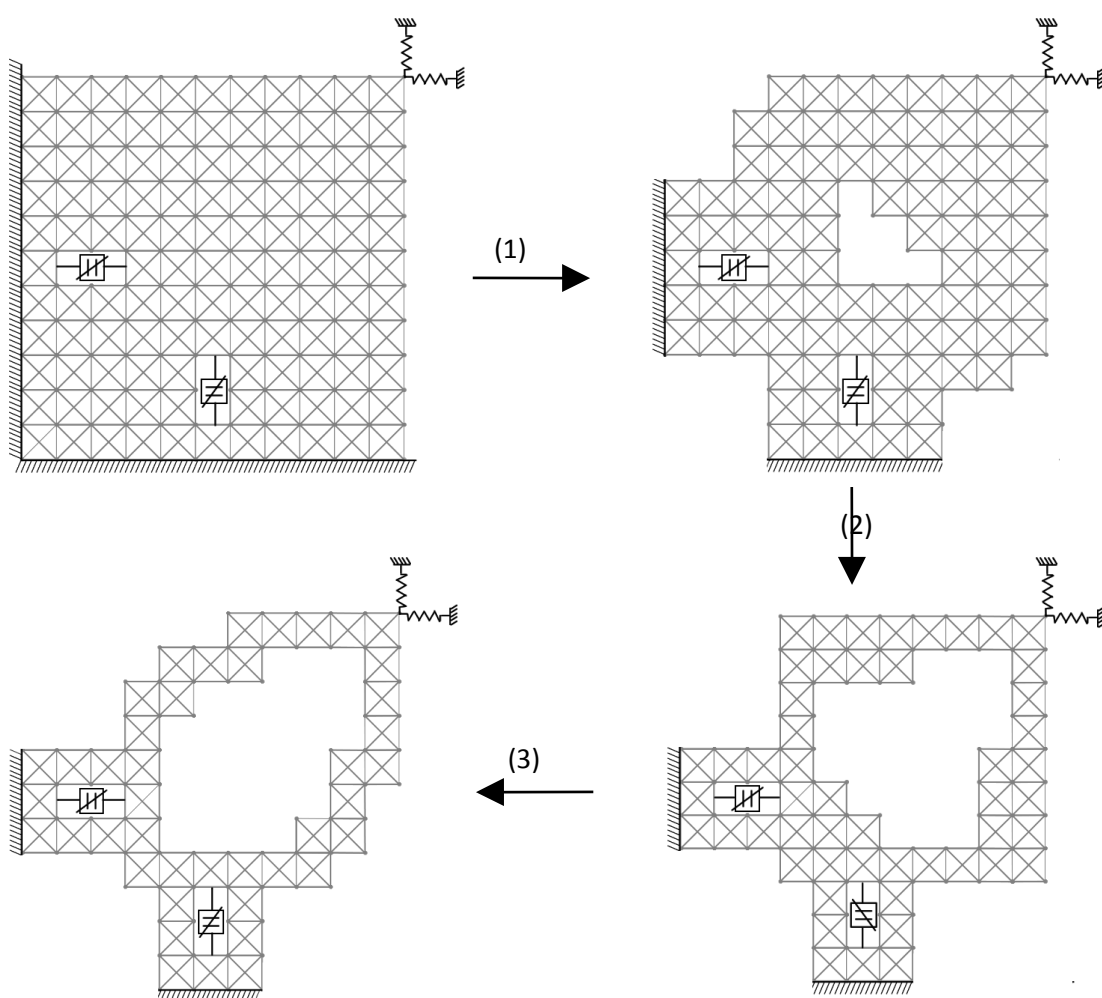


Fig. 2.23 – Processo iterativo de otimização.

2.4.1 – Projeto de mecanismos flexíveis utilizando Otimização Topológica

Será analisado o problema genérico em que, aplicado um carregamento de entrada \mathbf{f}_A no ponto A, é desejado o deslocamento Δ em B, como ilustra a figura 2.24a. A primeira parte do problema de otimização corresponde a maximizar o deslocamento Δ , que tem mesma direção e sentido da força fictícia \mathbf{f}_B , aplicada no ponto B (figura 2.24b). A única componente não nula deste carregamento é a que tem direção de Δ e magnitude unitária.

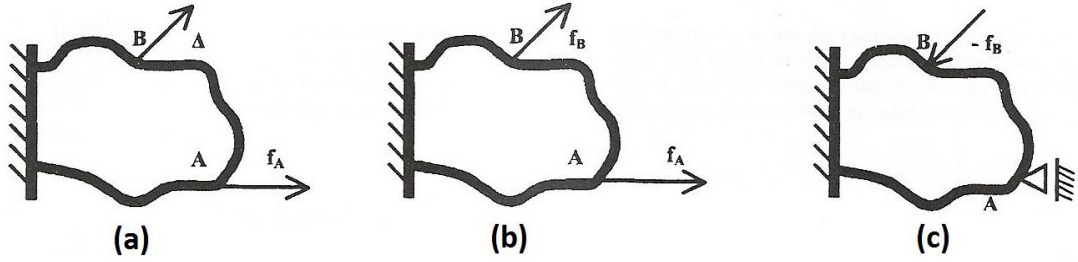


Fig. 2.24 – Problema genérico de otimização topológica.

Pelo teorema da reciprocidade de Betti [28]

$$\mathbf{f}_A^T \mathbf{v}_B = \mathbf{f}_B^T \mathbf{u}_A \quad L_2 \quad (2.25)$$

onde \mathbf{u}_A é o campo de deslocamentos causado pela aplicação do carregamento externo \mathbf{f}_A e \mathbf{v}_B é o campo de deslocamentos causado pela aplicação da força \mathbf{f}_B . O termo L_2 é chamado de energia pontencial mútua.

Pela aplicação da Lei de Hooke, decorre que:

$$\mathbf{K}_1 \mathbf{u}_A = \mathbf{f}_A \quad \mathbf{u}_A^T \mathbf{K}_1^T \quad \mathbf{f}_A^T \quad \mathbf{u}_A^T \mathbf{K}_1 \quad \mathbf{f}_A^T \quad (2.26)$$

onde \mathbf{K}_1 é a matriz de rigidez para o caso de carga (a) e (b) da figura 2.25.

Como a força \mathbf{f}_B tem módulo um e direção igual à de Δ , a energia mútua representa a magnitude do deslocamento Δ causado pela aplicação da força \mathbf{f}_A . Assim, a primeira parte do problema de otimização é a maximização da seguinte função objetivo:

$$L_2 = \mathbf{u}_A^T \mathbf{K}_1 \mathbf{v}_B \quad \mathbf{v}_B^T \mathbf{K}_1 \mathbf{u}_A \quad (2.27)$$

Entretanto, se for levado em conta apenas esse critério, será gerada uma estrutura fraca, ou seja, com rigidez muito baixa. Portanto, será analisado o requisito estrutural na condição em que o mecanismo já está atuado [25] (figura 6c).

Neste caso, o objetivo é maximizar a rigidez da estrutura quando a força $-\mathbf{f}_B$ é aplicada sobre ela e o ponto A está vinculado na direção de aplicação de \mathbf{f}_A . Para isso é necessário minimizar a sua flexibilidade, que é dada por:

$$-\mathbf{f}_B^T \mathbf{u}_B \quad L_3 \quad (2.28)$$

onde \mathbf{u}_B é o campo de deslocamentos decorrente da aplicação de $-\mathbf{f}_B$.

De forma análoga, com o uso da Lei de Hooke conclui-se que:

$$L_3 = \mathbf{u}_B^T \mathbf{K}_2 \mathbf{u}_B \quad (2.29)$$

onde \mathbf{K}_2 é a matriz de rigidez para o caso de carga (c) da figura 2.25. A expressão a ser minimizada é o dobro da energia de deformação da estrutura.

As eq. (2.27) e (2.29) podem ser combinadas em uma única função objetivo e assim obtém-se o critério para o projeto de mecanismos flexíveis através da Otimização Topológica. Para os algoritmo implementado foi utilizada a razão simples entre a energia mútua e o dobro da energia de deformação[25].

$$\max_{A_i} G = \frac{\mathbf{u}_A^T \mathbf{K}_1 \mathbf{v}_B}{\mathbf{u}_B^T \mathbf{K}_2 \mathbf{u}_B}$$

sujeito a:

$$\mathbf{K}_1 \mathbf{u}_A = \mathbf{f}_A; \quad (2.30)$$

$$\mathbf{K}_1 \mathbf{v}_B = \mathbf{f}_B;$$

$$\mathbf{K}_2 \mathbf{u}_B = \mathbf{f}_B;$$

$$\sum_{i=1}^M A_i L_i \leq V_{\max}$$

$$A_{\min} \leq A_i \leq A_{\max}, \quad 1 \leq i \leq M$$

Na eq. (2.30) temos que M é o numero total de treliças, V_{\max} é a restrição máxima de volume, A_i são as áreas das seções transversais dos elementos e A_{\min} e A_{\max} são os limites extremos das áreas. Note que o valor de A_{\min} não pode ser igual a zero para que não ocorram singularidades na matriz de rigidez.

Para determinar a estrutura que melhor atende aos requisitos presentes na eq. (2.30), o MOT utiliza a Programação Linear Sequencial (PLS), que será descrita mais adiante. O algoritmo de PLS necessita dos gradientes da função objetivo em relação às variáveis de projeto. Com isso, é possível determinar como varia a função objetivo com alterações nos valores das variáveis de projeto. O cálculo dos gradientes da função objetivo é feito da seguinte maneira:

$$\frac{\partial G}{\partial A_i} = \frac{\partial \left(\frac{L_2}{L_3} \right)}{\partial A_i} \frac{\partial \left(\frac{L_2}{L_3} \right) L_3 - \frac{(L_3)}{A_i} L_2}{(L_3)^2} \quad (2.31)$$

Por sua vez,

$$\frac{\partial (L_2)}{\partial A_i} = \frac{\partial (\mathbf{v}_B^T \mathbf{K}_1 \mathbf{u}_A)}{A_i} = \frac{\partial \mathbf{v}_B^T}{\partial A_i} \mathbf{K}_1 \mathbf{u}_A + \mathbf{v}_B^T \frac{\partial \mathbf{K}_1}{\partial A_i} \mathbf{u}_A + \mathbf{v}_B^T \mathbf{K}_1 \frac{\partial \mathbf{u}_A}{\partial A_i} \quad (2.32)$$

Derivando a Lei de Hooke $\mathbf{K}_1 \mathbf{v}_B = \mathbf{f}_B$ em relação às variáveis de projeto:

$$\frac{\partial \mathbf{K}_1}{\partial A_i} \mathbf{v}_B + \mathbf{K}_1 \frac{\partial \mathbf{v}_B}{\partial A_i} = \frac{\partial \mathbf{f}_B}{\partial A_i} \quad (2.33)$$

Como \mathbf{f}_B é constante em relação a A_i , $\partial \mathbf{f}_B / \partial A_i = 0$. Portanto:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{K}_1}{\partial A_i} \mathbf{v}_B + \mathbf{K}_1 \frac{\partial \mathbf{v}_B}{\partial A_i} &= 0 \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{v}_B}{\partial A_i} = -\mathbf{K}_1^{-1} \frac{\partial \mathbf{K}_1}{\partial A_i} \mathbf{v}_B \\ \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{v}_B^T}{\partial A_i} &= -\mathbf{v}_B^T \frac{\partial \mathbf{K}_1}{\partial A_i} \mathbf{K}_1^{-1} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Deve-se observar que, como a matriz \mathbf{K}_1 é simétrica, $\mathbf{K}_1^T = \mathbf{K}_1$ e $(\mathbf{K}_1^{-1})^T = \mathbf{K}_1^{-1}$.

Analogamente, derivando a eq. $\mathbf{K}_1 \mathbf{u}_A = \mathbf{f}_A$, é obtido:

$$\frac{\partial \mathbf{v}_B^T}{\partial A_i} = -\mathbf{K}_1^{-1} \frac{\partial \mathbf{K}_1}{\partial A_i} \mathbf{u}_A \quad (2.35)$$

Substituindo as eq. (2.34) e (2.35) em (2.32) e simplificando vem:

$$\frac{\partial (L_2)}{\partial A_i} = -\mathbf{v}_B^T \frac{\partial \mathbf{K}_1}{\partial A_i} \mathbf{u}_A \quad (2.36)$$

Para a derivada presente na segunda parcela do numerador da eq. (2.31) pode-se realizar o mesmo procedimento e assim se obter:

$$\frac{\partial (L_3)}{\partial A_i} = \mathbf{u}_B^T \frac{\partial \mathbf{K}_2}{\partial A_i} \mathbf{u}_B \quad (2.37)$$

Substituindo as eq. (2.36) e (2.37) em (2.31) vem:

$$\frac{\partial G}{\partial A_i} = \frac{\left(-\mathbf{v}_B^T \frac{\partial \mathbf{K}_1}{\partial A_i} \mathbf{u}_A L_3 + \mathbf{u}_B^T \frac{\partial \mathbf{K}_2}{\partial A_i} \mathbf{u}_B L_2 \right)}{(L_3)^2} \quad (2.38)$$

As matrizes de derivadas de \mathbf{K}_1 e \mathbf{K}_2 em relação às áreas são obtidas a partir das matrizes de derivadas locais de cada elemento $d\mathbf{k}_i$. Como a matriz de rigidez local \mathbf{k}_i depende linearmente de A_i , sua derivada em relação a esta variável de projeto

é obtida através da simples divisão por esta variável. Dessa forma a derivada da matriz de rigidez do elemento i é dada por:

$$d\mathbf{k}_i = \frac{E}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & cs \\ cs & s^2 & -cs & s^2 \\ -c^2 & cs & c^2 & -cs \\ -cs & s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} \frac{\mathbf{k}_i}{A_i}$$

onde $c=\cos\theta$, $s=\sin\theta$ e θ é o ângulo de inclinação da barra da treliça (figura 2.25).

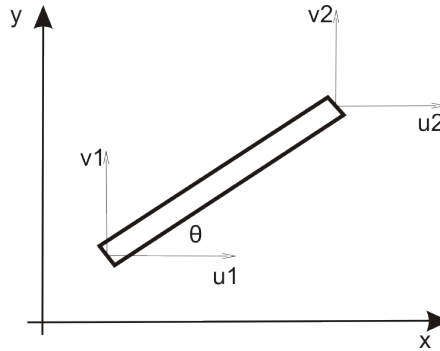


Fig. 2.25 – Representação cartesiana 2D de uma barra de treliça.

2.4.2 – Programação Linear Sequencial

O problema de otimização proposto na eq. (2.30) é não-linear em relação às variáveis de projeto. Para resolvê-lo, é utilizado um método chamado Programação Linear Sequencial (PLS). A PLS permite que se trabalhe com um grande número de variáveis de projeto e funções objetivo e restrições de projetos complexas, sendo necessário somente determinar as primeiras derivadas dessas funções. Além disso, a PLS é de fácil implementação.

A PLS resolve um problema de otimização não-linear dividindo-o em uma sequência de problemas lineares, que podem ser resolvidos pela Programação Linear (PL). Esse método soluciona problemas com a seguinte forma [29]:

Minimizar a função $a_1x_1 + a_2x_2 \dots + a_Nx_N$
 x_1, x_2, \dots, x_N

Sujeita às condições: $b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \leq C$
 $c_2x_2 + c_4x_4 \leq D$
 $d_1x_1 + d_5x_5 + d_6x_6 \leq E$
etc.

Observa-se pela expressão acima que a dependência da função objetivo em relação às variáveis deve ser de primeiro grau. Assim, o problema deve ser sequencialmente linearizado, através da expansão em Série de Taylor, a qual aproxima uma função $f(x)$, para x próximo de um valor x_0 , a menos de um erro $e(x)$, como ilustra a eq. (2.39):

$$f(x) = f(x_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} (x - x_0)^2 + \dots + \frac{1}{N!} \frac{\partial^N f}{\partial x^N} (x - x_0)^N + e(x) \quad (2.39)$$

Para uma função com j variáveis tem-se:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_j) = f(x_0) + \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \dots + \frac{1}{N!} \frac{\partial^N f}{\partial x_1^N} (x_1 - x_{01})^N + \frac{\partial f}{\partial x_2}(x_2 - x_{02}) + \dots + \frac{1}{N!} \frac{\partial^N f}{\partial x_2^N} (x_2 - x_{02})^N + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_j}(x_j - x_{0j}) + \dots + \frac{1}{N!} \frac{\partial^N f}{\partial x_j^N} (x_j - x_{0j})^N + e(x_1, x_2, \dots, x_j) \quad (2.40)$$

No caso da PLS, os termos que contém derivadas de ordem segunda ou superior são desprezados, pois se deseja apenas a representação linear da função objetivo.

Pode-se representar a função objetivo pela seguinte função de primeiro grau:

$$G = G_0 + \frac{\partial G}{\partial A_1}(A_1 - A_1^0) + \frac{\partial G}{\partial A_2}(A_2 - A_2^0) + \dots + \frac{\partial G}{\partial A_N}(A_N - A_N^0) \quad (2.41)$$

Separando os termos constantes dos termos dependentes das variáveis:

$$G = \underbrace{G_0 + \frac{\partial G}{\partial A_1} A_1^0 + \frac{\partial G}{\partial A_2} A_2^0 + \dots + \frac{\partial G}{\partial A_N} A_N^0}_{\text{constantes}} + \underbrace{\frac{\partial G}{\partial A_1} (A_1 - A_1^0) + \frac{\partial G}{\partial A_2} (A_2 - A_2^0) + \dots + \frac{\partial G}{\partial A_N} (A_N - A_N^0)}_{\text{variáveis}} \quad (2.42)$$

As constantes podem ser retiradas da equação pois não influenciam no processo de otimização da função. A função a ser otimizada, portanto, assume uma

forma linear cujas variáveis são as áreas transversais das barras das treliças. O coeficiente da variável A_i é a derivada da função objetivo em relação à área A_i , cujo cálculo é dado pela eq. (2.38). Dessa maneira, o problema a ser inserido na rotina de Programação Linear (Simplex) adquire a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar a função} \quad & \frac{\partial G}{\partial A_1} A_1 + \frac{G}{A_2} \frac{\partial}{\partial} \dots + \frac{G}{A_N} A_N + \\ & A_1, A_2, \dots, A_N \quad A = A_0 \quad A = A_0 \\ \text{Sujeita às condições:} \quad & L_1 A_1 + L_2 A_2 \dots + L_N A_N + V_{\max} \\ & A_1 \leq A_{\max,1}; A_2 \leq A_{\max,2} \dots; A_N \leq A_{\max,N} \\ & A_1 \geq A_{\min,1}; A_2 \geq A_{\min,2} \dots; A_N \geq A_{\min,N} \end{aligned}$$

A primeira das três condições é a restrição de volume máximo. A segunda e a terceira dizem respeito aos limites laterais mínimos e máximo das áreas transversais. Note que essa expressão da função objetivo é válida apenas nas proximidades de $A=A_0$. Para contornar este problema, a rotina de PLS faz análises sucessivas de pedaços da função objetivo. O intervalo a ser analisado é limitado pelos valores dos limites móveis (mínimos e máximos locais, $A_{\min,i}$ e $A_{\max,i}$, respectivamente), que mudam a cada iteração. Estes valores são determinados pelo passo de otimização. O superior é o valor atual da variável multiplicada por um mais o passo. O inferior é o valor da variável multiplicada por um menos o passo.

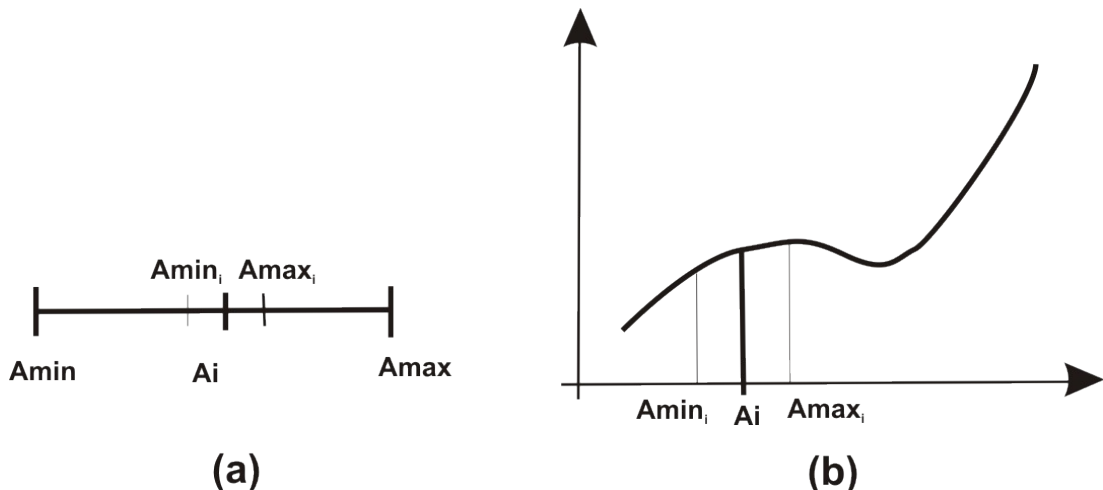


Fig. 2.26 – Limites locais e globais da variável (a) e representação dos limites móveis (b).

A cada iteração a rotina de PLS obtém os valores que maximizam a função objetivo nos intervalos entre $A_{\min,i}$ e $A_{\max,i}$. A cada iteração as matrizes K_1 , dK_1 , K_2 ,

$d\mathbf{K}_2$, etc e os cálculos de função objetivo devem ser refeitos, pois o vetor de áreas transversais é modificado. A convergência do processo iterativo ocorre quando o valor da função objetivo apresenta variações menores do que uma tolerância pré-estabelecida.

3 – ANÁLISE DO PROJETO DO MEMS

Pentes de capacitores são atuadores muito adequados para micro-posicionadores de um único grau de liberdade. Contudo, projetar e fabricar um micro posicionador com mais de um grau de liberdade (GDL) e com movimentação disassociada entre eles não é uma tarefa trivial.

A seguir serão discutidos os mecanismos e estruturas utilizados no projeto do um micro-posicionador XY.

3.1 – Mecanismo de Cinemática Paralela

Mecanismos de cinemática paralela (*parallel kinematic mechanism* ou *PKM*), já muito utilizados em sistemas de posicionamento em macro e meso escala, podem ser projetados de forma a serem compatíveis com a tecnologia *MEMS*. O *PKM* consiste de uma base fixa e uma plataforma móvel ou efetuador (*end-effector*) conectadas em paralelo por múltiplas cadeias cinemáticas independentes.

Normalmente, o GDL na plataforma móvel é determinado pelo número de cadeias cinemáticas independentes. Cada cadeia cinemática atua a plataforma em uma única direção e consegue absorver ou acomodar deslocamentos ao longo dos demais GDLs da plataforma. Juntas, as cadeias conseguem restringir as movimentações indesejadas (por exemplo, rotações no caso de plataformas translacionais). Dessa forma, é implementado um mecanismo em que os GDLs desejados são gerados pelos atuadores e os GDLs indesejados são restritos pela interação entre as cadeias cinemáticas.

A utilização do mecanismo *PKM* geralmente produz alta rigidez estrutural devido a estrutura treliçada utilizada, resultando em rápido tempo de resposta. Além disso, se apropriadamente projetados, o *PKM* pode resultar em configurações nas quais a quase total desassociação entre os diferentes GDLs é alcançada [30]. Por outro lado, os projetos baseados em *PKM* costumam ser criticados por resultarem em pequenas áreas de trabalho, dado que a amplitude de movimento de um *PKM* é restringida à intersecção das amplitudes de movimento de todas as suas cadeias cinemáticas. Essa é uma crítica válida para sistemas em macro escala, nos quais as

articulações e os atuadores possuem grande amplitude de movimento com ampla sobreposição. No entanto, para micro-posicionadores construídos por processos *MEMS*, a amplitude de movimento será mais provavelmente limitada pela amplitude de movimento do atuador ou pelos mancais flexíveis utilizados do que pelo mecanismo em si.

A figura 3.1 ilustra o projeto do micro-posicionador proposto utilizando o mecanismo *PKM*. Nesse projeto existem duas cadeias cinemáticas independentes que conectam a plataforma móvel à base. Cada uma dessas cadeias inclui dois GDLs conectados em série: translação pura devido a junta prismática e outra translação ao longo de um percurso circular devido ao sistema de conexão em 4 barras no formato de paralelograma. A orientação das duas cadeias é tal que as juntas prismáticas são perpendiculares umas as outras, desassociando cinematicamente a atuação das duas juntas ao máximo possível. Devido a configuração simétrica das cadeias cinemáticas, a plataforma possui a mesma rigidez e amplitude de movimento ao longo de qualquer direção no plano *XY*. O sistema de conexão em 4 barras no formato de paralelograma restringe todos os GDL rotacionais da plataforma móvel.

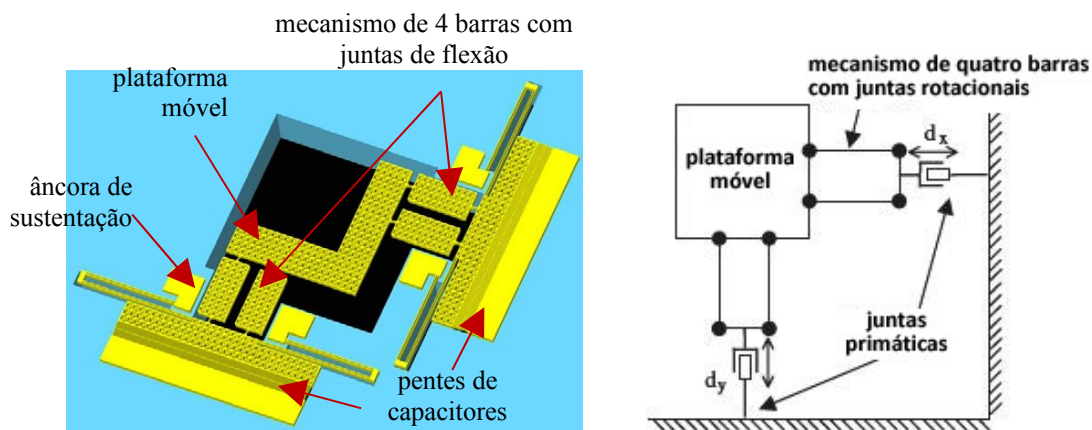


Fig. 3.1 – Diagrama esquemático do micro-posicionador com o mecanismo *PKM*.

Na figura 3.1, pode ser visto que os dois lados perpendiculares da plataforma móvel estão conectados ao mecanismo de quatro barras nas duas cadeias cinemáticas. Assim, a orientação da plataforma permanece fixa. Idealmente, quando o micro-posicionador é atuado na direção *X* pela junta prismática de uma cadeia, o movimento resultante da plataforma é acomodado pela outra cadeia através de um deslocamento angular do mecanismo de quatro barra. O contrário ocorre no caso da atuação na direção *Y*. A figura 3.2 ilustra a associação entre os dois GDL do sistema

de forma exagerada. Para minimizar a perda de movimento transmitido do atuador para a plataforma móvel, a configuração nominal do sistema é escolhida de forma que o vetor de deslocamento instantâneo do conector do mecanismo de quatro barras em uma cadeia cinemática seja ortogonal ao deslocamento do atuador dessa cadeia e paralelo ao atuador da outra cadeia [30].

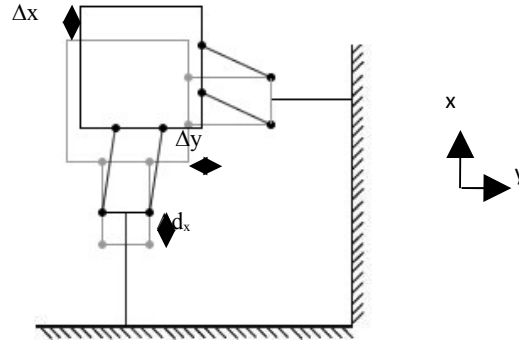


Fig. 3.2 – Associação de movimentos entre os dois GDLs do micro-posicionador.

O relacionamento entre o deslocamento de atuação Δd_x , que é o deslocamento linear das juntas prismáticas, e o deslocamento resultante da plataforma móvel Δx foi estudado em [31] e [32]. A partir da eq. (3.1) e de um estudo de cinemática direta do sistema, a matriz Jacobiana diagonal da eq. (3.2) pode ser provada seguindo o procedimento desenvolvido em [32]:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \Delta d_x} & \frac{X}{d_y} \frac{\partial}{\partial \Delta} \\ \frac{Y}{\partial \Delta d_x} & \frac{Y}{d_y} \frac{\partial}{\partial \Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d_x \\ \Delta d_y \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d_x \\ \Delta d_y \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A matriz diagonal da eq. (3.2) sugere que, ao redor do ponto nominal, quando o efetuator é submetido a um pequeno deslocamento comparado com as dimensões globais do sistema (que é o caso dos sistemas *MEMS*), o movimento nas direções X e Y é desassociado. Isto é, o efeito da atuação cruzada (na aproximação de primeira ordem) é minimizado.

3.2 – Mancais Flexíveis

Para implementar o mecanismo de cinemática paralela utilizando tecnologia de microfabricação em silício, as duas juntas prismáticas são substituídas por dois pentes de capacitores lineares e as juntas rotacionais ao redor do mecanismo de quatro barras são implementadas através de mancais flexíveis (*flexure hinges*) do tipo monolítico. A figura 3.3 ilustra esquematicamente esses mancais.

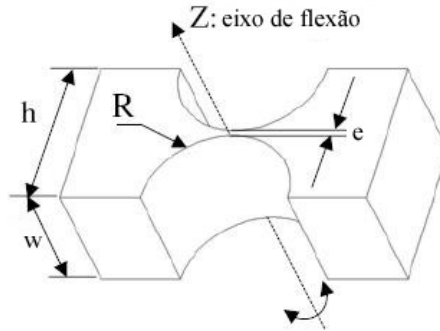


Fig. 3.3 – Mancal Flexível.

A sua flexibilidade angular C_z pode ser calculada através da fórmula de Paros e Weisbrod [3]:

$$C_z = \frac{\alpha_z}{M_z} = \frac{3}{2EbR^2} \left[\frac{1}{2\beta + \gamma^2\beta} \left\{ \left[\frac{1+\beta}{\gamma^2} \right]^2 \frac{3}{\gamma} \frac{2+\beta}{\beta^2} \right. \right. \\ \times \left[\sqrt{1 - (1 - \beta + \gamma^2)\gamma} \left[\frac{6(1+\beta)}{(2\beta + \gamma^2\beta)^{3/2}} \right] \right. \\ \left. \left. \times \left[\tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{2+\beta}{\beta}} \frac{(\gamma - \beta)\beta}{\sqrt{1 - (1 - \beta + \gamma^2)\gamma}} \right) \right] \right\} \right] \quad (3.3)$$

onde h é a largura do mancal, w é a sua espessura, $\beta = e / 2R$, $\gamma = h / 2R$, E é o módulo de Young do material, α_z é a deformação angular da junta em relação ao eixo z em radianos e M_z é o torque externo aplicado a junta.

O torque máximo que pode ser aplicado é:

$$M_{\max} = \frac{2\sigma_p I_{\min}}{t} \quad (3.4)$$

onde $I_{\min} = we^3 / 12$ é o momento de inércia da junta de flexão ao redor do eixo de rotação e σ_p , ou tensão de ruptura, é a resistência à fratura de um material frágil.

Então, o limite máximo de rotação para um mancal flexível é dado por:

$$\alpha_{\max} = M_{\max} C_z \quad (3.5)$$

Para o mancal do dispositivo aqui proposto os seguintes parâmetros foram utilizados: $e = 13\mu\text{m}$, $R = 300\mu\text{m}$, $h = 70\mu\text{m}$ e $w = 50\mu\text{m}$. O módulo de Young para o silício monocristalino é de aproximadamente 170 Gpa e o limite de elasticidade é aproximadamente 7000 Mpa. Então, a rigidez e a máxima amplitude de rotação do mancal são $3,1 \times 10^{-6} \text{ N m rad}^{-1}$ e 0,68 rad, respectivamente. O comprimento da estrutura de quatro barras é de 1 mm, o que significa um deslocamento máximo de 630 μm da estrutura mecânica. Fatores como as estruturas suspensas e as forças de atuação limitadas impedem que esse limite seja atingido.

3.3 – Estrutura Suspensa

A estrutura suspensa é uma parte muito importante do atuador eletroestático do tipo pente de capacitores. Geralmente ela é necessária para que se tenha uma grande flexibilidade na direção de atuação para assim ser possível grandes deslocamentos, e alta rigidez na direção lateral para assim prevenir instabilidades. No projeto do dispositivo aqui proposto será utilizada uma mola dobrada (*folded spring*) como a ilustrada na figura 3.4.

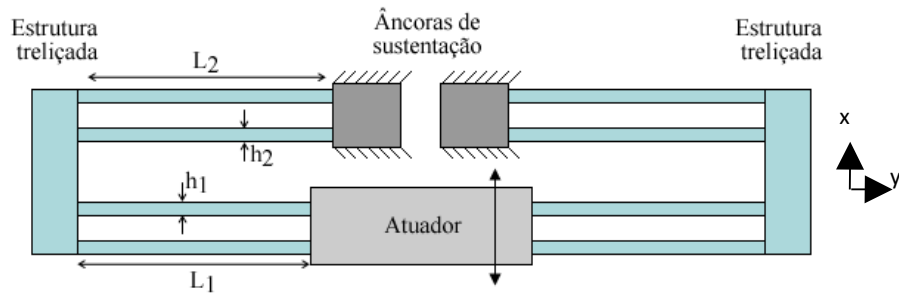


Fig. 3.4 – Estrutura suspensa com a mola dobrada.

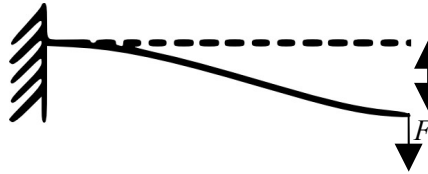
A figura 3.5 representa o modelo que será utilizado para o cálculo da rigidez de cada viga. Sabendo o valor do deslocamento na ponta da viga é possível obter a sua rigidez através de:

$$k = \frac{F}{d} \quad (3.6)$$

Sabe-se ainda que o momento de inércia de uma viga de seção quadrada é dado por:

$$I_z = \frac{wh^3}{12} \quad I_x = \frac{w^3h}{12} \quad (3.7)$$

onde E é o módulo de Young do material, h é a largura da viga, w é a espessura e L é o comprimento.



$$d = \frac{FL^3}{12EI} \quad (3.8)$$

Fig. 3.5 – Viga fixa-guiada

Assim, a rigidez de uma das vigas indicadas na figura 3.4 na direção do movimento k_{di} é dada por:

$$k_{di} = \frac{F}{d} = \frac{12EI}{L^3} = \frac{Ewh^3}{L^3} \quad (3.9)$$

De cada lado do atuador existem dois pares de vigas que atuam como molas em série, cada par é composto de duas vigas que atuam como molas em paralelo. O primeiro par de vigas vai da âncora até a estrutura treliçada (superior) e o segundo vai da estrutura treliçada até o atuador (inferior). A rigidez de cada par de vigas é dada por:

$$k_{d1} = 2 \frac{Ewh_1^3}{L_1^3} \quad k_{d2} = 2 \frac{Ewh_2^3}{L_2^3} \quad (3.10)$$

Considerando que k_{d1} está em série com k_{d2} e que ambas possuem a mesma largura h, a rigidez total da mola dobrada é:

$$k_a = \left(\frac{k_{d1}k_{d2}}{k_{d1} + k_{d2}} \right) = \frac{2Ewh^3}{\left(\frac{L_1^3}{L_2^3} \right)} \quad (3.11)$$

Como as molas dos dois lados do atuador são idênticas e estão em paralelo, temos que a rigidez total na direção do movimento é dada por:

$$k_d = k_a + k_b + 2k_c = \frac{4Ewh^3}{(L_1^3 + L_2^3)}$$

Na direção lateral ao movimento, a rigidez da mola pode ser dada por [33]:

$$k_l = \frac{4Ewh}{(L_1 + L_2)} \quad (3.13)$$

Nesse projeto, considerando o tamanho da estrutura e a sua flexibilidade na direção de atuação, foram utilizados os valores de $L_1 = L_2 = 1,375 \text{ mm}$, $h = 16 \text{ }\mu\text{m}$ e $w = 50 \text{ }\mu\text{m}$. Assim, a rigidez na direção do deslocamento é $k_d = 26 \text{ N/m}$, resultando na razão de rigidez $k_l / k_d = 7600$.

3.4 – Pente de Capacitores

Os pentes de capacitores devem proporcionar força suficiente para superar a rigidez da mola dobrada e dos mancais flexíveis. De acordo com a eq. (2.15), a força gerada por um atuador linear do tipo pente de capacitores é dada por:

$$F = \frac{N\varepsilon_o w}{g} V^2 \quad (3.14)$$

onde N é o número de dentes, w é a espessura dos dentes, g é o *gap* entre dois dentes vizinhos, V é a voltagem aplicada.

Nesse projeto, foram utilizados 190 pares de dentes espaçados de $5 \text{ }\mu\text{m}$ de *gap*, com largura de $7 \text{ }\mu\text{m}$ e espessura de $50 \text{ }\mu\text{m}$. Com esses parâmetros será possível gerar uma força de $4,2 \times 10^{-5} \text{ N}$ a 50V .

3.5 – Estrutura Treliçada

Para viabilizar a fabricação do dispositivo é necessário adotar uma estrutura treliçada, de forma que o ácido a ser utilizado como agente corrosivo (HF) possa

alcançar com mais facilidade a camada de SiO_2 . Com o ataque químico, a estrutura em silício da *device layer* fica livre para se mover, criando assim a plataforma móvel desejada. Um grande benefício dessa solução é a redução da massa móvel, o que faz com que o sistema se torne mais rígido.

A figura 3.6 é uma imagem obtida através de um microscópio eletrônico de varredura do microposicionador proposto já fabricado, ela ilustra todas as estruturas detalhadas acima.

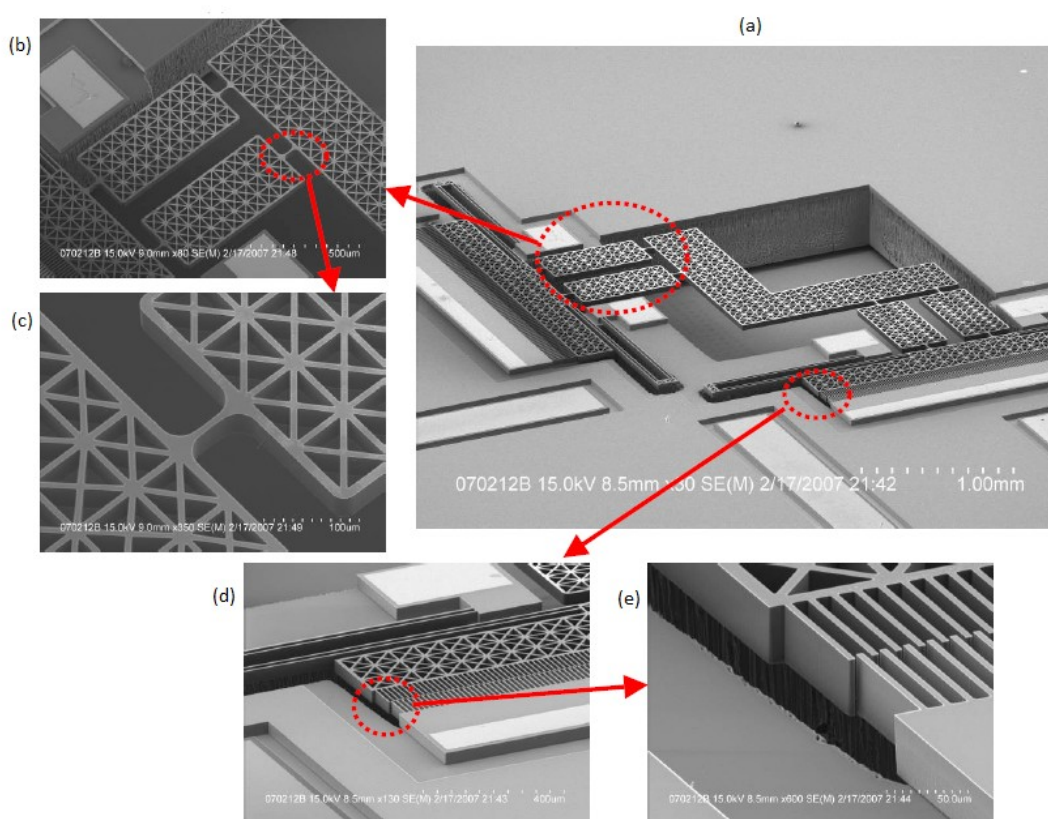


Fig. 3.6 – Microposicionador com mecanismo *PKM* fabricado: (a) estrutura geral; (b) mecanismo de 4 barras; (c) mancais flexíveis e estrutura treliçada; (d),(e) pente de capacitores e seus dentes.

4 – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO “MEMS”

Como já dito, a fabricação do dispositivo aqui estudado foi realizada no segundo semestre de 2008 com recursos do *Nano-CEMMS* (*Center for Nanoscale Chemical-Electrical-Mechanical Manufacturing Systems*) da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign nos Estados Unidos.

4.1 – Sequência de fabricação

O processo de fabricação do microposicionador em estudo está detalhado na figura 4.3, ele inclui três passos de transfêrencia de padrão e dois passos de corrosão profunda por íons reativos (*DRIE etching*).

O substrato inicial é uma wafer do tipo *SOI* (*Silicon-on-Insulator*) de 100mm de diâmetro com uma camada de dispositivo (*device layer*) de 50 μm de espessura em cima de uma camada de óxido enterrado (*buried oxide - BOX layer*) de 2 μm de espessura. A camada inferior (*handle layer*) tem espessura de 500 μm . A *wafer* é cortada em matrizes (*dies*) quadradas cada uma medindo 15mm de lado, que serão processadas individualmente.

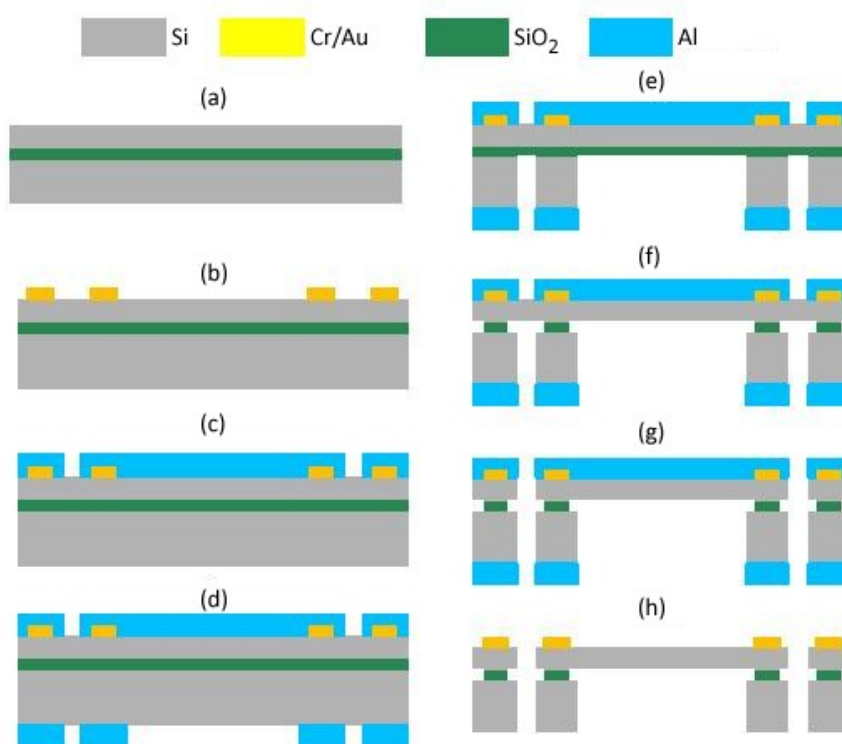


Fig. 4.1 – Sequência de Fabricação.

O primeiro passo é fabricar o padrão na *device layer* (fig 4.1.b) que fornecerá a conexão elétrica para o restante do dispositivo na forma de contatos. Os padrões dos contatos elétricos são gerados por litografia seguidos de *sputtering* e *lift-off* (figura 4.2), eles são compostos de uma fina camada de ouro de 392nm sobre uma camada de 8,5nm de cromo. A máscara utilizada para esse primeiro passo de litografia está ilustrada na figura 4.3.

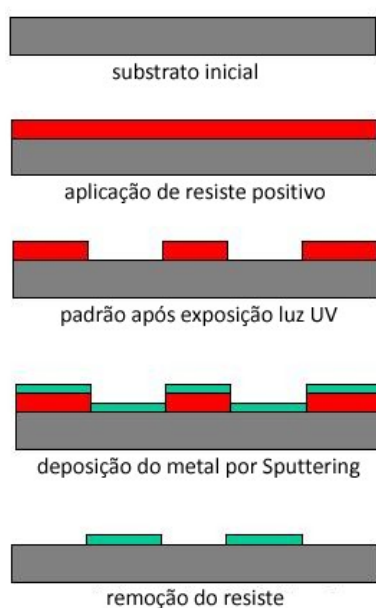


Fig. 4.2 – Sequência do processo *lift-off*.

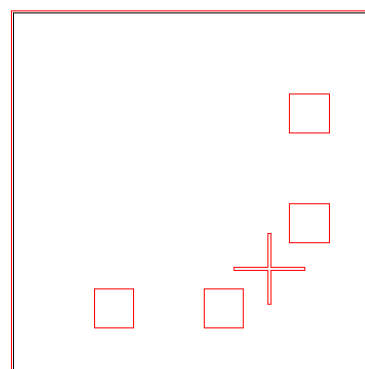


Fig. 4.3 – Primeiro passo de litografia.

O próximo passo é transferir o padrão do dispositivo propriamente dito para a *device layer* (fig. 4.1.c) alinhado com a camada que já contém os contatos elétricos (note a presença de uma grande cruz no centro da máscara da figura 4.5 com a função de marca de alinhamento). Esse padrão servirá como máscara para a corrosão *DRIE* da *device layer*. O padrão é transferido do resiste (AZ1518) para uma camada de alumínio de 60nm de espessura novamente através de *sputtering* seguido de *lift-off*. O alumínio foi escolhido por ser uma excelente máscara para o processo de corrosão *DRIE*, ele ajuda a atingir um perfil de parede lateral bastante vertical e torna mais difícil a corrosão excessiva durante o processo *DRIE*. A máscara utilizada está ilustrada na figura 4.4.

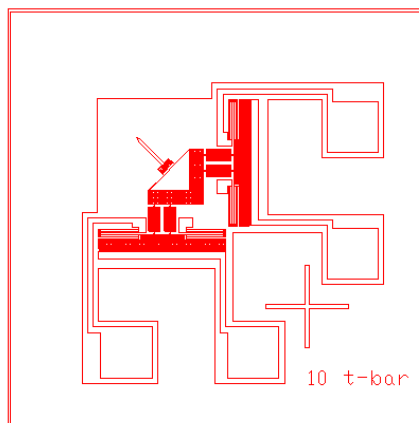


Fig. 4.4 – Segundo passo de litografia.

A *device layer* é então protegida através da deposição e aquecimento de uma fina camada de resiste ($5\ \mu\text{m}$), fundamental para conservar os padrões transferidos até aqui durante as próximas etapas de fabricação. A matriz é então virada e o padrão a ser transferido para a *handle layer* é alinhado com o padrão já existente da *device layer* através do uso de alinhadores com infra-vermelho (*Quintel Q7000 IR Backside Mask Aligner*). Essa camada também é composta de um filme de alumínio de 60nm de espessura (fig. 4.1.d). A máscara utilizada encontra-se ilustrada na figura 4.5.

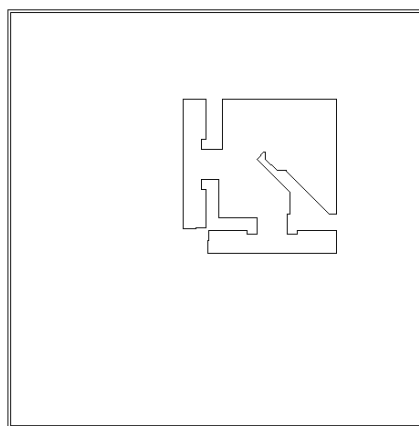


Fig. 4.5 – Terceiro passo de litografia.

A seguir, o processo *DRIE Bosch* é utilizado para remover o material da *handle layer* de forma a expor o dispositivo para a aplicação desejada (fig. 4.1.e). A camada *BOX* é então removida (fig. 4.1.f) através de ácido fluorídrico (HF). A sequência desse processo de soltura é crucial, de outra forma as tensões residuais do filme de SiO_2 poderiam destruir o dispositivo quando o mesmo está sendo processado pelo processo *DRIE*.

Após remover a camada *BOX*, inverte-se a matriz expondo-se assim a *device layer* ao processo *DRIE Bosch*, que corroerá o material de forma a se obter as formas do microposicionador desejado (fig. 4.1.g). Finalmente, os filmes de alumínio que serviram como máscara para os processos Bosch são removidos através do uso de químicos corrosivos (fig. 4.1.h). O dispositivo fabricado é mostrado na figura 4.6.

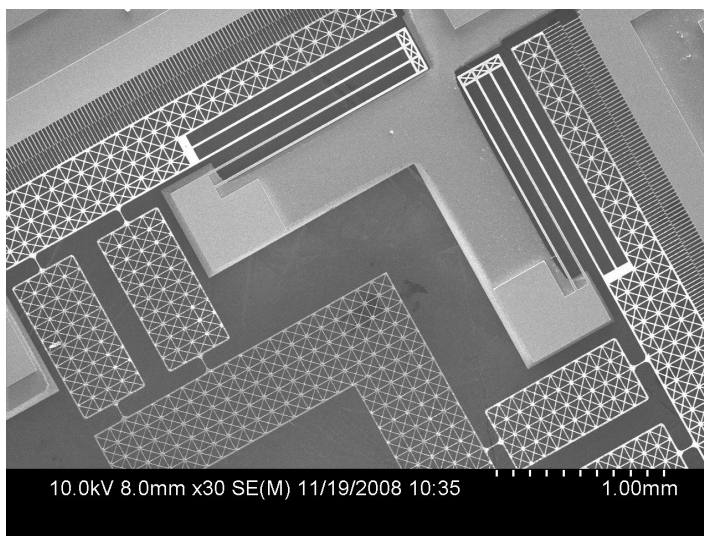


Fig. 4.6 – Imagem de MEV do microposicionador fabricado.



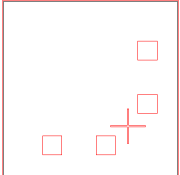

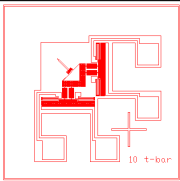

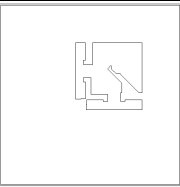




O processo descrito acima encontra-se resumido na tabela 4.1. O desenho técnico do microposicionador com a indicação de suas principais dimensões pode ser encontrado em anexo.

Ao longo dos meses que foram dedicados para a fabricação do microposicionador, muitos processos foram aprimorados de forma a solucionar grande parte dos problemas enfrentados inicialmente. Atualmente a taxa de sucesso é da ordem de 80%.

Alguns problemas, porém, ainda estão presentes na maioria dos dispositivos fabricados até o final de 2008. Por se tratar de uma estrutura muito frágil, a viga que conecta a mesa em “L” ao efetuator quebra com frequência, como mostrado na figura 4.7.

Além disso, a taxa de corrosão não uniforme do processo *DRIE Bosch*, como ilustrada na figura 4.8, pode resultar na “queima” da superfície móvel da estrutura, devido à sua reduzida capacidade de dissipação térmica e em *comb-drives* com dentes mais finos, devido ao fenômeno de *over-etching* (figura 4.9).

Tab. 4.1 – Sequência de fabricação

Etapa	Descrição	Máscara
	Substrato inicial: <i>wafer</i> SOI	nenhuma
	Transferência do primeiro padrão com uma fina camada de cromo/ouro	
	Transferência do segundo padrão com uma fina camada de alumínio	
	Transferência do terceiro padrão com uma fina camada de alumínio	
	Corrosão por <i>DRIE</i> da <i>handle layer</i>	nenhuma
	Corrosão por HF da <i>BOX layer</i>	nenhuma
	Corrosão por <i>DRIE</i> da <i>device layer</i>	nenhuma
	Remoção dos filmes de alumínio e dispositivo pronto	nenhuma

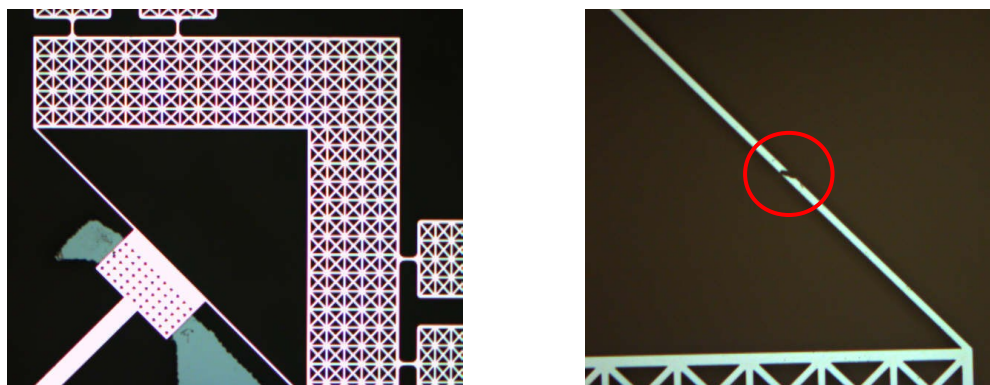


Fig. 4.7 –Viga que conecta a mesa ao efêtuador: perfeita (esq); quebrada (dir).

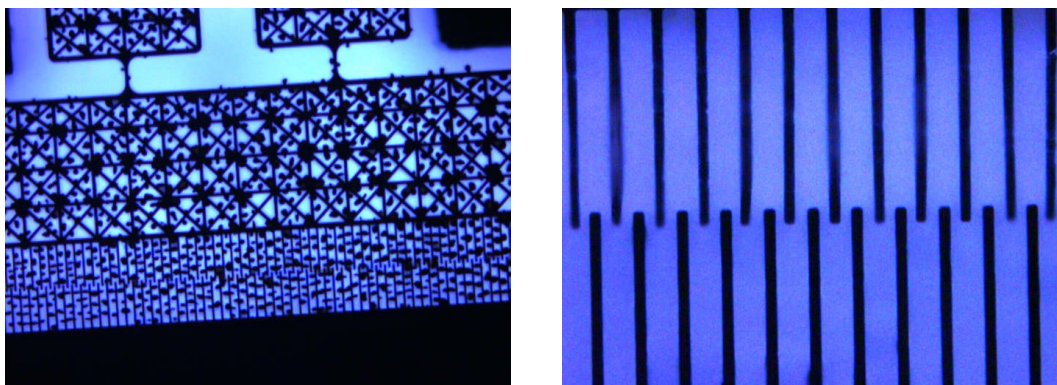


Fig. 4.8 – Imagens de diferentes regiões de um mesmo dispositivo (taxa não uniforme de corrosão).

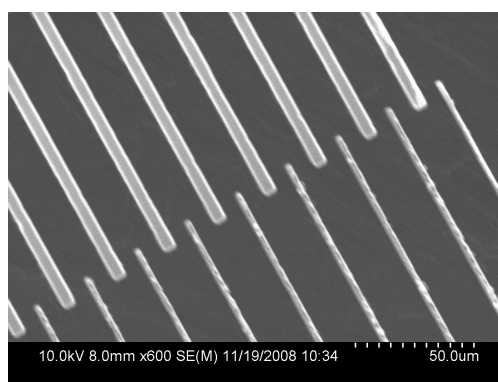


Fig. 4.9 – Comb-drives com dentes mais finos devido ao *over-etching*.

5 – MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nessa seção será inicialmente apresentado um guia passo a passo para a simulação estática do microposicionador no software comercial Ansys. Em seguida, os resultados obtidos através das análises estática e modal serão apresentados em detalhes e discutidos.

5.1 – Passo a passo da simulação no Ansys

- 1) Importar o modelo feito no SolidWorks para o ambiente de trabalho do Ansys.

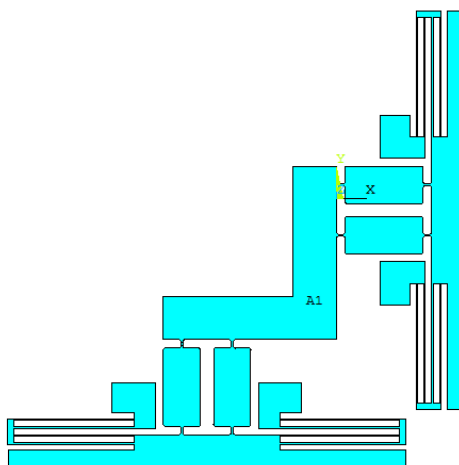


Fig. 5.1 – Modelo Importado no Ansys.

- 2) Definir os elementos que constituirão a simulação:

Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete

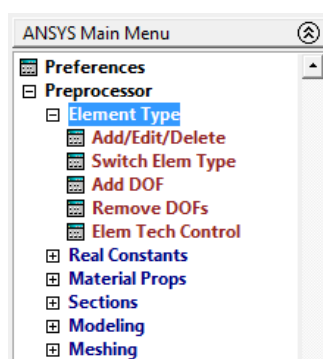
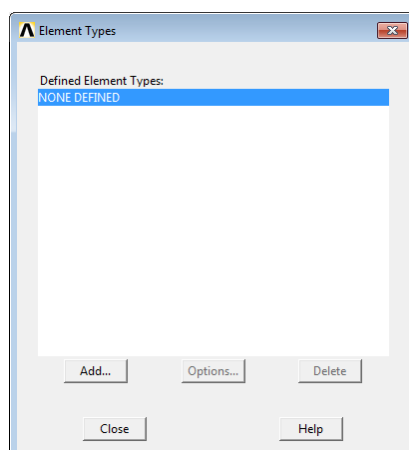


Fig. 5.2 – Menu com opções de Simulação.

- 3) Na janela *Element Types*, clicar em *Add*:

Fig. 5.3 – *Element Types*.

4) Selecionar o elemento *Quad4node 42 (PLANE42)*, que constituirá a superfície a ser simulada:

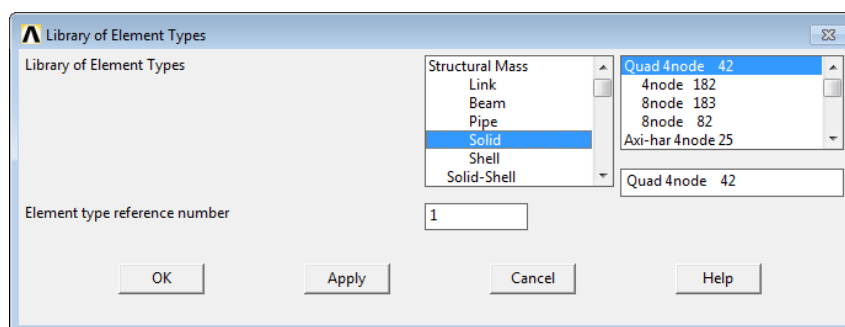


Fig. 5.4 – Elemento da estrutura.

5) Adicionar dois elementos *Transducer 126 (TRANS126)*, na mesma janela anterior. Porém, em um deles deve-se selecionar *Options* (na janela *Element Types*) e definir como DOF Set, a opção UY VOLT.

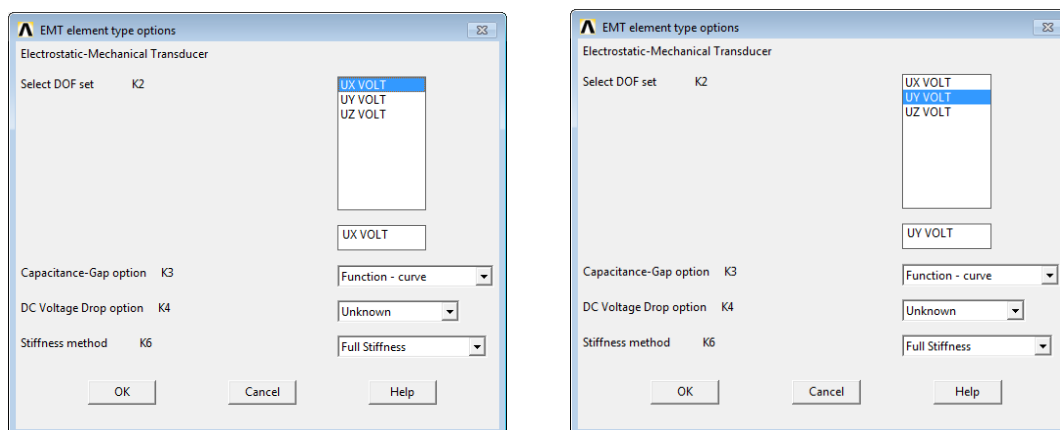


Fig. 5.5 – Direção do TRANS126.

6) O passo seguinte é definir as propriedades mecânicas da estrutura. Para isso, ir em *Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic*, onde EX é o módulo de elasticidade do material e PRXY é o coeficiente de Poisson:

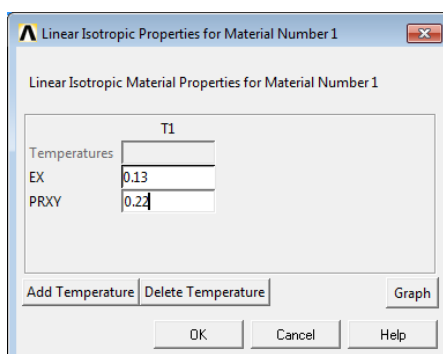


Fig. 5.6 – Propriedades do Material.

7) Deve-se também, definir a Permissividade Elétrica do meio (*Eletromagnetics > Relative Permittivity > Constant*):

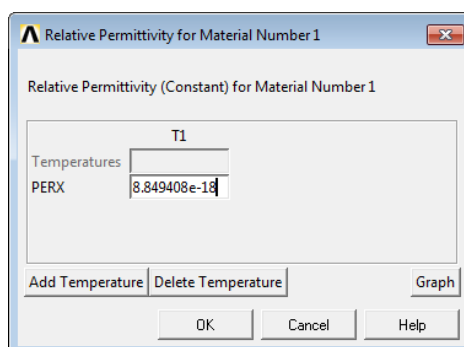


Fig. 5.7 – Permissividade elétrica do meio.

8) O próximo passo é introduzir a curva de capacitância que será utilizada pelos elementos TRANS126, para isso clicar em *Preprocessor* > *Real Constants* > *Add/Edit/Delete*, e preencher as janelas que se seguem, com os dados apresentados nas figuras abaixo:

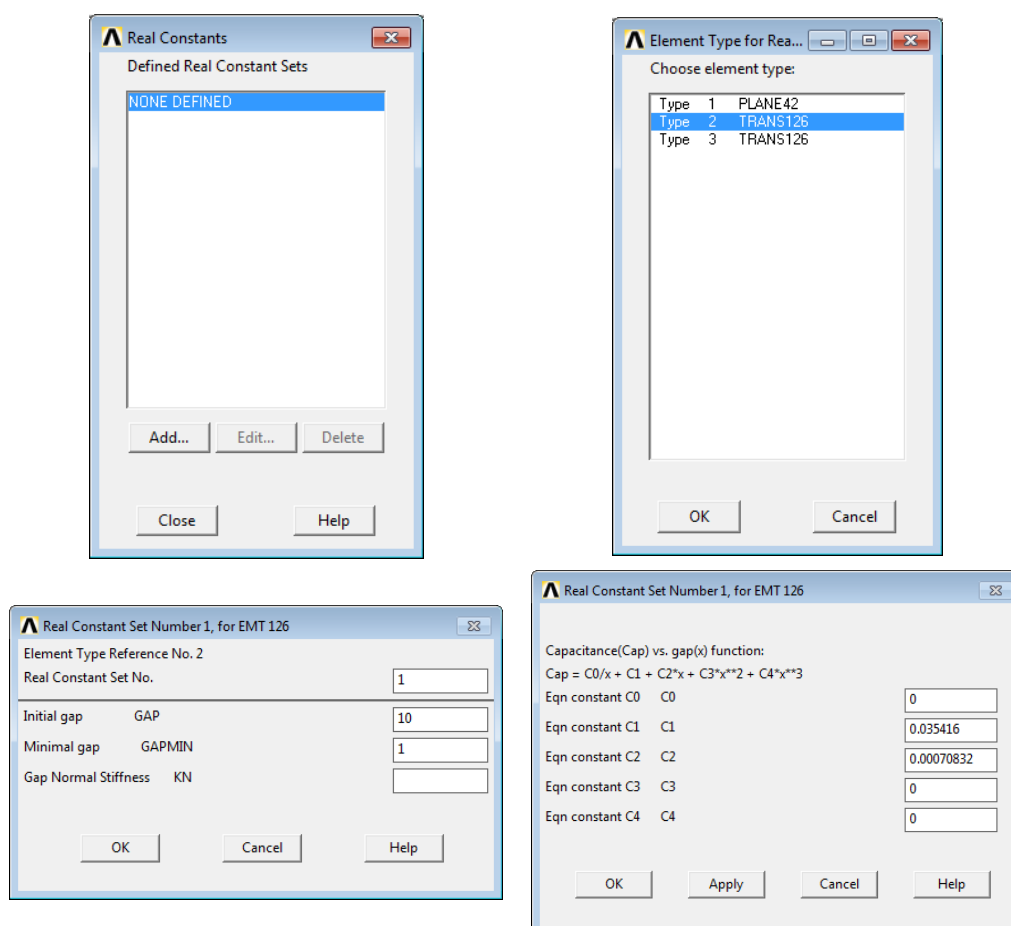


Fig. 5.8 – Constantes para o TRANS126.

9) Definidas as características do modelo, é necessário realizar a discretização do elemento. Para isso, clicar em *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh Tools*. Na janela *Mesh Tool*, selecionar *Mesh* e a seguir, na nova janela, *Pick All*. Dessa forma, as malhas serão representadas no modelo.

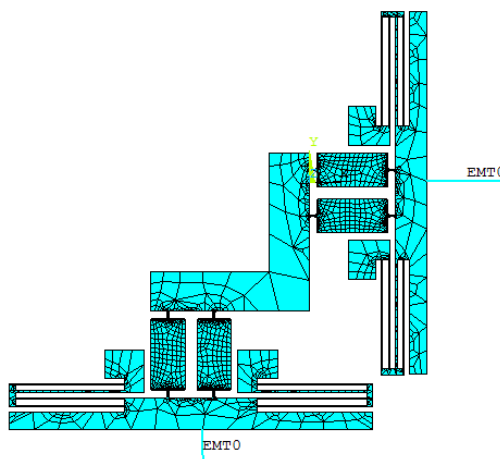


Fig. 5.9 – Malha da estrutura.

10) Com a malha feita, podemos colocar os elementos TRANS126 na simulação. Mas para isso, devemos ter os dois nós onde o elemento se sustentará. Como um dos nós já se encontra na estrutura, devemos apenas criar um outro nó. Para se criar um nó, *Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > On Working Plane*, e selecionar o local onde se deseja posicionar o nó.

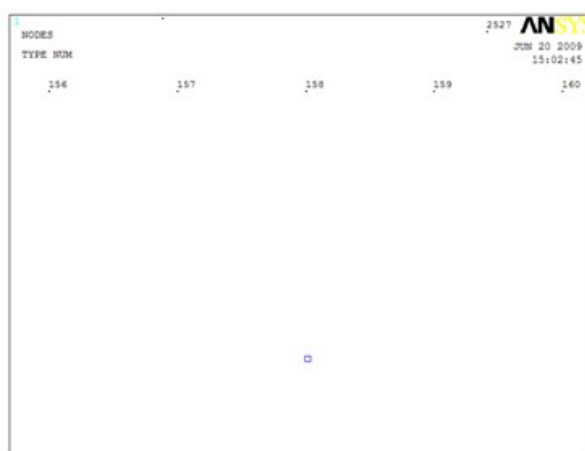


Fig. 5.10 – Nós de apoio para o TRANS126.

11) Agora o elemento TRANS126 será inserido, mas antes, deve-se se lembrar que foram criados dois elementos TRANS126, com direções diferentes. Para selecionar qual dos dois elementos será inserido, ir em *Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes* e selecionar qual dos dois será inserido em cada direção.

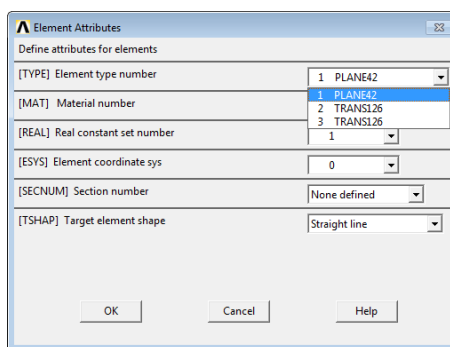


Fig. 5.11 – Seleção do elemento a ser inserido.

12) Para o posicionamento do elemento, seguir a ordem que foi discutida na Fundamentação Teórica, onde os nós I e J devem seguir uma sequência para que se funcione corretamente. O elemento é inserido através do seguinte comando, *Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes*, e selecionar os dois nós.

13) Realizar os dois passos anteriores para o elemento TRANS126 que se localizará na posição perpendicular a esse, se atentando ao elemento selecionado e a sequência de nós correta.

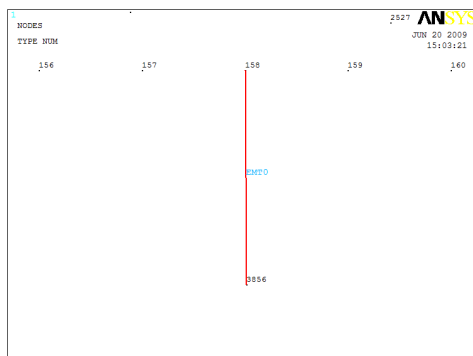


Fig. 5.12 – TRANS126 na direção Y.

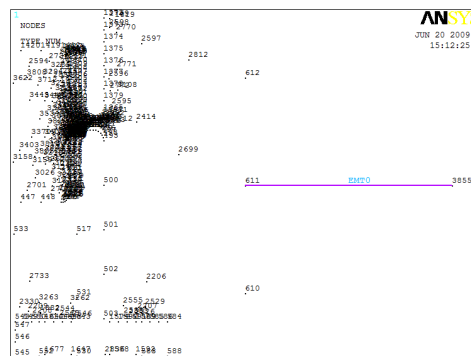


Fig. 5.13 – TRANS126 na direção X.

14) Agora deve-se impor as condições de contorno para a estrutura. Essas condições serão colocadas nos elementos TRANS126, assim como nas partes da estrutura que estarão fixas no substrato. As condições de contorno podem ser inseridas em *Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement*.

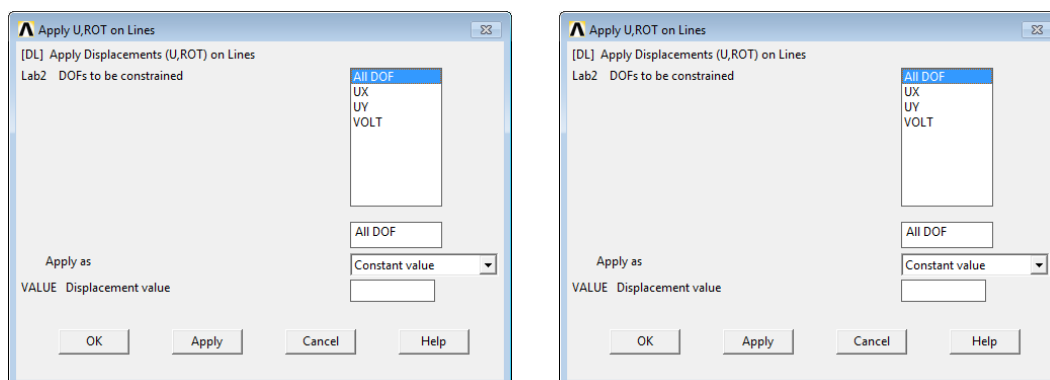


Fig. 5.14 – Definição das condições de contorno.

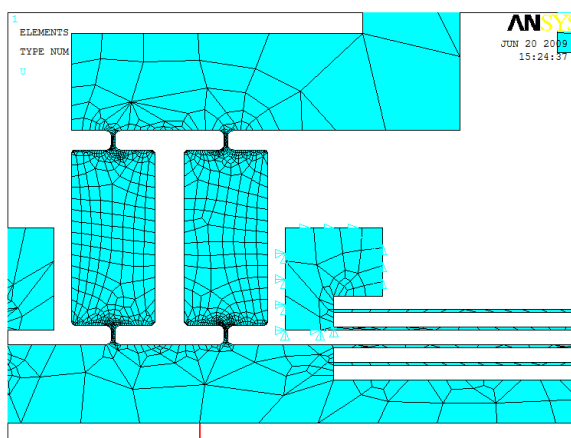


Fig. 5.15 – Condições de contorno em uma das partes da estrutura.

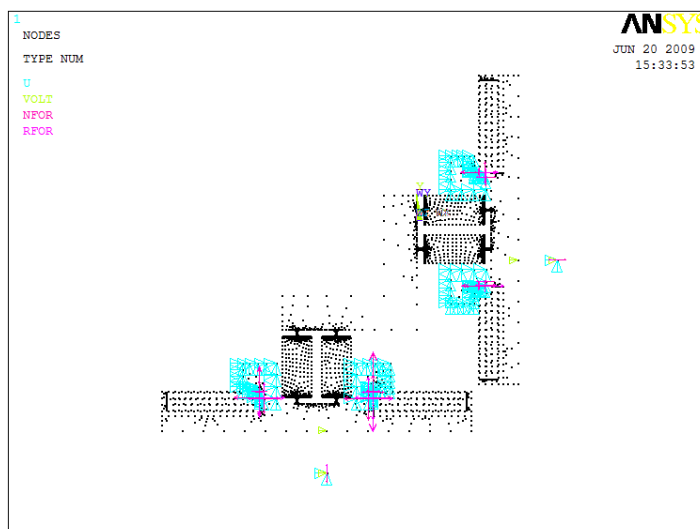


Fig. 5.16 – Condições de contorno.

15) Agora pode-se rodar a simulação. *Solution > Solve > Current LS*. E a visualização dos resultados através do menu *General Postproc > Plot Results*.

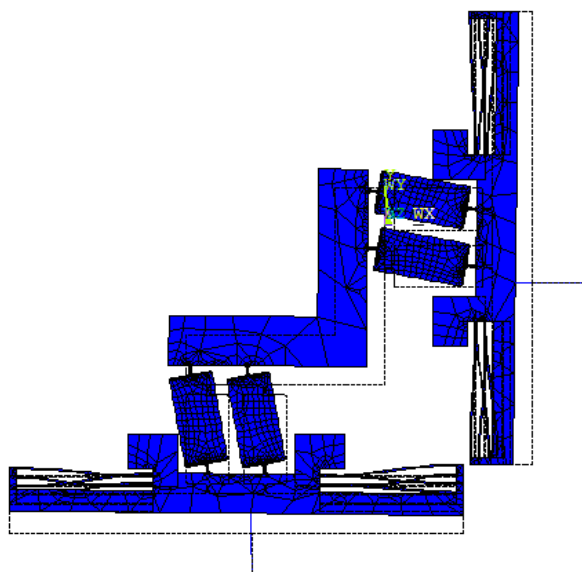


Fig. 5.17 – Forma deformada do modelo.

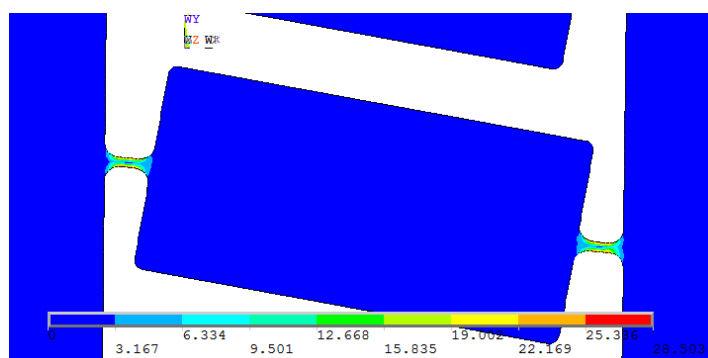


Fig. 5.18 – Tensão de Von Mises nas juntas prismáticas.

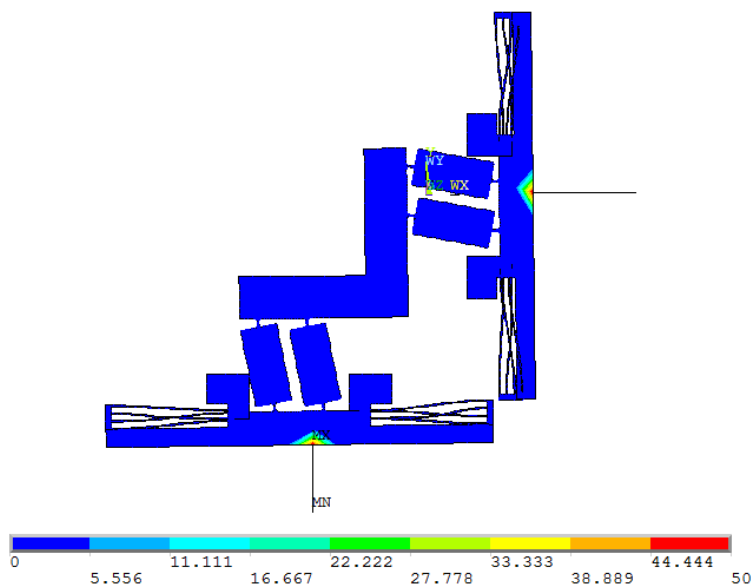


Fig. 5.19 – Distribuição de voltagem.

5.2 – Resultados obtidos

5.2.1 – Análise Estática

A figura 5.20 exibe a estrutura deformada quando ambos os eixos são atuados por 45V, o deslocamento máximo obtido é de 22,5 μ m no efetuador.

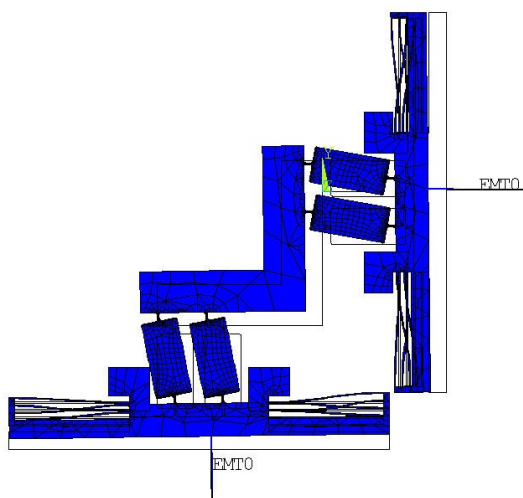


Fig. 5.20 – Estrutura deformada devido a aplicação de 45V em ambos os eixos.

A distribuição da Tensão de Von-Mises nos mancais flexíveis pode ser observada na figura 5.21.

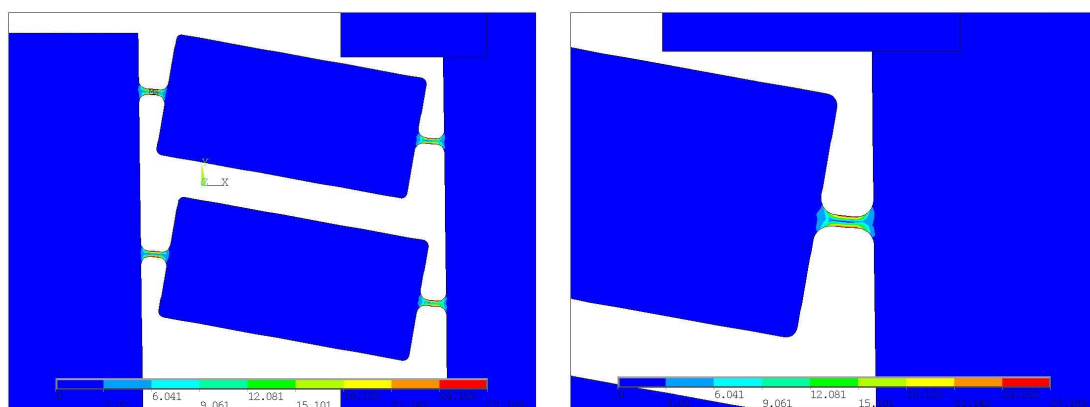


Fig. 5.21 – Tensão de Von Mises na estrutura com tensão de 45V em ambos os eixos.

Um outro resultado interessante é a distribuição de tensões elétricas na estrutura, como ilustrado na figura 5.22. Foi utilizado o elemento PLANE 42 do Ansys para modelar a estrutura do microposicionador, o qual não é eletrostático e por

isso a tensão elétrica fica limitada à região de aplicação. Esse fato permite que cada eixo seja atuado individualmente.

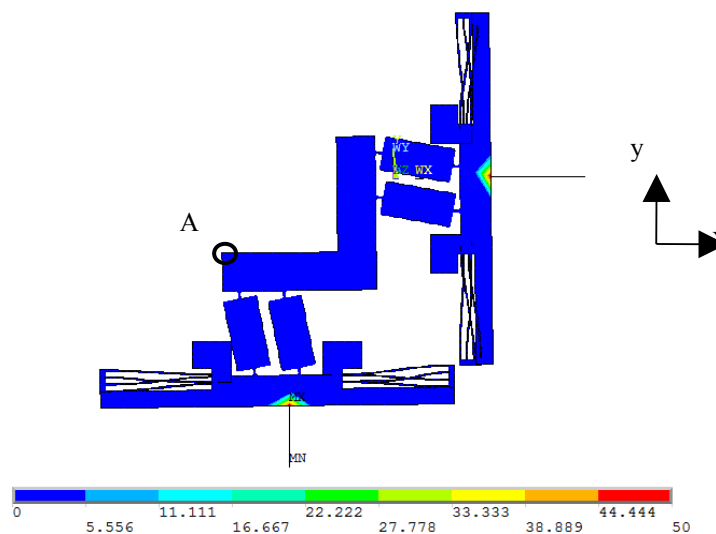


Fig. 5.22 – Distribuição de tensões elétricas na estrutura.

Para efeitos de comparação com a caracterização experimental do *MEMS* a ser realizada, é interessante observar a curva de tensão-deslocamento, que indica o quanto a estrutura se desloca para diferentes níveis de tensão. A figuras 5.23 ilustra os resultados obtidos na simulação para o ponto “A” indicado na figura 5.22.

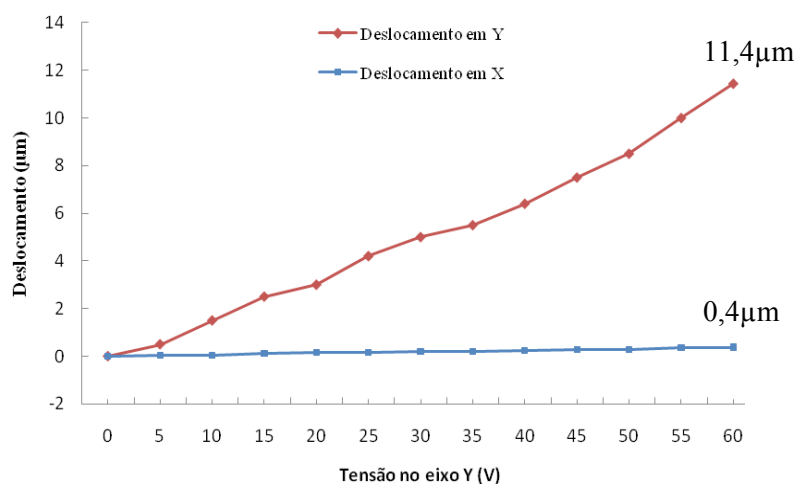


Fig. 5.23 – Deslocamento ao longo de X e Y quando a tensão é aplicada em Y.

A curva indica que o deslocamento máximo obtido para uma tensão aplicada de 60V é de aproximadamente 11,4 μm . O acoplamento entre os graus de liberdade existe porém é pequeno, sendo que o seu valor máximo atinge 0,4 μm .

O deslocamento para baixo ou fora do plano XY pode causar problemas em muitas aplicações. Pode acarretar na torção do feixe de molas e desalinhamento entre os dedos do pente de capacitores. Além disso, pode afetar a orientação do microposicionador e provocar tensões adicionais nos mancais flexíveis.

Para modelar a carga gravitacional, uma força distribuída correspondente ao peso próprio por unidade de área (aproximadamente 1,2 N/m²) foi aplicada a toda superfície superior do *MEMS*. O resultado está ilustrado na figura 5.24.

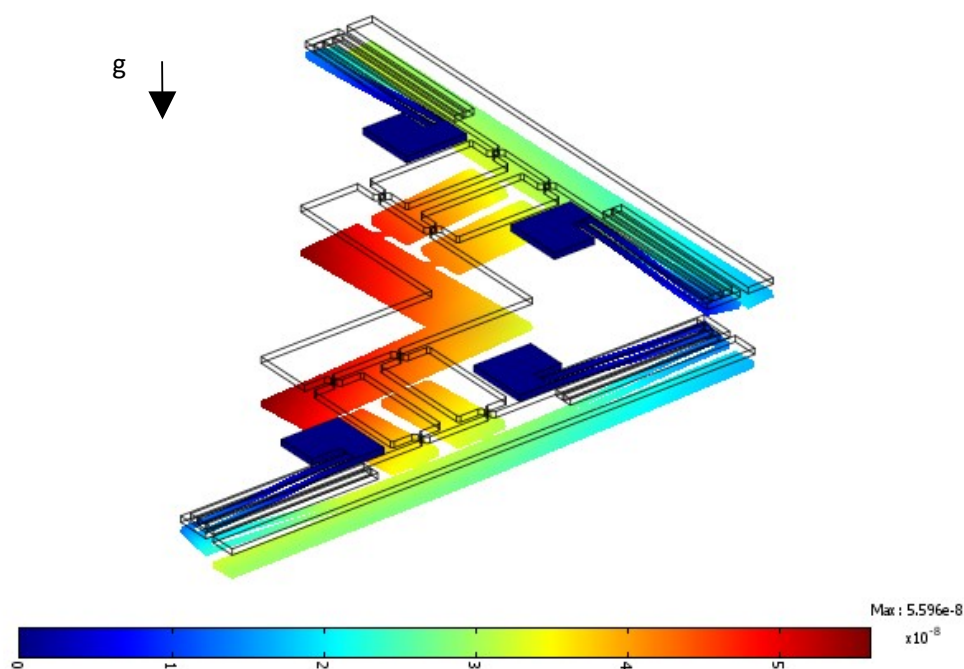


Fig. 5.24 – Estrutura deformada devido ao peso próprio.

A simulação sugere que a maior deformação ocorre no efetuator e é de aproximadamente 50 nm ou 0,05 μm . Comparado com a dimensão total do efetuator (2 mm) esse efeito pode ser considerado desprezível.

5.2.2 – Análise Modal

As frequências naturais e os modos de vibrar do microposicionador também foram avaliados pelo MEF. A seguir são exibidos os seis modos de vibrar dominantes para o sistema em estudo.

Devido ao projeto utilizando mecanismo de cinemática paralela, altas frequências naturais podem ser obtidas. O primeiro e o quinto modos de vibrar ocorrem no plano XY, os demais ocorrem predominantemente fora do plano, e portanto, não devem ser excitados pelos *comb-drives*.

Os resultados estão ilustrados nas figuras 5.25 a 5.30. O primeiro modo tem as molas dobradas vibrando em fases opostas, enquanto o quinto modo tem elas em fase. Devido a assimetrias no carregamento, quando as molas são deformadas em direções opostas, uma pequena componente de rotação no plano XY pode ser observada, característica indesejável para esse tipo de microposicionador.

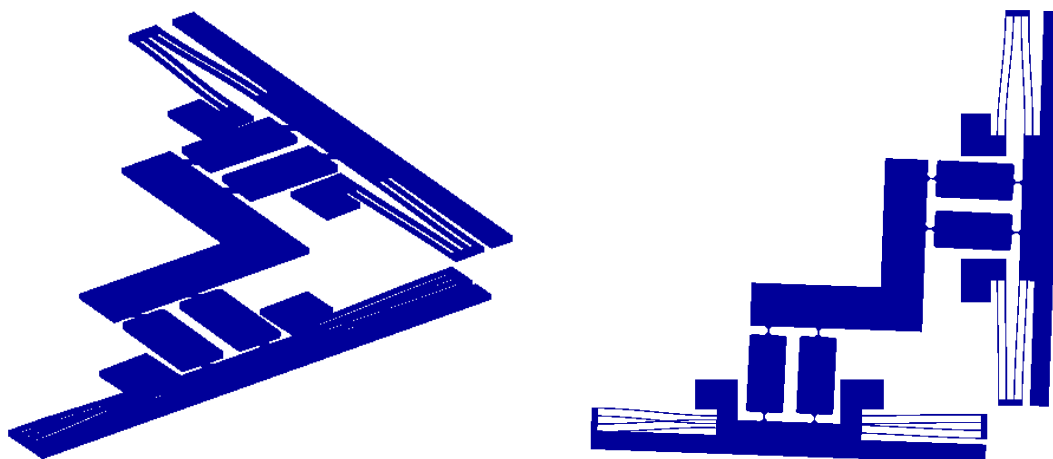


Fig. 5.25 – 1ª frequência natural: 2710Hz.

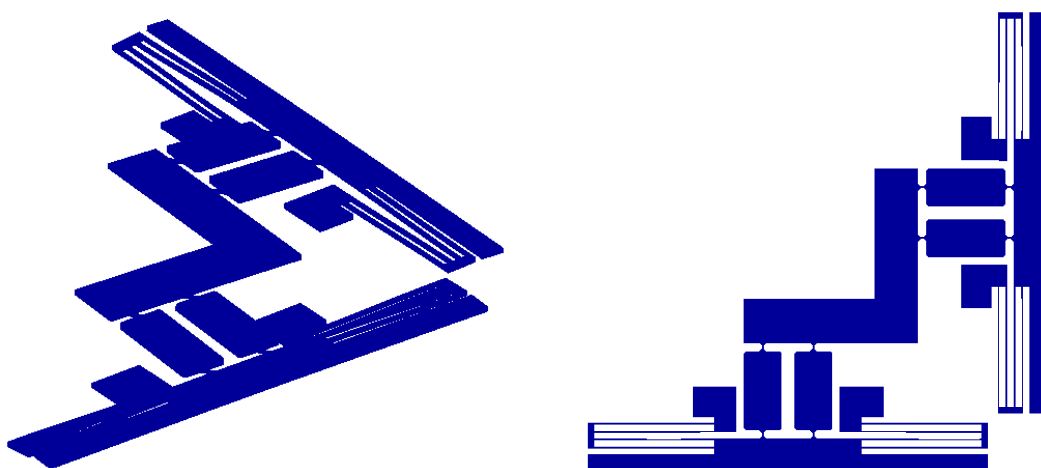


Fig. 5.26 – 2ª frequência natural: 3535Hz.

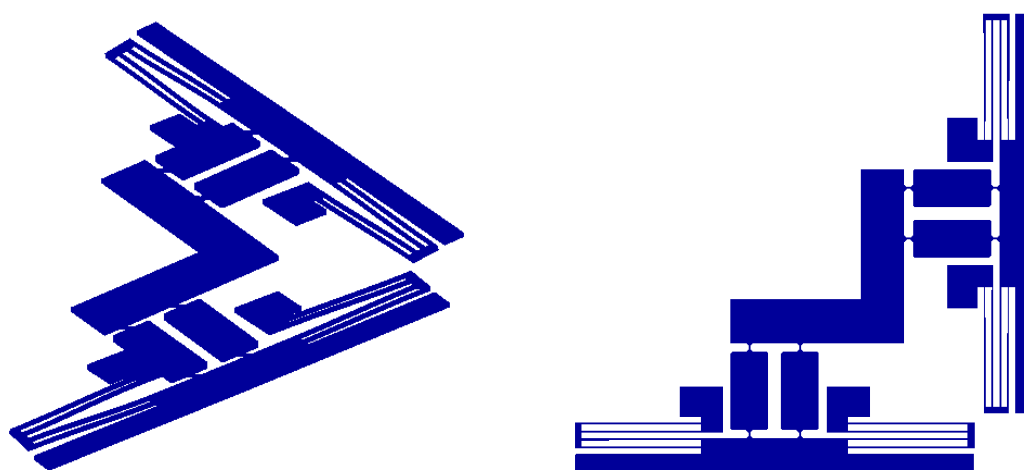


Fig. 5.27 – 3ª frequência natural: 4817Hz.

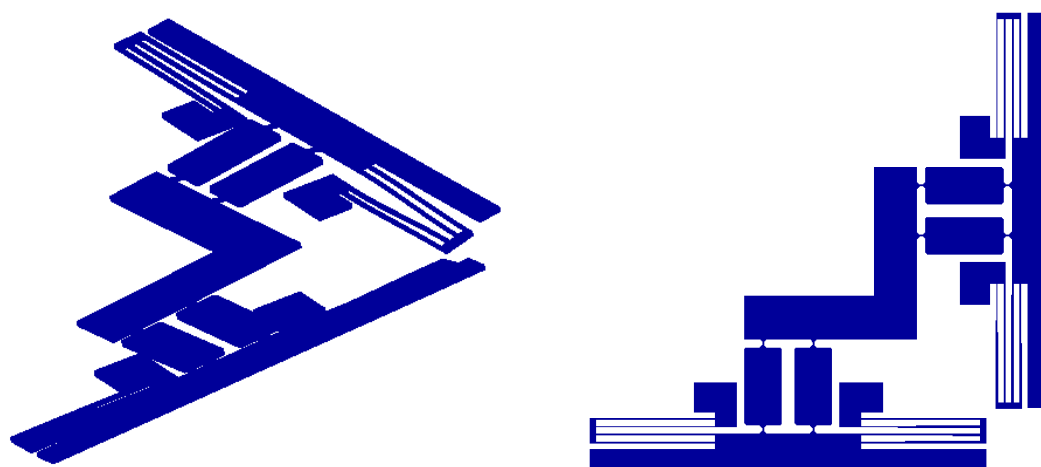


Fig. 5.28 – 4ª frequência natural: 5577Hz.

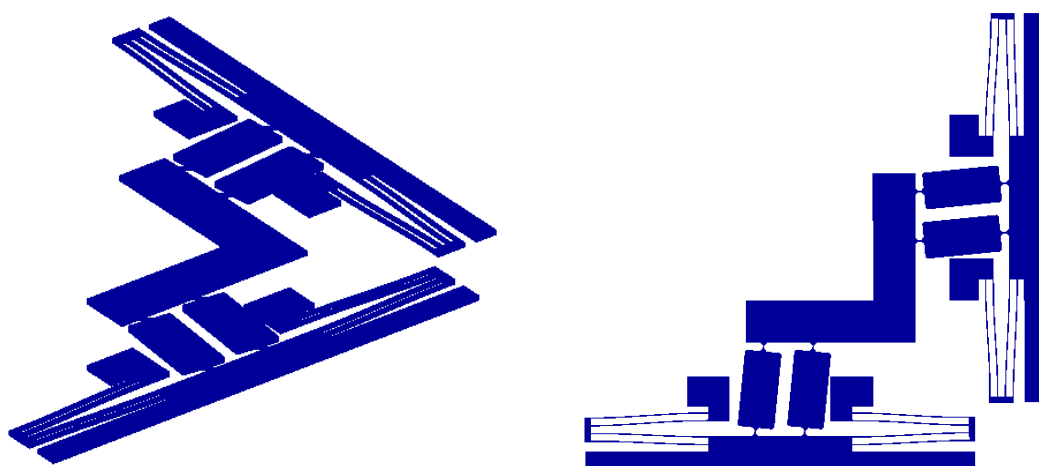


Fig. 5.29 – 5ª frequência natural: 6174Hz.

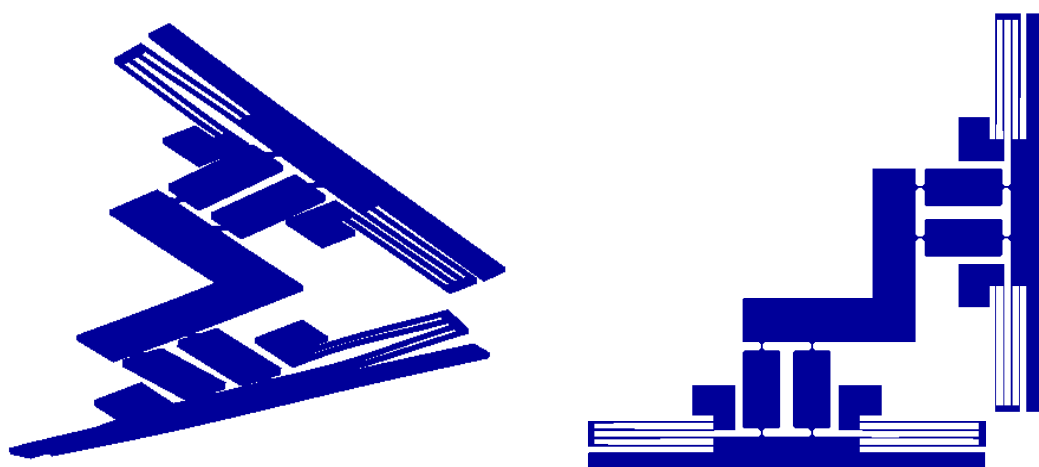


Fig. 5.30 – 6ª frequência natural: 9386Hz.

6 – CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO MEMS

Dois dos *MEMS* fabricados na Universidade de Illinois em Urbana-Champaign nos Estados Unidos foram enviados para o Brasil com objetivo de aqui serem testados e caracterizados. Para permitir o acompanhamento de todos os processos de fabricação a que são submetidos, cada microposicionador recebe um número único de identificação. Os dispositivos que serão analisados nesse trabalho são o XY01 e XY04.

Esta seção lidará com a caracterização desses microposicionadores através da medição do deslocamento estático em função da voltagem aplicada.

Para a realização dos experimentos, foram utilizadas as instalações do Laboratório de Microeletrônica (LME) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O encapsulamento do *MEMS* foi construído dentro da Sala Limpa e os testes foram realizados no Laboratório de Caracterização Experimental. O auxílio do graduando Murilo Zubioli Mielli do curso de Sistemas Eletrônicos foi fundamental para a viabilização dos testes.

Por se tratar de um dispositivo extremamente sensível à contaminação por partículas presentes no ar, foi necessário encapsulá-lo antes da realização dos testes. A figura 6.1 ilustra os detalhes construtivos do encapsulamento utilizado.

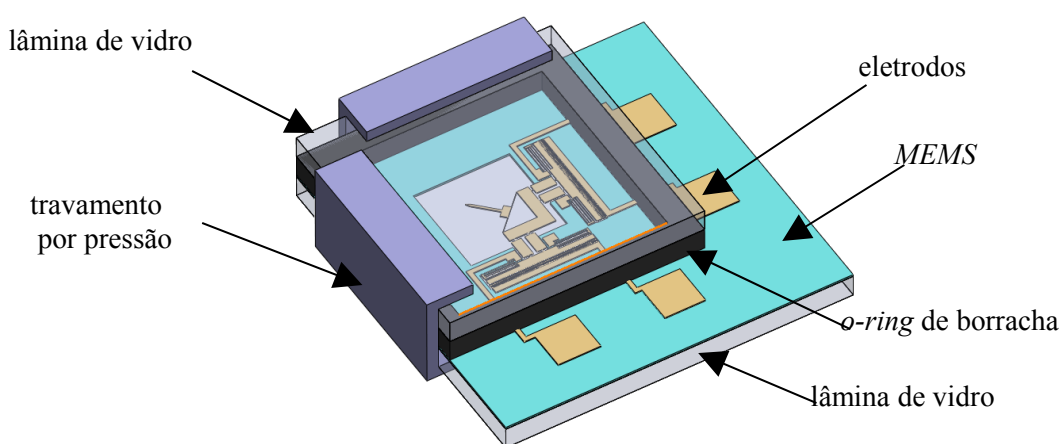


Fig. 6.1 – Modelo em CAD do *MEMS* encapsulado.

Note que apesar dele permitir o acesso externo aos eletrodos, as estruturas sensíveis do dispositivo estão livres de contaminação. O encapsulamento construído está apresentado na figura 6.2.



Fig. 6.2 – Encapsulamento construído.

Para a atuação do dispositivo foi utilizada uma *probe station* da Wentworth Labs em conjunto com um eletrômetro da Keithley. O deslocamento foi observado através de um microscópio com as seguintes características: ocular de 10x; objetivas de 2,25x, 8x, 25x e 50x; e zoom de 2x. Uma câmera foi acoplada ao microscópio, de forma a permitir a gravação de vídeos e fotos. Esse material foi posteriormente processado no software ImageJ para a obtenção dos valores experimentais de deslocamento. A figura 6.3 ilustra todos os equipamentos utilizados.



Fig. 6.3 – *Setup* utilizado para medição

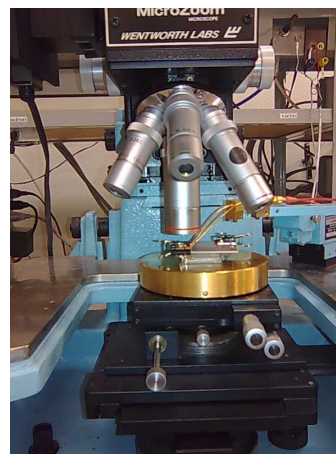


Fig. 6.4 – Detalhe da *probe station* atuando o MEMS encapsulado

O software ImageJ permite que seja estabelecida uma escala na imagem (uma dimensão conhecida) e a partir dela todas as dimensões desejadas podem ser obtidas. Além disso, possui diversos filtros que facilitam a observação dos deslocamentos. Na

figura 6.4, foi aplicado um filtro para ressaltar as bordas da estrutura. Sabe-se que a espessura dos dentes é $7\mu\text{m}$, resultando em um deslocamento do pente móvel de $4,8\mu\text{m}$ a 60V.

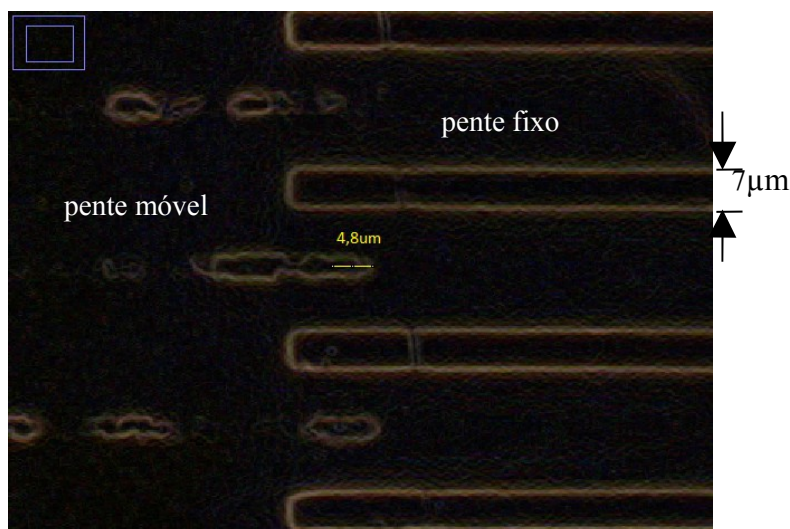


Fig. 6.4 – Processamento da imagem no software ImageJ

Para obter experimentalmente as curvas voltagem-deslocamento, a voltagem foi gradualmente aumentada e o correspondente deslocamento do efetador nas direções X e Y foi medido através do procedimento descrito acima. Da mesma forma que ocorreu para a análise computacional no software Ansys, foi medido o deslocamento do ponto A, indicado na figura 5.22.

Os resultados para o dispositivo XY04 estão ilustrados na figura 6.5 (dispositivo atuado na direção X), e 6.6 (dispositivo atuado na direção Y). Juntamente com os dados experimentais, está plotada a curva aproximadora de segunda ordem.

O dispositivo XY01 só começa a se mover quando a tensão aplicada é superior a 150V, valor muito acima da faixa prevista em projeto (0-60V), por isso o mesmo não será caracterizado. Uma possível explicação para esse problema é que a região do substrato (*SOI wafer*) que deu origem ao dispositivo apresentava um nível de dopantes abaixo do especificado pelo fabricante.

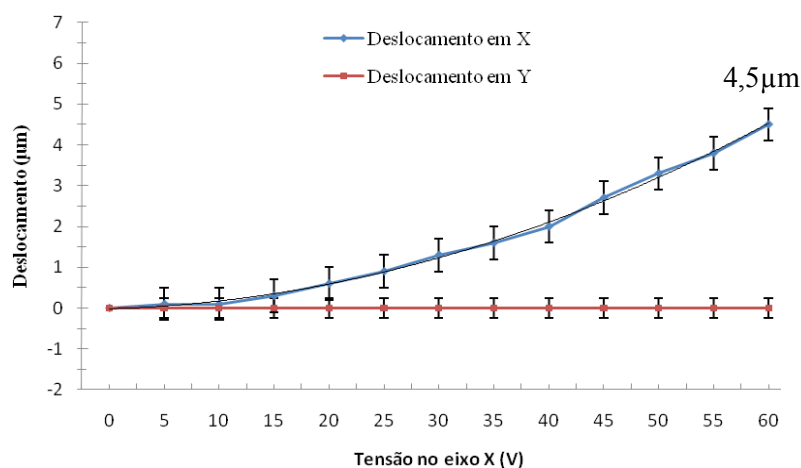


Fig. 6.5 – Deslocamento ao longo de X e Y quando a tensão é aplicada em X.

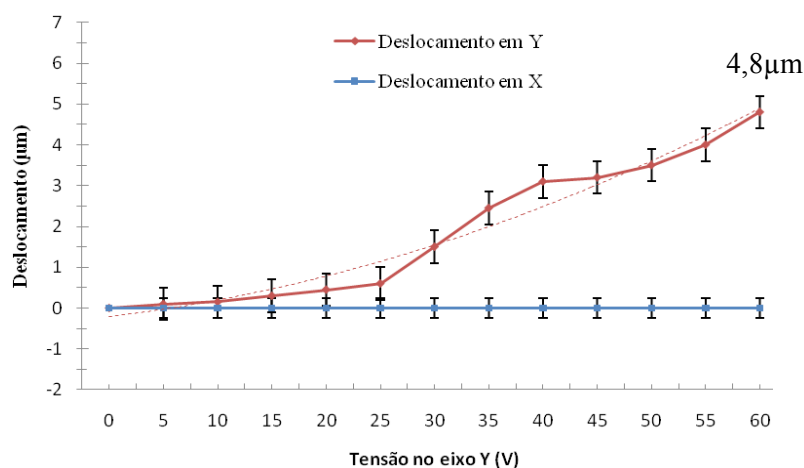


Fig. 6.6 – Deslocamento ao longo de X e Y quando a tensão é aplicada em Y.

As figuras 6.5 e 6.6 indicam que o deslocamento máximo obtido para uma tensão aplicada de 60V é de aproximadamente 4,8µm. Dentro da resolução das observações, nenhuma atuação cruzada foi detectada. Quando um único eixo é plenamente atuado, o movimento gerado na outra direção não pôde ser notado com o microscópio utilizado. Esse fato é previsto pela análise cinemática do microposicionador e resulta do projeto de atuação ortogonal, como discutido na seção 3.1.

Mais um experimento foi realizado com o objetivo de testar o efeito de acoplamento da atuação. Cada atuador é individualmente acionado por uma voltagem que corresponde a um deslocamento de 4,5µm (através dos dados obtidos nas figuras

6.5 e 6.6) e as coordenadas correspondentes em X e Y do efetuator são gravadas. Em seguida, ambos atuadores são acionados simultaneamente com a mesma voltagem (que corresponde a um deslocamento de $4,5\mu\text{m}$ ao longo de X e Y) e as coordenadas do efetuator são comparadas com o resultado obtido anteriormente. Novamente, dentro da resolução do microscópio, nenhuma diferença pôde ser observada.

A figura 6.7 faz um comparativo entre os deslocamentos obtidos no modelo computacional e os obtidos na caracterização experimental do protótipo construído, ambos com atuação no eixo Y.

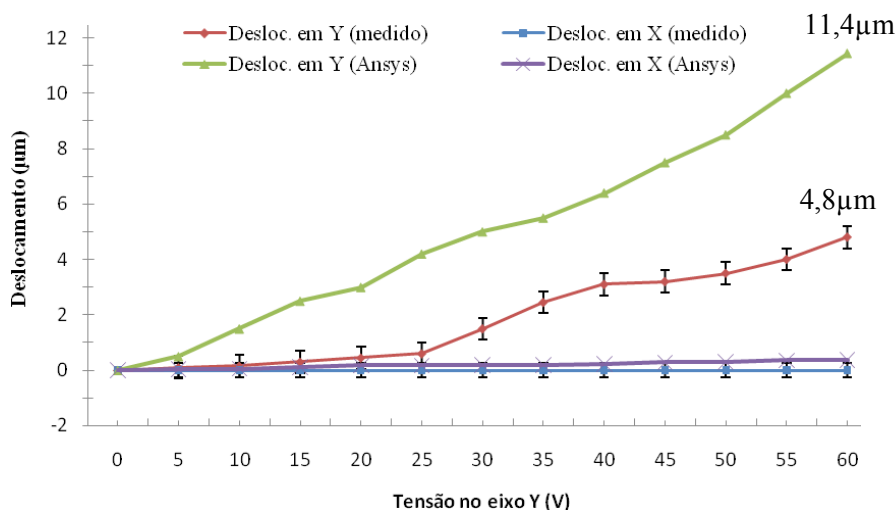


Fig. 6.7 – Comparativo entre o modelo em MEF e a caracterização experimental.

A discrepância (na média 68%) que foi observada pode ser explicada em partes por imperfeições de fabricação, dado que a rigidez dos mancais flexíveis e das molas que mantêm a estrutura suspensa são sensíveis às suas dimensões. Foi constatado também que alguns dentes do comb-drive estavam quebrados (cerca de dois por pente), o que pode ter afetado o resultado da caracterização experimental. Além disso, aproximações e simplificações feitas durante a modelagem de elementos finitos podem contribuir para essa diferença.

7 – PROJETO UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

7.1 – Implementação Numérica

Com base na teoria descrita na seção 2.4, foi implementado um algoritmo de otimização em Matlab, que trabalha com domínios regulares de células de treliças de 4 nós. O conhecimento básico para o desenvolvimento foi obtido através de [27].

O funcionamento do software é ilustrado no fluxograma em anexo. O programa pode ser dividido em quatro partes principais. Inicialmente, é feita a leitura do domínio e dos parâmetros de projeto de um arquivo texto. A segunda etapa é a criação das matrizes fixas da estrutura, aquelas que contém os nós, a conectividade das barras, forças aplicadas, deslocamentos desejados e vínculos na estrutura. O software entra no processo iterativo, no qual a cada iteração são criadas novas matrizes de rigidez \mathbf{K}_1 e \mathbf{K}_2 , são calculados os deslocamentos para os três casos de carga (vetores \mathbf{u}_a , \mathbf{u}_b , \mathbf{v}_b) e os valores do volume e da função objetivo. Só então a otimização propriamente dita é iniciada. Nesse momento são determinados os gradientes da função objetivo e a rotina de programação linear (Simplex) retorna os novos valores das variáveis de projeto nos intervalos definidos pelos limites móveis. Após o fim das iterações, entra-se na última parte, a visualização dos resultados.

O programa desenvolvido juntamente com a relação dos parâmetros iniciais encontram-se em anexo.

7.2 – Resultados: exemplos

O primeiro mecanismo gerado é um inversor. O domínio regular é discretizado em células de 4 nós e foram utilizados os seguintes parâmetros: $V_{max}=1,5$; $A_{min}=0,01$; $A_{max}=0,01$ e $A_0=0,1$. Na figura 7.1, “F” representa o carregamento aplicado, “D” o deslocamento desejado e os círculos em preto os vínculos da estrutura.

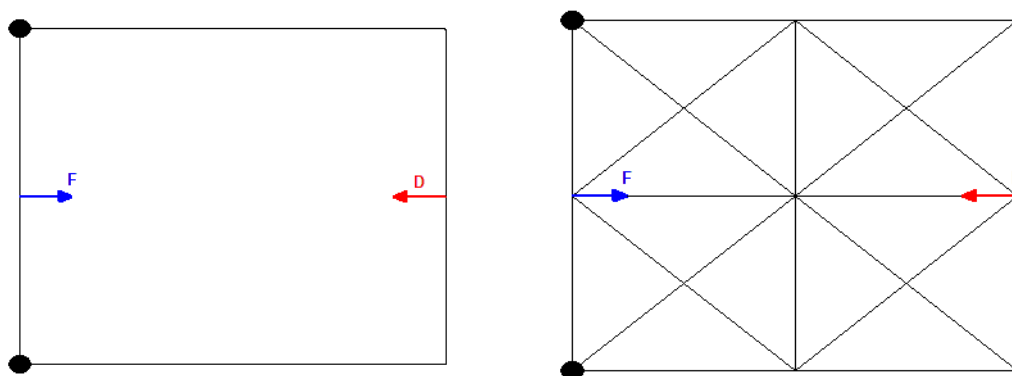


Fig. 7.1 – Domínio de projeto e discretização em célula de 4 nós.

A topologia final é mostrada a seguir, assim como o mecanismo flexível em sua configuração deformada.

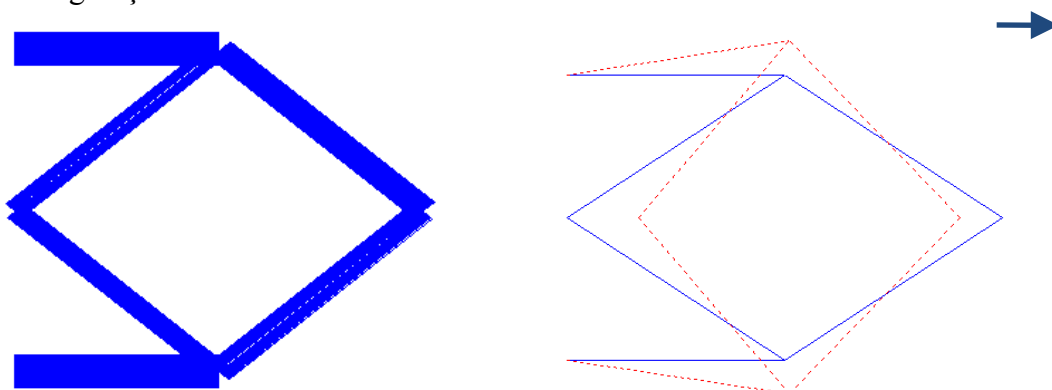


Fig. 7.2 – Configuração original e deformada do mecanismo.

Resultado semelhante pode ser encontrado em [32]. A figura 7.3 ilustra as curvas de volume, função objetivo, energia mútua e energia de deformação ao longo das iterações.

Através da curva de volume observa-se que o volume inicial desrespeitava o valor máximo permitido. Portanto, o método procura inicialmente respeitar essa restrição para depois otimizar a estrutura. O fato de o volume final ser igual ao máximo permitido indica que a energia de deformação (ou flexibilidade média) domina o processo, isso por que, se minimizar a flexibilidade média fosse o único objetivo, a estrutura teria certamente o maior volume possível.

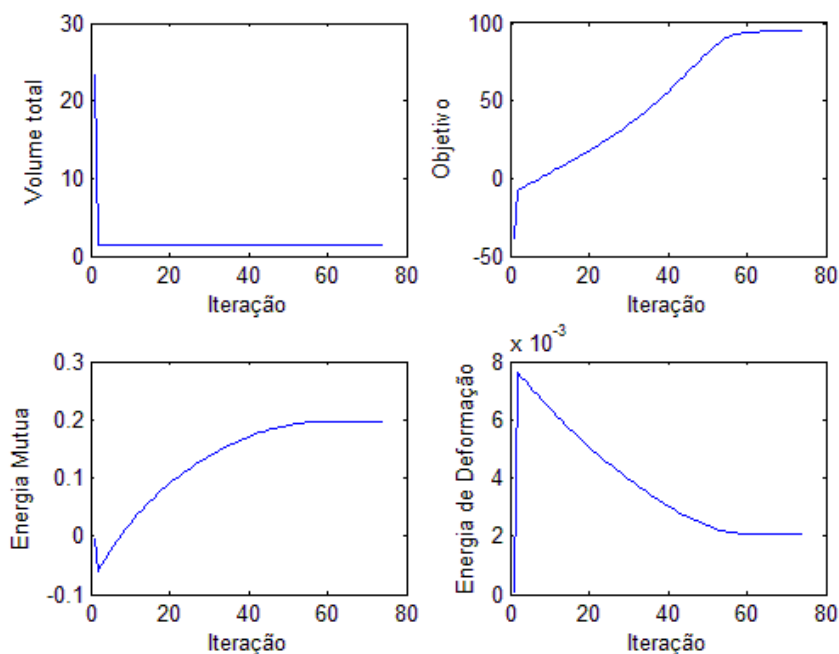


Fig. 7.3 – Curvas de volume, objetivo e energias ao longo das iterações.

7.3 – Resultados: versão do “MEMS” otimizada

Para se obter a configuração otimizada do microposicionador, foi utilizado um domínio simétrico com um total de 128 nós e 465 barras de treliças (fig. 7.4). Os seguintes foram adotados: $V_{\max}=50$; $A_{\min}=0,01$; $A_{\max}=0,01$, $A_0=0,1$ e $W=0,5$. As regiões em cor cinza escuro são as âncoras de fixação da estrutura, os demais vínculos representam as condições de simetria e “D” é o deslocamento desejado.

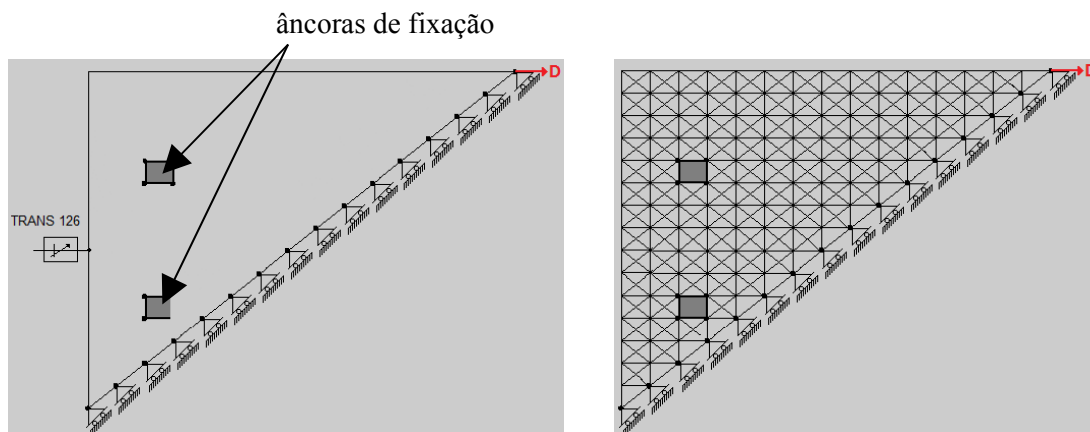


Fig. 7.4 – Domínio de projeto e discretização em célula de 4 nós.

O tempo de processamento para essas condições de entrada foi da ordem de 35 min, utilizando um processador Intel(R) Core(TM)2 Duo 2.2GHz. O resultado obtido pelo algoritmo é apresentado nas figuras 7.5 a 7.7.

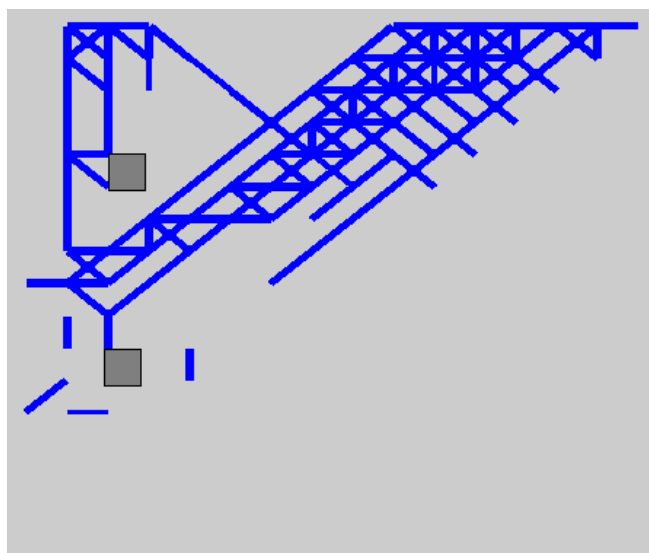


Fig. 7.5 – Resultado obtido através do algoritmo implementado em Matlab.

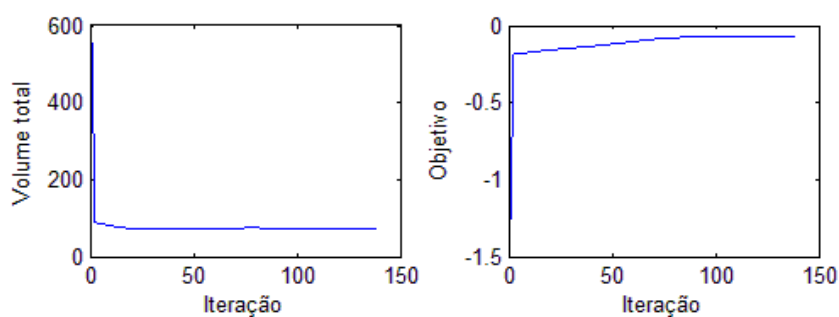


Fig. 7.6 – Curvas de Volume e função objetivo ao longo das iterações.

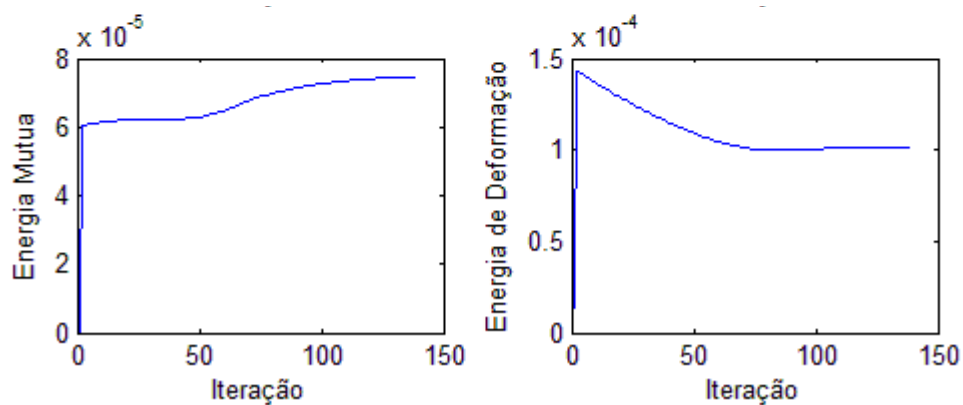


Fig. 7.7 – Curvas de energia mútua e flexibilidade ao longo das iterações.

Com a interpretação da topologia e considerando a simetria, pode-se obter a estrutura completa (figura 7.8).

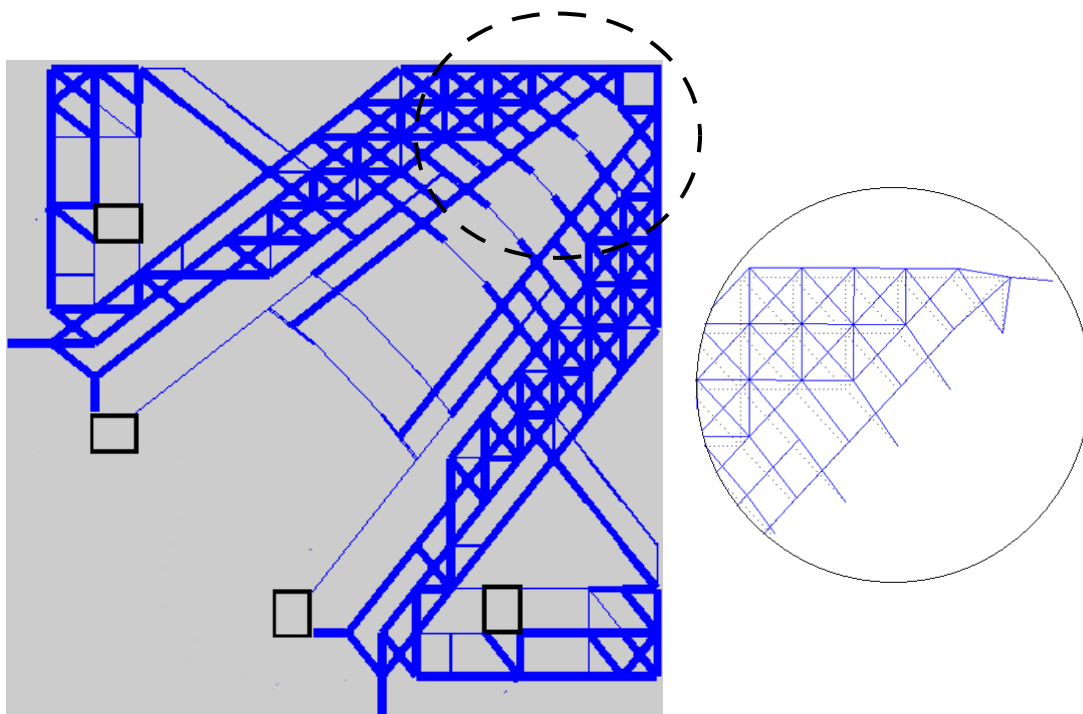


Fig. 7.8 –Microposicionador (esq) e detalhe da simulação em elemento finitos (dir).

Seguindo-se o mesmo procedimento utilizado no caso anterior, foi construída a curva de tensão-deslocamento, que indica o quanto a estrutura se desloca para diferentes níveis de tensão. A figuras 7.9 ilustra os resultados obtidos na simulação.

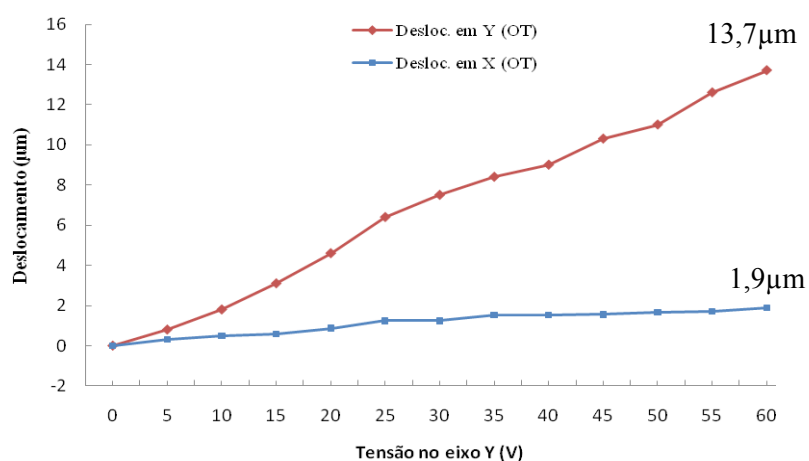


Fig. 7.9 – Deslocamento ao longo de X e Y quando a tensão é aplicada em Y.

O deslocamento máximo obtido na direção da força de atuação foi de $13,7\ \mu\text{m}$ a 60V, valor maior do que na configuração anterior. Porém, na direção perpendicular à força foi observado um deslocamento de $1,9\ \mu\text{m}$, caracterizando o acoplamento entre eixos.

8 – CONCLUSÃO

O aprendizado obtido com a engenharia reversa do protótipo fabricado foi fundamental para o desenvolvimento do modelo otimizado. Conceitos como acoplamento entre os graus de liberdade, atuação eletroestática por pente de capacitores, mecanismos flexíveis e o conhecimento dos processos de fabricação são muito importantes no projeto de plataformas MEMS de posicionamento.

Como forma de comparação dos resultados, foi compilada uma tabela e um gráfico com os dados obtidos nos diferentes esquemas estudados:

Tab.8.1 – Compilação dos resultados (dimensões em μm)

	Voltagem (V)						Média	Desvio Padrão
	10	20	30	40	50	60		
(1) Modelo Computacional	1,5	3,0	5,0	6,4	8,5	11,4		
(2) Protótipo Construído	0,2	0,5	1,5	3,1	3,5	4,8		
(3) Modelo Otimizado	1,8	4,6	7,5	9,0	11,0	13,7		
Diferença (1) - (2)	1,4 (90%)	2,6 (85%)	3,5 (70%)	3,3 (52%)	5 (59%)	6,6 (58%)	3,7 (68%)	1,9 (16%)
Diferença (1) - (3)	0,3 (17%)	1,6 (35%)	2,5 (33%)	2,6 (29%)	2,5 (23%)	2,3 (16%)	2 (25%)	0,9 (8%)

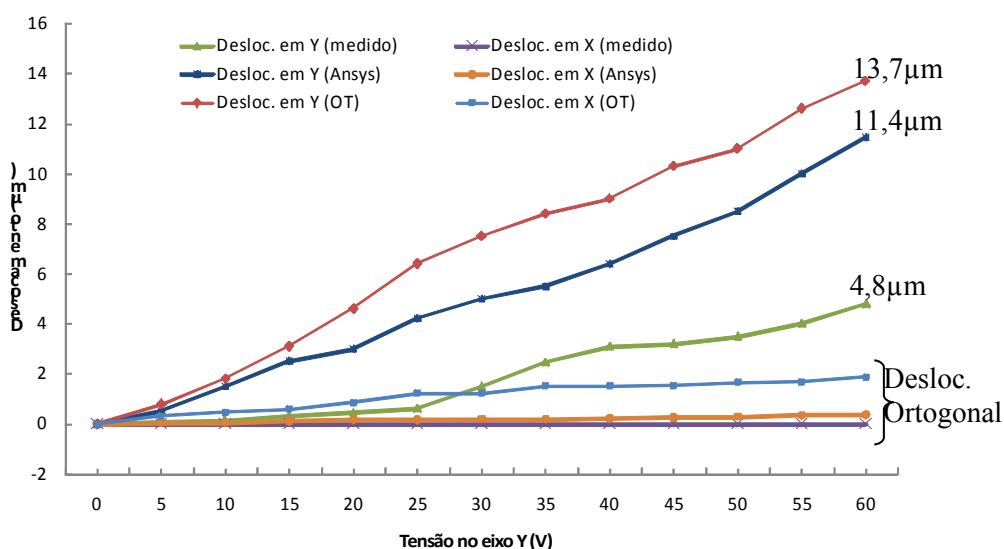


Fig. 8.1 – Comparativo entre os três esquemas estudados.

A discrepância (na média 68%) que foi observada entre (1) e (2) pode ser explicada em partes por imperfeições de fabricação, dado que a rigidez dos mancais flexíveis e das molas que mantêm a estrutura suspensa são sensíveis às suas dimensões. Foi constatado também que alguns dentes do comb-drive estavam

quebrados (cerca de dois por pente), o que pode ter afetado o resultado da caracterização experimental. Além disso, aproximações e simplificações feitas durante a modelagem de elementos finitos podem contribuir para essa diferença.

A versão otimizada apresentou o maior deslocamento (na média 25% maior) mas também um maior acoplamento entre os eixos ortogonais, o que comprova a efetividade do mecanismo de cinemática paralela, solução implementada pela configuração original.

Utilizando uma função objetivo mais complexa, que conseguisse minimizar o deslocamento ortogonal ao desejado, seria possível obter uma configuração com menor acoplamento entre os eixos. Esse é um interessante aprimoramento para o software aqui desenvolvido. Outras possíveis melhorias são a implementação de elementos de viga (em substituição aos elementos de treliça), múltipla flexibilidade, penalização de áreas e restrições de manufatura.

Para aplicações em que uma pequena componente de rotação no plano XY pode ser tolerada, o modelo otimizado (3) é o mais adequado. Caso contrário, deve-se a utilizar a configuração original.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

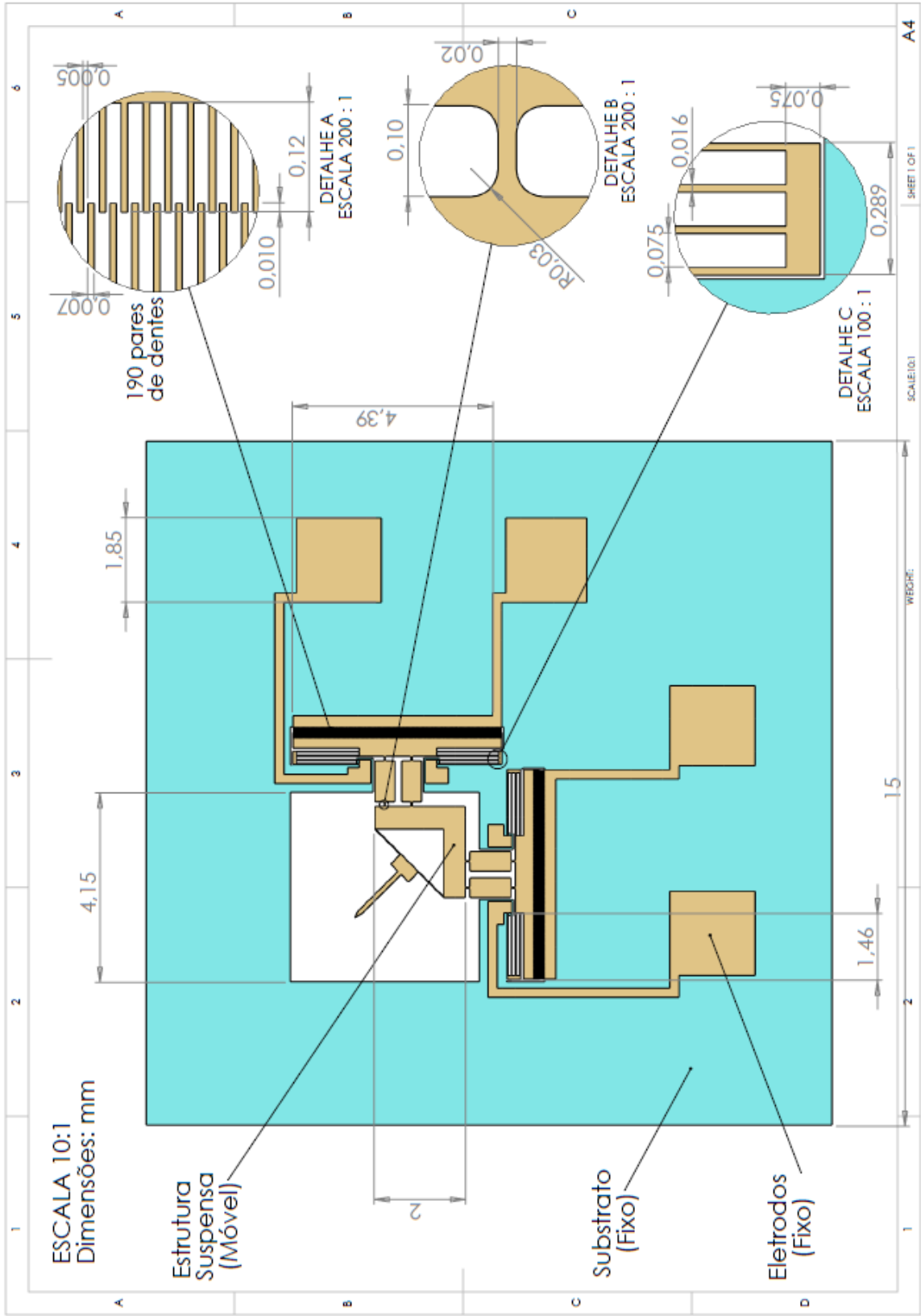
- [1] Feynman, R.P. *Transcripts of Richard Feynman's famous 1959 lecture 'There's Plenty of Room at the Bottom'*. California Institute of Technology, California, 1960.
- [2] Li J., Zhang Q.X., Liu A.Q. *Advanced fiber optical switches using deep RIE (DRIE) fabrication*. Sensors Actuators A 102 286–95, 2003.
- [3] Sun Yu et al. *Bulk microfabricated multi-axis capacitive cellular force sensor using transverse comb drives*. Journal of Micromechanics and Microengineering 12, 2002.
- [4] Indermuhle P.F. et al. *AFM imaging with an xy-micropositioner with integrated tip*. Sensors Actuators A 47 562–65, 1995.
- [5] Kim C-H. et al. *Silicon micro XY-stage with a large area shuttle and no-etching holes for SPM-based data storage*. Journal of Microelectromechanical. Systems 12 470–8, 2003.
- [6] Kim C-H., Kim Y-K. *Integration of a micro lens on a micro XY-stage*. Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng., 1999.
- [7] Carvalho, S.T. *Projeto, fabricação e caracterização experimental de nanoposicionadores XYθz piezelétrico*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [8] Yigui L., Minoru S., Kazuhiro H. *A two-dimensional self-aligning system driven by shape memory alloy actuators*. Opt. Laser Technol, 2005.
- [9] Choi J-J. et al. *Electromagnetic micro x-y stage with very thick Cu coil for probe-based mass data storage device*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001
- [10] Honda, F., Nishitani, W.S. *Simulação, Fabricação e Comando de MEMS Eletrotermomecânicos*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [11] Douglass, M.R. *DMD reliability: a MEMS success story*. Texas Instruments.
- [12] Cunningham, B. et al. *Design, fabrication and vapor characterization of a microfabricated flexural plate resonator sensor and application to integrated sensor arrays*. Sensors and Actuators, B: Chemical, v 73, n 2-3, p 112-123.

- [13] Scheible, J.P. *A Survey of Storage Options*. Computer, v 35, n 12, p 42-46, Dezembro, 2002.
- [14] James, D. *HP optimizes low-cost processing for inkjet printheads*. The international magazine for semiconductor manufacturing, 2008.
- [15] Madou, Marc J. *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*. CRC Press, 2nd edition.
- [16] Lai, Bo-Kuai et al. *A comparison of PZT-based and TiNi shape memory alloy-based MEMS microactuators*. Ferroelectrics, v 306, p 221-226, Janeiro, 2004.
- [17] Feldmann, M., Waldschik, A., Büttgenbach, S. *Electromagnetic micro actuators, micro motors and micro robots*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v 6798, 2008.
- [18] Liu, Chang. *Foundations of MEMS (Illinois ECE Series)*. Prentice Hall, US edition, 2005.
- [19] Jafari, R., Kirk, A.G. *Comparison of three ANSYS finite element tools for analysis of MEMS micromirrors*. Outubro, 2007.
- [20] Ostergaard, D, Gyimesi, M. *Electro-Mechanical Transducer for MEMS Analysis in ANSYS*.
- [21] ANSYS Release 11 Tutorials and Documentation.
- [22] MEMS Exchange Guide to MEMS processing:
<http://www.memsnet.org/mems/processes/>
- [23] Kota, S., Hetrick, J., Saggere, L. *Tailoring Unconventional Actuators Using Compliant Transmissions: Design Methods and Applications*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 4, no. 4, pp. 396-408, 1999.
- [24] Rubio, Wilfredo M. et al. *Topology Optimized Design, Microfabrication and Characterization of Electro-Thermally Driven Microgripper*. Journal of intelligent materials systems and structures, v 20, p 669-681, April, 2009.
- [25] Frecker, M.; Kikuchi, N.; Kota, S. *Optimal synthesis of compliant mechanisms to satisfy kinematic and structural requirements – Preliminary results*. Proceeding of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering, 1996.

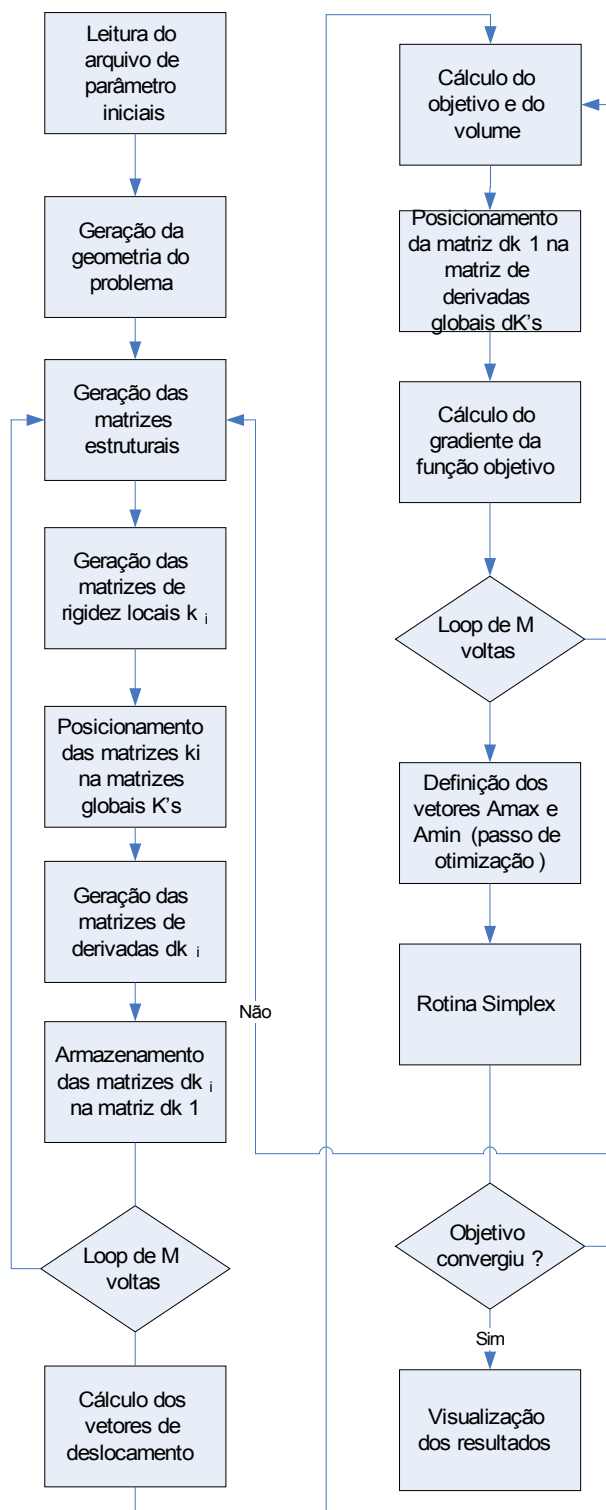
- [26] Lima, Cícero Ribeiro. *Projeto de mecanismos flexíveis usando o método de otimização topológica*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [27] Machiaverni, R.M.; *Desenvolvimento de software para síntese de mecanismos flexíveis usando o método de Otimização Topológica*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [28] Cook, R.D., Young, W.C. *Advanced Mechanics of Materials*. Macmillan, New York, 1985.
- [29] Press, W. et al. *Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing*, pp. 430-444. Cambridge University Press, 1999.
- [30] Dong, Jingyan; Mukhopadhyay, Deepkishore; Ferreira, Placid M. *Design, fabrication and testing of a silicon-on-insulator (SOI) MEMS parallel kinematics XY stage*. Journal of Micromechanics and Microengineering, v 17, n 6, p 1154-1161, June 1, 2007.
- [31] Yangmin, L; Qingsong, X. *A novel design and analysis of a 2-DOF compliant parallel micromanipulator for nano manipulation*. IEEE Trans. Autom. Sci. Eng. 3 248–53, 2006.
- [32] Yao, Qing; Dong Jingyan; Ferreira, Placid M. *Design, analysis, fabrication and testing of a parallel-kinematic micropositioning XY stage*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v 47, n 6, p 946-961, May 2007.
- [33] Legtenberg R., Groeneveld A.W., Elwenspoek M. *Comb-drive actuators for large displacements*. Journal of Micromechanics and Microengineering 6, 1996.

10 – ANEXOS

Anexo A – Desenho Técnico do MEMS



Anexo B – Fluxograma de funcionamento do software de otimização topológica



Anexo C – Relação dos parâmetros iniciais

O arquivo de condições iniciais carrega as informações necessárias para a definição do problema. Esses dados são utilizados na construção das matrizes fixas e das matrizes do processo iterativo.

1. Comprimento da base do domínio regular (b);
2. Altura do domínio regular (h);
3. Volume máximo permitido (V_{max});
4. Área transversal mínima global (A_{min});
5. Área transversal máxima global (A_{max});
6. Número de iterações máximo (it);
7. Número de nós fixos em x e y, ou seja, apoios articulados (nfixedxy);
8. Vetor com o número dos nós fixos em x e y (vetor **fixedxy**);
9. Número de nós fixos somente em x (nfixedx);
10. Vetor com o número dos nós fixos somente em x (vetor **fixedx**);
11. Número de nós fixos somente em y (nfixedy);
12. Vetor com o número dos nós fixos somente em y (vetor **fixedy**);
13. Número de forças aplicadas na estrutura (nload);
14. Vetor com o número dos nós onde são aplicadas as forças (vetor **locfa**);
15. Matriz com o valor das forças aplicadas (em x e em y) em cada nó correspondente ao vetor **locfa** (vetor **f**);
16. Número de deslocamentos desejados na estrutura (ndesloc);
17. Vetor com o número dos nós onde são desejados os deslocamentos (vetor **locdes**);
18. Matriz com o valor dos deslocamentos desejados (em x e em y) em cada nó correspondente ao vetor **locdes** (vetor **u**);
19. Valor do módulo de Young do material das barras de treliças (E);
20. Valor inicial para o valor das áreas transversais (A_0).

Anexo D – Código do software de otimização implementado em Matlab

11 – BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- [1] Perrud, A.M., Silva, M.M.R. *Estudo e desenvolvimento de bisturi piezelétrico*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [2] Lambrecht, A., Cunha, I.F.C. *Simulação, fabricação e comando de um micromanipulador piezelétrico XY*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [3] Kovacs, G.T. *Micromachined Transducers Sourcebook*. McGraw-Hill, 1st edition, 1998.
- [4] Gyimesi, M., Ostergaard, D. *Triangle Transducer for Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Simulation in ANSYS Finite Element Program*.
- [5] Gyimesi, M., Ostergaard, D. *Electro-Mechanical Transducer for MEMS Analysis in ANSYS*.
- [6] Moussa, W.A. et al. *Investigating the reliability of electrostatic comb-drive actuators used in microfluidic and space systems using finite element analysis*. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, v 27, n 4, p 195-200, Outubro 2002.
- [7] Yin, S., Zhang, Y.K., Zhou, J. *Modeling and simulation of silicon micromechanical electrostatic comb-drive resonator*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v 6149, 2006.
- [8] Anner, G.E. *Planar Processing Primer*. Van Nostrand Reinhold Company.
- [9] Yao, Qing; Dong, Jingyan; Ferreira, Placid M. *A novel parallel-kinematics mechanism for integrated, multi-axis nanopositioning. Part 1: Kinematics and design for fabrication*. Precision Engineering, v 32, n 1, p 7-19, January 2008.
- [10] Dong, Jingyan; Yao, Qing; Ferreira, Placid M. *A novel parallel-kinematics mechanism for integrated, multi-axis nanopositioning. Part 2: Dynamics, control and performance analysis*. Precision Engineering, v 32, n 1, p 20-33, January 2008.
- [11] Mukhopadhyay, Deepkishore. *Array-based direct writing of micro/nano scale structures*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 2008.