



**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação**

**Departamento de Semicondutores, Instrumentos e
Fotônica**

**SENSOR DE PRESSÃO MICROELETRÔNICO BASEADO NO
EFEITO PIEZORESISTIVO TRANSVERSAL EM SILÍCIO**

Candidato: Guilherme de Oliveira Coraucci
Orientador: Prof. Dr. Fabiano Fruett

Tese de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Fabiano Fruett
DSIF – Departamento de Semicondutores, Instrumentação e Fotônica
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP

Prof. Dr. Marcelo Nelson Paez Carreño
PSI – Engenharia de Sistemas Eletrônicos
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI/USP

Prof. Dr. Antônio Augusto Fasolo Quevedo
DEB – Departamento de Engenharia Biomédica
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP

Campinas – SP Brasil, 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

C810s Coraucci, Guilherme de Oliveira
Sensor de pressão microeletrônico baseado no efeito
piezoresistivo transversal em silício / Guilherme de
Oliveira Coraucci. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Fabiano Fruett.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Transdutores de pressão. 2. Microeletronica. 3.
Circuitos integrados. 4. Sensor de pressão. I. Fruett,
Fabiano. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
Título.

Título em Inglês: Microelectronic pressure sensor based on the transversal
piezoresistive effect in silicon

Palavras-chave em Inglês: Pressure transducers, Microelectronics,
Integrated circuits, Pressure sensors

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Marcelo Nelson Paez Carreño, Antônio Augusto
Fasolo Quevedo

Data da defesa: 10/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

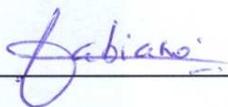
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Guilherme de Oliveira Coraucci

Data da Defesa: 10 de dezembro de 2008

Título da Tese: "Sensor de Pressão Microeletrônico Baseado no Efeito Piezoresistivo Transversal em Silício"

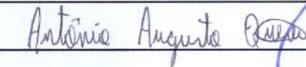
Prof. Dr. Fabiano Fruett (Presidente):



Prof. Dr. Marcelo Nelson Paez Carreño:



Prof. Dr. Antônio Augusto Fasolo Quevedo:



AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me auxiliaram na realização deste trabalho; de uma maneira especial, ao meu orientador Prof. Dr. Fabiano Fruett pelo apoio e incentivo.

Este trabalho não poderia ter sido realizado sem o auxílio e colaboração das seguintes instituições e de seus respectivos alunos, funcionários e pesquisadores:

- Centro de Componentes Semicondutores (CCS), da UNICAMP;
- Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, da UNICAMP;
- Centro de Tecnologia da Informação - CTI (antigo Centro de Pesquisas Renato Acher – CenPRA);
- CAPES;
- FAPESP;
- Laboratório de Microeletrônica (LMI), da USP-SP.

Agradeço ainda, de forma especial, as seguintes pessoas:

- Dr. Angelo Gobbi do LMF/LNLS;
- Alexandre Lopes do LME da Poli/USP;
- Grupo de Pesquisa do LSM/Unicamp;
- José Godoy Filho do CCS/Unicamp;
- Márcia Rautemberg Finardi do CCS/Unicamp;
- Rafael Vitor Degani de Oliveira;
- E todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos meus pais, irmãos, familiares e namorada que estiveram ao meu lado durante este período de realizações e conquistas.

Dedico este trabalho
ao meu pai, Bruno;
à minha mãe, Ângela;
aos meus irmãos Bruno,
André e Maria Virgínia;
à minha
namorada,
Josiane.

RESUMO

Apresentamos neste trabalho um sensor de pressão piezorresistivo de multiterminais totalmente compatível com o processo de fabricação CMOS, constituído de um piezoelemento sensível ao estresse mecânico disposto sobre uma membrana microfabricada. O layout deste piezoelemento permite maximizar o efeito do estresse mecânico sobre a deflexão das equipotenciais distribuídas sobre sua região ativa. Utilizamos a análise baseada no Método de Elementos Finitos no projeto da membrana, bem como na definição da disposição dos piezoelementos sobre a mesma. O sensor foi fabricado em duas tecnologias diferentes: CMOS 0,3 μm MAS (Austria Mikro Systeme International) - disponibilizado pelo Projeto Multi-Usuário PMU-FAPESP - e CCS/Unicamp (Centro de Componentes Semicondutores da Unicamp). Realizamos a membrana, no sensor fabricado na tecnologia AMS, através de um processo de desbaste mecânico da pastilha de silício. Já para o sensor fabricado na tecnologia do CCS/Unicamp, utilizamos um aparato de corrosão química (solução de KOH) para corrosão anisotrópica do silício monocristalino e, desta forma, obtivemos uma membrana com maior qualidade. Realizamos o estudo, analítico e numérico, da dependência da tensão de saída do piezoelemento de multiterminais com relação ao estresse mecânico. Os sensores fabricados apresentaram sensibilidade proporcional ao número de contatos-corrente de entrada e pouca dependência desta sensibilidade com sua geometria para uma grande faixa de variação de suas dimensões. Na tecnologia AMS, o sensor apresentou uma sensibilidade de 0,24 mV/psi e na tecnologia CCS/Unicamp 4,8 mV/psi com linearidade máxima de aproximadamente 5,6% FSO.

ABSTRACT

This work describes a CMOS-Compatible multiterminal piezoresistive pressure sensor based on the transversal piezoresistive effect, which consists of a piezotransducer fabricated on a membrane. The layout of this piezoelement is designed in such a way that its sensitivity is improved by maximizing the effect of the mechanical stress over the equipotential lines distribution in its active region. We performed Element Finite analyses in both membrane and piezoelement designs. The sensor was fabricated using two different technologies: CMOS 0,35 μm AMS process (Austria Mikro Systeme International) - supported by the Fapesp Multi-User Project - and CCS/Unicamp process (Center for Semiconductor Components). In the AMS process, we realized a diaphragm by reducing the thickness of the die through a mechanical polishing process. In the sensor fabricated at CCS/Unicamp process, a backside bulk micro-machining was performed by using an automated KOH chemical etching apparatus, which provides a well-controlled anisotropic etching process. The sensor sensitivity is proportional to the number of input current terminals. The sensor sensitivity dependence related to its geometry is minimized even for a wide range of the sensor layout's aspect-ratio. In the AMS process, sensor's sensitivity amounted to 0.24 mV/psi and in the CCS/Unicamp process the sensitivity amounted to 4,8 mV/psi with a maximum linearity of about 5,6% FSO.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS.....	xxv
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos e Motivação.....	2
1.2. Organização da Tese.....	3
CAPÍTULO 2.....	7
2. Medida de Pressão.....	7
2.1. Histórico.....	7
2.2. Definição.....	8
2.3. Referência e Medidas Associadas à Pressão.....	8
2.4. Padrões de Pressão.....	9
2.4.1. <i>Gauges</i> de Peso Morto.....	9
2.4.2. Manômetro.....	9
2.4.3. Barômetro.....	9
2.4.4. Tubo de Bourdon.....	10
2.4.5. Sensores de Vácuo.....	10
2.5. Sensores de Pressão.....	10
2.5.1. Sensores Piezorresistivos.....	12
2.5.2. Sensores Piezoelétricos.....	13
2.5.3. Sensores Capacitivos.....	13

2.5.4.	Sensores Ópticos.....	15
2.5.5.	Sensores Ressonantes.....	16
2.6.	Especificações de Sensores.....	18
2.6.1.	Função de Transferência.....	18
2.6.2.	<i>Offset</i>	18
2.6.3.	Fundo de Escala e Fundo de Escala de Saída.....	18
2.6.4.	Faixa Dinâmica ou Faixa de Medida.....	19
2.6.5.	Não-Linearidade.....	19
2.6.6.	Histerese.....	20
2.6.7.	Repetibilidade.....	20
2.6.8.	Sensibilidade.....	20
2.6.9.	Resolução.....	20
2.6.10.	Seletividade.....	21
CAPÍTULO 3		23
3.	Teoria Mecânica.....	23
3.1.	Tensor.....	24
3.2.	Teoria de Elasticidade.....	26
3.2.1.	Tensor de Deformação.....	27
3.2.2.	Tensor de Estresse.....	29
3.2.2.1.	Notação e Componentes de Estresse.....	30
3.2.3.	Lei de Hooke.....	32
3.2.4.	Teoria de Elasticidade Aplicada ao Silício.....	34
CAPÍTULO 4.....		41
4.	Piezoeletrônicos e o Efeito Piezoresistivo Transversal em Silício.....	41
4.1.	Breve Introdução aos Piezoeletrônicos em Silício.....	41
4.1.1.	O Efeito de Piezojunção.....	41
4.1.2.	O Efeito Piezorresistivo.....	42

4.1.3.	O Efeito Piezo-MOS.....	42
4.1.4.	O Efeito de Piezotunelamento.....	43
4.1.5.	O Efeito Piezo-Hall.....	43
4.2.	Estudo Analítico do Efeito Piezo-Hall.....	44
4.2.1.A	Placa Hall.....	44
4.3.	Estudo Analítico do Efeito Piezorresistivo.....	47
4.3.1.	Efeito Piezorresistivo Anisotrópico em Silício.....	49
4.3.2.	Considerações para os Coeficientes Piezorresistivos em Função de qualquer Orientação Cristalográfica.....	51
4.4.	Aspecto Físico do Efeito Piezorresistivo.....	53
4.5.	Efeito Piezorresistivo Transversal.....	55
4.5.1.	Revisão de Conceitos sobre Linhas de Corrente e Linhas Equipotenciais para um Material com Condutividade Isotrópica.....	55
4.5.2.	Efeito Piezorresistivo Transversal em Silício.....	60
CAPÍTULO 5.....	63	
5.	Estudo Analítico dos Sensores de Pressão baseados no Efeito Piezoresistivo Transversal em Silício.....	63
5.1.	Condições de Contorno.....	65
5.2.	Estudo Analítico de um FTPS.....	66
5.3.	Estudo Analítico de um MTPS.....	77
5.4.	Estudo Analítico das Sensibilidades do FTPS e do MTPS.....	81
5.5.	Estudo Analítico do Consumo de Potência de um FTPS e de um MTPS.....	82
CAPÍTULO 6.....	87	
6.	Análise Numérica dos Piezoelementos.....	87
6.1.	Método dos Elementos Finitos (FEM).....	88
6.2.	O Programa Ansys®.....	88
6.3.	Simulação da Membrana.....	90

6.3.1.	Membrana Quadrada.....	90
6.3.2.	Construção do Modelo da Membrana em Elementos Finitos, Condições de Contorno e de Aplicação de Carga.....	92
6.3.3.	Resultados FEM para a Membrana Quadrada.....	92
6.4.	Simulação dos Piezoelementos.....	93
6.4.1.	Construção do Modelo dos Sensores em Elementos Finitos.....	94
6.4.2.	Condições de Contorno e Aplicação de Cargas.....	96
6.4.3.	Resultados FEM para os Piezoelementos.....	98
6.4.3.1.	Localização dos Contatos-sensor em um FTPS.....	98
6.4.3.2.	FTPS em Terminais de Contatos-sensor.....	100
6.4.3.3.	FTPS com Terminais de Contatos-sensor.....	104
6.4.3.4.	A Cruz Grega.....	108
6.4.3.5.	FTPS Modificado.....	111
6.4.3.6.	MTPS com 4 Terminais de Contatos-corrente de Entrada	115
6.4.4.	Análise da Resistência de Entrada das Topologias em Estudo	120
CAPÍTULO 7.....		123
7.	Resultados Experimentais.....	123
7.1.	Fabricação dos Sensores de Pressão.....	123
7.1.1.	Tecnologia AMS.....	125
7.1.1.1.	Circuito de Condicionamento.....	126
7.1.1.2.	Projeto e Confecção do <i>Layout</i> dos Piezoelementos e de seus Circuitos de Condicionamento.....	131
7.1.2.	Tecnologia CCS/Unicamp.....	135
7.1.2.1.	Circuito de Condicionamento.....	136
7.1.2.2.	Projeto e Confecção do <i>Layout</i> dos Piezoelementos e de seus Circuitos de Condicionamento.....	138
7.2.	Aparatos para Fabricação de MEMS e para Teste Mecânicos dos	

Sensores de Pressão	140
7.2.1. Aparatos para Fabricação de MEMS.....	140
7.2.1.1.Aparato de Desbaste Mecânico.....	141
7.2.1.2.Aparato de Corrosão Química.....	142
7.2.2. Aparato de Teste Mecânico.....	144
7.3. Encapsulamento.....	145
7.4. Resultados.....	146
7.4.1. Fabricação da Membrana do Sensor de Pressão.....	147
7.4.1.1. <i>Chip</i> Fabricado na AMS.....	147
7.4.1.2. <i>Chip</i> Fabricado no CCS/Unicamp.....	147
7.4.2. Caracterização dos Sensores de Pressão.....	148
7.4.2.1. Resistência de Folha usando o Método de Van Der Pauw	148
7.4.2.2. Caracterização do Sensor Fabricado na AMS.....	150
7.4.2.3. Caracterização do Sensor Fabricado no CCS/Unicamp.....	152
CAPÍTULO 8.....	157
8.Conclusão.....	157
APÊNDICE A – Transformação de Coordenadas.....	161
APÊNDICE B – Programa de Simulação em Ansys®.....	163
APÊNDICE C – Processo de Fabricação.....	171
APÊNDICE D – Aparatos de Corrosão Química e de Teste Mecânico..	211
APÊNDICE E – Método de Van Der Pauwn.....	215
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	217

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
A	Área	m ²
a _{αβ}	Conjunto de elementos de um tensor	-
\vec{B}	Campo Magnético	T
C	Capacitância	F
C _{ijkl}	Coefficientes de Elasticidade	Pa
d	Distância de Separação dos Eletrodos	m
D	Parâmetros D's	-
E	Módulo de Young	Pa
\vec{E}	Vetor Campo Elétrico	V/m
F	Força	N/m ²
F _G	Fator Gauge	-
G	Módulo de Rigidez	Pa
G	Fator de Correção Geométrico	-
I	Corrente elétrica	A
\vec{J}	Densidade de Corrente	A/m ²
κ	Condutividade do Material	Ω ⁻¹
L	Comprimento	m
N	Número de Terminais de Contatos-corrente de Entrada de um MTPS	-
P	Pressão	Pa, psi
P	Potência Consumida	W
q, q ₀	Cargas Elétricas	C
R	Resistência	Ω
r	Distância entre as cargas elétricas	m
r _s	Resistência de Folha	Ω/□
S	Sensibilidade Absoluta	V/Pa

S_{ij}	Coeficientes Independentes de Elasticidade	Pa
t	Profundidade de Junção	m
T_i	Tensores de Estresse	Pa
U_α	Tensor	-
V	Tensão	V
\vec{W}	Vetor Trabalho	N/m
α	Matriz Transformação	-
γ_{ij}	Deformação Tangencial	-
ϵ_{ij}	Tensor Deformação	-
μ	Mobilidade do Portador	m^2 (N-s)
μ_i	Vetores Deslocamento i 's	m
π	Coeficiente de Piezoresistência	Pa^{-1}
π	Constante 3,14159	-
ρ_0	Resistividade do Material não Estressado	Ω m
ρ_{ij}	Tensor Resistividade	Ω m
σ_{ij}	Tensores de Estresse Normal	Pa
τ_{ij}	Tensores de Estresse Tangencial	Pa
ϵ_0	Permissividade do Vácuo	Fm^{-1}
ϵ_r	Permissividade do Material	Fm^{-1}
Θ_H	Ângulo Hall	$^\circ$
β	Ângulo análogo-mecânico ao ângulo Hall	$^\circ$
ϕ, θ, ψ	Ângulos de Euler	$^\circ$
ν	Relação de Poisson	-

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1:	Unidades de pressão e fatores de conversão para Pa.	8
Tabela 2.2:	Comparação das características dos sensores de pressão do tipo ressonante, piezorresistivo e capacitivo.	18
Tabela 3.1:	Notação do conjunto de elementos de um tensor para diferentes ordens de tensores.	26
Tabela 3.2:	Simplificação de Índices.	33
Tabela 3.3:	Convenção de Miller.	35
Tabela 3.4:	Magnitudes dos coeficientes C_{ij} e S_{ij} para o silício.	36
Tabela 3.5:	Propriedades físicas do silício.	39
Tabela 3.6:	Cálculo dos coeficientes de elasticidade para uma coordenada arbitrária.	39
Tabela 4.1:	Simplificação dos coeficientes piezorresistivos de primeira ordem para a estrutura cristalográfica de silício.	49
Tabela 4.2:	Magnitudes dos coeficientes piezorresistivos em temperatura ambiente para silício tipo p e n.	50
Tabela 5.1:	Simplificações para as mudanças de resistividade relativa de um FTPS de acordo com tipo de silício de sua região de espalhamento de corrente.	73
Tabela 5.2:	Tensões de saída para FTPSs fabricados em silício tipo-n e tipo-p.	73
Tabela 6.1:	Parâmetros geométricos (P_G) das topologias em estudo para G maximizado.	121
Tabela 6.2:	Parâmetro D das topologias em estudo para G maximizado.	121
Tabela 6.3:	Resistência de entrada das topologias em estudo para G maximizado.	122
Tabela 7.1:	As topologias e as dimensões dos piezoelementos fabricados na AMS.	126

Tabela 7.2:	Valores das resistências usados para simulação e teste do circuito de condicionamento dos sensores fabricados na tecnologia AMS.	130
Tabela 7.3:	As topologias e as dimensões dos piezoelementos fabricados no CCS/Unicamp.	136
Tabela 7.4:	Valores experimentais das tensões e correntes do método de Van Der Pauw e da resistência de folha obtida numericamente para a topologia de Cruz Grega e FTSP Modificado do processo CCS/Unicamp.	149
Tabela 7.5:	Intensidade de estresse ($\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$) na região de máximo estresse de uma membrana quadrada, e tensão de saída de uma Cruz Grega e de um 4-MTPS para uma variação de pressão de 0 – 11 psi.	150
Tabela 7.6:	Resumo das características experimentais dos sensores de pressão.	155
Tabela 7.7	Característica do sensor de pressão da Motorola® da série MPX50	156
Tabela 8.1:	Resumo das características experimentais dos sensores de pressão.	159
Tabela A1:	Equações de transformação de tensores em um sistema de coordenada arbitrária	162
Tabela C1:	Dimensões e topologias escolhidas dos piezoelementos para fabricação do sensor no CCS/Unicamp.	172
Tabela C2:	Níveis de máscaras usadas para fabricação do sensor de pressão no CCS/Unicamp.	173
Tabela C3:	Deformação das regiões do piezorresistor devido à baixa resolução das máscaras feitas na fotorredutora.	175
Tabela C4:	Características das lâminas de silício utilizadas no processo de fabricação do sensor de pressão no CCS/Unicamp.	178
Tabela C5:	Processo de Oxidação Úmida.	179
Tabela C6:	Processo de Recozimento e Oxidação Úmida.	185
Tabela C7:	Processo de Recozimento e Oxidação Seca.	188
Tabela C8:	Rompimentos de trilhas devido a sujeiras metalizadas.	204

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1:	Tipos de Medidas de Pressão.	9
Figura 2.2:	Diagrama de Blocos de um Sensor de Pressão.	11
Figura 2.3:	Membrana dos sensores de pressão do tipo: a) Resistores difundidos em forma de Ponte de Wheatstone e b) FTPSs.	13
Figura 2.4:	Exemplos de sensores de deslocamento capacitivos simples: a) distância variável, b) área variável e c) permissividade variável.	14
Figura 2.5:	Exemplo de um sensor de pressão capacitivo.	15
Figura 2.6:	Exemplo de um sensor de pressão ótico.	16
Figura 2.7:	Exemplo de um sensor de pressão ressonante da STL.	17
Figura 2.8:	Exemplificação gráfica para os conceitos de fundo de escala de saída, fundo de escala, função de transferência, faixa dinâmica e <i>offset</i> .	19
Figura 2.9:	Exemplificação gráfica do conceito de histerese.	20
Figura 3.1:	Representação gráfica de um vetor em um sistema de coordenadas.	25
Figura 3.2:	Tensor de deformação: extensão de um elemento de linha infinitesimal.	27
Figura 3.3:	Tipos de deformações: a) normal e b) tangencial unitária.	29
Figura 3.4:	Definição de estresse. Força F atuando em uma área A . As forças F_n e F_t são as componentes normal e tangencial da força F , respectivamente.	30
Figura 3.5:	Notação e componentes de estresses normais e tangenciais em um elemento cúbico infinitesimal.	31
Figura 3.6:	Células unitárias: a) célula unitária de um cristal de face-centrada e b) célula unitária de silício com átomos nas coordenadas $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$.	35
Figura 3.7:	Planos de simetria do silício e suas direções.	36

Figura 3.8:	Relação de Poisson: Deformação de um material elástico.	37
Figura 4.1:	Placa Hall retangular.	45
Figura 4.2:	Dimensões de um condutor retangular.	47
Figura 4.3:	Definição dos ângulos de Euler: ϕ , θ e ψ .	51
Figura 4.4:	Representação gráfica no espaço-k para: a) o modelo de vales múltiplos e b) 2 vales de silício tipo-n alinhados com os eixos [100].	54
Figura 4.5:	Representação de uma região de campo elétrico.	55
Figura 4.6:	Representação de linhas de força e de linhas equipotenciais para: a) uma carga puntiforme e b) um campo elétrico uniforme.	58
Figura 4.7:	Condutor com condutividade isotrópica: a) Comportamento das linhas equipotenciais e linhas de densidade de corrente e b) Comportamento do campo elétrico no centro do condutor.	60
Figura 4.8:	Condutor com condutividade anisotrópica: a) Comportamento das linhas de densidade de corrente e linhas equipotenciais e b) Comportamento do campo elétrico no centro do condutor.	61
Figura 5.1:	Topologias da REC para um FTPS.	64
Figura 5.2:	Efeito de curto-circuito em condutores devido a contatos-sensor não pontuais: a) Curto-circuito das linhas de densidade de corrente e b) Alinhamento das linhas equipotenciais.	66
Figura 5.3:	a) <i>Layout</i> de um FTPS e b) Decomposição do vetor campo elétrico no centro da REC do FTPS estressado mecanicamente.	67
Figura 5.4:	FTPS com uma topologia retangular modificada.	77
Figura 5.5:	Circuitos elétricos equivalentes para um FTPS: a) Circuito elétrico equivalente para a resistência de saída, b) Circuito elétrico equivalente para a resistência de entrada e c) Circuito elétrico equivalente em Ponte de Wheatstone.	78
Figura 5.6:	a) <i>Layout</i> do MTPS e b) Circuito elétrico equivalente do MTPS.	79
Figura 5.7:	a) <i>Layout</i> do N-MTPS e b) Circuito elétrico equivalente do N-MTPS.	80

Figura 5.8:	Circuito elétrico equivalente das resistências de entrada para um: a) FTSP e b) MTPS.	83
Figura 6.1:	Tipos de análises multifísicas em Ansys®.	89
Figura 6.2:	Definição dos parâmetros geométricos de uma membrana quadrada.	91
Figura 6.3:	Condição de contorno e de aplicação de cargas da membrana quadrada.	92
Figura 6.4:	Resultado do FEM para a membrana quadrada: a) Regiões de concentração de estresse e b) Magnitude do estresse σ_{xx} e σ_{yy} ao longo da membrana.	93
Figura 6.5:	Topologias dos piezoelementos para análise de elementos finitos.	94
Figura 6.6:	Orientação do piezoelemento em relação ao estresse aplicado.	95
Figura 6.7:	Geometria do elemento finito: PLANE183 e PLANE223.	96
Figura 6.8:	Representação do piezoelemento, da membrana em elementos finitos e suas condições de contorno e de carga.	97
Figura 6.9:	Localização dos contatos-sensor no FTSP: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.	98
Figura 6.10:	Resultados da localização dos contatos-sensor em um FTSP sem terminais.	99
Figura 6.11:	FTSP sem terminais de contatos-sensor: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.	100
Figura 6.12:	Resultado da influência de L/W de um FTSP sem terminais de contatos-sensor.	101
Figura 6.13:	Resultado da influência de S/W de um FTSP sem terminais de contatos-sensor.	102
Figura 6.14:	Resultado da influência de W/L e S/L de um FTSP sem terminais de contatos-sensor: a) Resultados numéricos e b) Comparação entre resultados numéricos e analíticos.	103
Figura 6.15:	Resultado FEM do FTSP sem terminais de contatos-sensor: a) Fluxo de densidade de corrente e b) Distribuição de potencial.	104
Figura 6.16:	FTSP com terminais de contatos-sensor: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.	105

Figura 6.17:	Influência dos terminais de contatos-sensor no FTPS.	106
Figura 6.18:	Fator de correção geométrico do FTPS com terminais de contatos-sensor.	107
Figura 6.19:	Distribuição de potencial, através de elementos finitos, do FTPS com terminais de contatos-sensor.	108
Figura 6.20:	FTPS em forma de Cruz Grega: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.	109
Figura 6.21:	Fator G do FTPS em forma de Cruz Grega.	110
Figura 6.22:	Distribuição de potencial, através de elementos finitos, do FTPS em forma de Cruz Grega.	111
Figura 6.23:	FTPS Modificado: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.	112
Figura 6.24:	Fator G numérico de um FTPS Modificado para uma variação de l_F/w_F de 0,01 a 2.	113
Figura 6.25:	Fator G numérico de um FTPS Modificado para $l_F / w_F \geq 1$.	114
Figura 6.26:	Distribuição de potencial, através de elementos finitos, do FTPS Modificado.	115
Figura 6.27:	MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.	115
Figura 6.28:	Fator G numérico do MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada para uma variação de l_M/w_M de 0,01 a 2.	116
Figura 6.29:	Fator G numérico do MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada para $l_M / w_M \geq 1$.	117
Figura 6.30:	Comparação entre o fator de G numérico e analítico do MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada.	118
Figura 6.31:	Distribuição de potencial, através de elementos finitos, do 4-MTPS.	119
Figura 6.32:	Distribuição do campo elétrico ao longo da distância entre os contatos-sensor no centro do piezoelemento.	119

Figura 7.1:	Diagrama de blocos dos circuitos periféricos aos sensores de pressão.	124
Figura 7.2:	Lâminas de silício (100) tipo-n e tipo-p e seus eixos cristalográficos.	125
Figura 7.3:	Circuitos de condicionamento e polarização para os piezoelementos fabricados na AMS: a) para piezoelementos de 4 terminais e b) para piezoelementos de multiterminais.	127
Figura 7.4:	Níveis de corrente e tensão nos principais pontos do circuito de condicionamento dos sensores fabricados na tecnologia AMS.	129
Figura 7.5:	Circuito para teste da linearidade do circuito de condicionamento dos piezoelementos fabricados na tecnologia AMS com Pontes de Wheatstone representando um 4-MTPS.	130
Figura 7.6:	Resultado da simulação do circuito de condicionamento dos piezoelementos fabricados na AMS com Pontes de Wheatstone representando os piezoelementos.	131
Figura 7.7:	Disposição dos piezoelementos e dos circuitos de condicionamento no processo da AMS.	132
Figura 7.8:	<i>Layout</i> do circuito de polarização ramificado utilizando a tecnologia de 0,35 μm 5V da AMS.	133
Figura 7.9:	<i>Layout</i> dos piezoelementos no processo de fabricação da AMS.	134
Figura 7.10:	Seção transversal dos piezoelementos fabricado na AMS.	134
Figura 7.11:	<i>Layout</i> do <i>chip</i> fabricado na tecnologia AMS.	135
Figura 7.12:	Circuito de condicionamento discreto para o sensor de pressão fabricado no CCS/Unicamp: a) Para piezoelementos do tipo 4-terminais e b) Para piezoelementos do tipo multi-terminais.	137
Figura 7.13:	Esquemático do <i>chip</i> fabricado no CCS/Unicamp: a) Localização dos piezoelementos e da região da membrana quadrada no chip do processo de fabricação do CCS/Unicamp e b) Seção transversal dos piezoelementos.	138
Figura 7.14:	<i>Layout</i> do último nível de máscara do <i>front-side</i> do <i>chip</i> fabricado no CCS/Unicamp.	139
Figura 7.15:	Lâmina com 25 <i>chips</i> fabricados no CCS/Unicamp.	140
Figura 7.16:	Aparato de desbaste mecânico.	141

Figura 7.17:	Aparato de Corrosão Química – Reator de KOH.	143
Figura 7.18:	Esquemático do aparato de teste mecânico.	144
Figura 7.19:	Aparato de teste mecânico.	145
Figura 7.20:	Corte transversal do encapsulamento feito em substrato de alumina: a) Sensor da AMS e b) Sensor do CCS/Unicamp.	145
Figura 7.21:	Encapsulamento do <i>chip</i> : a) <i>layout</i> do substrato de alumina e b) encapsulamento do <i>chip</i> no substrato.	146
Figura 7.22:	Microscopia da membrana quadrada dos sensores de pressão fabricados no CCS/Unicamp.	147
Figura 7.23:	Análise AFM da membrana quadrada dos sensores de pressão fabricados no CCS/Unicamp.	148
Figura 7.24:	Topologia de Cruz Grega usada para medição da resistência de folha através do método de Van Der Pauw dos sensores fabricados no CCS/Unicamp.	149
Figura 7.25:	Função de transferência da Cruz Grega com circuito de polarização integrado fabricada na AMS.	151
Figura 7.26:	Função de transferência de uma Cruz Grega fabricada na AMS para uma faixa de pressão de 0 a 10 psi.	151
Figura 7.27:	Função de transferência de um 4-MTPS fabricado na AMS para uma faixa de pressão de 0 a 10 psi.	152
Figura 7.28:	Função de transferência de uma Cruz Grega fabricada no CCS/Unicamp.	153
Figura 7.29:	Função de transferência de um MTPS fabricado no CCS/Unicamp.	153
Figura 7.30:	Gráfico da não-linearidade da Cruz Grega fabricada na CCS/Unicamp.	154
Figura 7.31:	Gráfico da não-linearidade de um 4-MTPS fabricado na CCS/Unicamp.	154
Figura 7.32:	Gráfico de histerese de um 4-MTPS fabricado no CCS/Unicamp.	155
Figura A1:	Definição dos ângulos de Euler ϕ, θ e ψ .	162

Figura C1:	Resolução para as máscaras: a) Na fotorredutora e b) Na fotorrepetidora.	174
Figura C2:	Projeto das máscaras para o processo de fabricação do sensor de pressão no CCS/Unicamp: a) Projeto de um <i>chip</i> com todos os 6 níveis de máscara e b) Construção de máscaras com 25 <i>chips</i> (matriz 5 x 5) utilizando o processo de repetição.	176
Figura C3:	Dimensões entre a região ativa e de contato do piezoelemento.	177
Figura C4:	1ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Limpeza do substrato.	179
Figura C5:	2ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Oxidação Úmida.	179
Figura C6:	3ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogravação do 1º nível de máscara (região de contatos p+ dos piezoelementos).	180
Figura C7:	4ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão do óxido do 1º nível de máscara.	181
Figura C8:	5ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 1º nível de máscara.	181
Figura C9:	6ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Implantação da região p+.	182
Figura C10:	7ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogravação do 2º nível de máscara (região ativa dos piezoelementos).	183
Figura C11:	8ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão do óxido do 2º nível de máscara.	183
Figura C12:	9ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 2º nível de máscara.	184
Figura C13:	10ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Implantação da região ativa dos piezoelementos (região p).	184
Figura C14:	11ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Ativação dos dopantes e oxidação úmida.	185

Figura C15:	12ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogração do 3º nível de máscara.	186
Figura C16:	13ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão do óxido do 3º nível de máscara.	187
Figura C17:	14ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 3º nível de máscara.	187
Figura C18:	15ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Implantação do anel de guarda (região n+) dos piezoelementos.	188
Figura C19:	16ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Ativação dos dopantes e oxidação seca.	189
Figura C20:	17ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogração do 4º nível de máscara (abertura das regiões de contato).	190
Figura C21:	18ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão do óxido do 4º nível de máscara.	190
Figura C22:	19ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 4º nível de máscara.	191
Figura C23:	20ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Evaporação de alumínio.	192
Figura C24:	21ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogração do 5º nível de máscara (formação das trilhas e dos <i>pads</i>).	192
Figura C25:	22ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do alumínio do 5º nível de máscara.	193
Figura C26:	23ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 5º nível de máscara.	193
Figura C27:	Medição da espessura do filme de óxinitreto (SiO_xN_y).	196
Figura C28:	24ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Deposição do oxinitreto (SiO_xN_y).	197
Figura C29:	Fabricação de uma nova máscara para alinhamento dupla-face.	198

Figura C30:	Método de alinhamento dupla-face usando uma fotoalinhadora comum.	199
Figura C31:	25ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogravação do 6º nível de máscara (cavidade da membrana quadrada).	200
Figura C32:	26ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do oxinitreto e do óxido de silício no <i>back-side</i> .	200
Figura C33:	27ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do nível 6.	201
Figura C34:	28ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Deposição da resina Sylgard®.	201
Figura C35:	29ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão úmida em KOH para formação da membrana quadrada.	202
Figura C36:	30ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Deposição da resina Sylgard®.	203
Figura C37:	Microscopia da Membrana: a) Detalhe da inclinação do plano (111) com o plano (100); b) Detalhe da espessura da membrana: $\approx 20 \mu\text{m}$; c) Detalhe da largura da membrana: $\approx 1,8 \text{ mm}$ e d) Detalhe da rugosidade da membrana: $\approx 61 \text{ nm (rms)}$.	205
Figura C38:	Microscopia dos Piezoelementos: a) Detalhe dos piezoelementos e da membrana; b) Detalhe de um FTPS; c) e d) Detalhe de um MTPS.	206
Figura C39:	Furos feitos através do FIB no centro da região ativa dos piezoelementos para checagem do alinhamento da membrana quadrada com os piezoelementos	207
Figura C40:	Checagem do alinhamento dos piezoelementos com a membrana quadrada através de fonte de luz para iluminação da região de membrana.	208
Figura C41:	Caracterização I×V da Cruz Grega.	209
Figura C42:	Caracterização I×V do FTPS Modificado.	209
Figura C43:	Caracterização I×V do MTPS (com as dimensões menores).	209
Figura C44:	Caracterização I×V do MTPS (com as dimensões maiores).	210

Figura D1:	Aparato de Corrosão Química – Reator de KOH.	211
Figura D2:	Esquemático do aparato de teste mecânico.	213
Figura D3:	Aparato de teste mecânico.	214
Figura E1:	Geometria arbitrária para medida de resistividade pelo Método de Van Der Pauw.	215

TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS

PUBLICADOS

1. CORAUCCI, G. O. ; Fruett, Fabiano. A Theoretical Study Of A Novel Multi-Terminal Pressure Sensor Based On The Transversal Piezoresistive Effect. In: Microelectronics Technology and Devices - SBMICRO 2007, 2007, Rio de Janeiro - RJ. The Electrochemical Society, Inc. ECS Transactions.. New Jersey : The Electrochemical Society, 2007. v. 9. p. 561-569.

SUBMETIDOS

1. Coraucci, C. O.; Fruett, Fabiano. A Multi-Terminal Pressure Sensor With Enhanced Sensitivity, The 15th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, 2009.

CAPÍTULO 1

Introdução

A tecnologia aplicada a sensores vem evoluindo rapidamente. A primeira década do século XXI já está sendo chamada de A Década do Sensor [1]. De fato, o mercado mundial não-militar de sensores vem crescendo em uma taxa média anual de 4,5% desde 1998, segundo a INTECHO CONSULTING [2]. De acordo com a INTECHO, a tendência deste mercado se baseia em sensores feitos de material semicondutor. Segundo ainda a INTECHO, estes sensores estão hierarquizados mundialmente por seu volume de participação no mercado e compreende 10 tipos de sensores. Nesta classificação, os sensores de pressão estão atrás apenas dos sensores de temperatura.

Os sensores de pressão podem ser fabricados em diferentes tecnologias e seu funcionamento pode estar baseado em vários tipos de efeitos. Como exemplos, podemos mencionar o sensor de pressão baseado na tecnologia de capacitância variável, que usa a mudança de capacitância devido à mudança da distância entre os dois eletrodos de um capacitor sob pressão; de sensor de elemento de vibração, que usa a mudança na vibração, no nível molecular, de elementos de materiais diferentes sob pressão; de sistemas microeletromecânicos (MEMS, *Micro-Electro-Mechanical Systems*), que combinam microeletrônica com sistemas mecânicos em material semicondutor; de *strain gauges*, que fazem uso das mudanças na resistência de um material sob pressão e de tecnologias baseadas nos piezoefeitos.

As maiorias dos sensores de pressão microeletrônicos utilizam algum piezoefeito presente no silício. Os piezoefeitos são: piezojunção, piezorresistivo, piezo-MOS, piezotunelamento e piezo-Hall [3]. Este conjunto de efeitos torna o silício um material

muito atrativo para a fabricação desses sensores. Além do mais, o silício apresenta ótimas vantagens [3,4,5], dentre elas:

- excelentes propriedades mecânicas;
- efeitos de transdução disponíveis em diferentes domínios;
- possibilidade de fabricação de micro e nano estruturas;
- possibilita integração de sensores e interface eletrônica;
- baixo custo para produção em massa;
- infraestrutura microeletrônica de processamento do silício já disponível;
- propriedades elétricas bem controladas e entendidas.

Hoje em dia, o efeito piezorresistivo é o mais largamente utilizado para se medir pressão, e a Ponte de Wheatstone (PW) é o circuito convencional mais conhecido para este fim [6]. Contudo, há algumas desvantagens neste tipo de circuito e novas topologias de sensores de pressão vêm sendo estudadas como uma alternativa a essa topologia convencional.

1.1 - Objetivos e Motivação

O efeito piezorresistivo em metais foi primeiro estudado por Lord Kelvin (W. Thomson) em 1856. Em 1954, C. S. Smith descobriu que a magnitude do efeito piezorresistivo em semicondutores é muito maior do que em metais [7]. Contudo, somente alguns anos mais tarde é que esse efeito foi utilizado visando a fabricação de sensores de pressão. Em 1962, resistores difundidos em silício foram investigados por Tufte *et al* [8]. Já em 1969, Gieles investigou um sensor de pressão baseado em PW difundida em silício [9] e até os dias de hoje esse tipo de sensor baseado em PW vem sendo utilizado [10]. Contudo, devido a algumas desvantagens deste tipo de sensor, novas topologias de sensores piezorresistivos de pressão vêm sendo investigadas.

Estas novas topologias são baseadas naquela estudada por Bao *et al* [11] e que a Motorola comercializou e nomeou de *X-Ducer* [12]. Esta topologia consiste de um piezoelemento (um piezorresistor) de quatro terminais. Piezoelementos de 4 terminais têm

sido referenciados por alguns autores pela sigla FTSPs (da sigla em inglês *Four-Terminal Silicon Piezoelements*). Contudo, como este piezoelemento pode ter mais do que apenas quatro terminais, autores têm se referenciado a eles como Piezoelementos de Silício de Multiterminais ou MTSPs (da sigla em inglês *Multi-Terminal Silicon Piezoelements*) [13]. Este novo tipo de sensor é baseado no efeito piezorresistivo transversal do silício e sua sensibilidade é fortemente dependente de sua forma geométrica e de outros parâmetros que serão descritos posteriormente. Esta dependência é modelada por um parâmetro chamado de Fator de Correção Geométrico (G).

Neste trabalho, portanto, temos como nosso principal objetivo desenvolver uma nova topologia de piezoelemento que maximize a sensibilidade daqueles sensores de 4 terminais e minimize a dependência da sensibilidade com sua geometria. Desta maneira, usamos simulações numéricas utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) para estudar o efeito piezorresistivo transversal do silício e para analisar a dependência de sua forma geométrica com sua sensibilidade. Por fim, uma técnica de *layout* é usada para melhorar a sua sensibilidade [56]. Nosso estudo foi baseado em estudos feitos para sensores de pressão no domínio magnético realizado primeiro por Popovic [57] que propôs um dispositivo Hall pouco dependente do efeito de curto-circuito e que, mais recentemente, Kammerer *et al* [58] aplicou a um dispositivo Hall de multi-terminais.

1.2 - Organização da Tese

A tese está organizada em 8 capítulos e 5 apêndices, sendo:

Capítulo 1: Apresentamos uma breve introdução sobre o tema de sensores voltado para a área de microeletrônica, os objetivos e as motivações de nosso trabalho e a organização da tese.

Capítulo 2: Apresentamos um breve histórico sobre pressão, sua definição e padrões de medidas associados a essa grandeza física. Apresentamos também alguns exemplos de sensores de pressão.

Capítulo 3: Este capítulo abrange a teoria mecânica de materiais apresentando o conceito de tensores, a teoria da elasticidade por estudar o tensor de deformação e de estresse e a Lei de Hook. Por fim, faremos uma revisão sobre a teoria da elasticidade anisotrópica do silício.

Capítulo 4: Neste capítulo, apresentamos os piezoefeitos presentes no silício e, em particular, os piezoefeitos resistivo e resistivo transversal que são os principais efeitos relacionados ao sensor em estudo neste trabalho.

Capítulo 5: Neste capítulo apresentamos um estudo analítico dos FTSPs e da nova topologia de MTSPs que é o tema deste trabalho. Analisaremos também os conceitos teóricos para os fatores de correção geométricos. Por fim, apresentamos o circuito de polarização e de testes dos sensores fabricados.

Capítulo 6: Apresentamos um estudo numérico utilizando o método de elementos finitos para comprovação de resultados do nosso estudo analítico dos sensores e para análise de estresse em uma membrana de silício. A obtenção de resultados numéricos para os fatores de correção geométricos também é feita. Simulações elétricas do circuito de polarização do nosso sensor são também mostradas. Por fim, a geometria do novo sensor é definida através destes resultados.

Capítulo 7: Neste capítulo mostramos os resultados práticos para cada fase de desenvolvimento do nosso projeto. Apresentamos os resultados do *back-side etching* usando um reator de KOH e do encapsulamento do sensor fabricado, os resultados experimentais dos nossos sensores e o aparato de teste utilizado para se obter a curva de calibração dos sensores.

Capítulo 8: Refere-se às conclusões para este trabalho.

Apêndice A: Um breve estudo teórico sobre transformação de sistemas de coordenadas que é necessário para o cálculo dos coeficientes de piezoresistência do silício em várias orientações cristalográficas.

Apêndice B: Código do programa usado para simulação dos piezoelementos através de elementos finitos utilizando ANSYS® 8.1.

Apêndice C: Apresenta o projeto das máscaras, todas as etapas de processo envolvidas na fabricação, os resultados finais da fabricação (*layout* dos piezoelementos e seu alinhamento na membrana) e as características elétricas dos piezoelementos.

Apêndice D: Apresenta os aparatos utilizados para caracterização dos sensores de pressão. Apresentamos as descrições do aparato de corrosão química (Reator de KOH) e do aparato de testes mecânico.

Apêndice E: Apresenta um breve estudo sobre o Método de Van Der Pauw que é um método utilizado para medição da resistividade de materias de geometrias arbitrárias.

CAPÍTULO 2

Medida de Pressão

Neste capítulo apresentaremos um breve histórico sobre o estímulo físico relacionado à pressão e sua definição. Mostraremos referências e medidas associadas à pressão, seus padrões de medidas e os tipos e técnicas usadas para se medir pressão.

2.1 – Histórico

O primeiro experimento utilizado para se medir pressão foi feito por Evangelista Torricelli em 1643 [14]. Torricelli percebeu que a atmosfera exercia uma pressão na Terra e que essa pressão variava com a altitude e também ao longo do tempo. Neste experimento, Torricelli utilizou um tubo de vidro com uma das extremidades fechada e inicialmente cheia de mercúrio. Virando esse tubo dentro de uma vasilha com mercúrio, Torricelli notou que o mercúrio não era totalmente despejado para dentro da vasilha e concluiu que a atmosfera exercia uma pressão na Terra da qual mantinha a coluna de mercúrio em equilíbrio.

Contudo, foi Blaise Pascal que, em 1647, primeiro quantificou a influência da altitude na pressão. Pascal e seu cunhado, Perier (Puy de Dôme), mediram a altura de uma coluna de mercúrio invertida no topo de uma montanha e em sua base. Perceberam que havia uma diferença de 3 polegadas na altura do mercúrio para uma diferença de ao redor de 3000 pés de altitude. Isto os possibilitou quantificar a pressão atmosférica como sendo uma variação de 1 polegada para cada 1000 pés de altitude. Pascal nomeou esse instrumento de barômetro [14]. Esse experimento foi a base para o entendimento de pressão que temos hoje em dia.

2.2 – Definição

Pressão (P) é definida como sendo a força (F) por unidade de área (A) aplicada em uma superfície e em uma direção perpendicular a essa superfície:

$$P \equiv \frac{dF}{dA}. \quad (2.1)$$

Pressão é uma grandeza escalar e sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o Pascal (Pa). Pa é definido como sendo Newton por metro quadrado (N/m^2). Portanto, 1 Pa é a força de 1 Newton aplicada em uma área de 1 metro quadrado. Outra unidade bastante utilizada é a psi definida como sendo libra-força por polegada quadrada (lbf/pol^2). Portanto, 1 psi é a força resultante de 1 libra-força aplicada a uma área de 1 polegada quadrada. Neste trabalho, utilizamos com frequência estas duas unidades por serem comuns em especificações de produtos comerciais. Contudo, a Tabela 2.1 mostra as conversões possíveis para outras unidades de medida de pressão.

Tabela 2.1 – Unidades de pressão e fatores de conversão para Pa [4].

Unidade	Símbolo	Fator de Conversão para Pa
Bar	bar	1×10^5
Atmosfera	atm	$1,01325 \times 10^5$
Milibar	mbar	100
Milímetro de Mercúrio	mmHg	133,32
Polegada de Mercúrio	polHg	3386,39
Libra-Força por polegada quadrada	lbf/pol^2 (psi)	6894,76
Polegada de Água	polH ₂ O	284,8

2.3 – Referência e Medidas Associadas à Pressão

Há 3 tipos de medidas de pressão: a pressão absoluta, a pressão relativa e a pressão diferencial, sendo que:

- A Pressão Absoluta: é a pressão medida em relação ao vácuo perfeito. A pressão atmosférica é medida utilizando a pressão absoluta;
- A Pressão Relativa: é a pressão medida em relação à pressão atmosférica;
- A Pressão Diferencial: é a pressão medida em relação a diferentes pressões desde que uma delas não é a pressão atmosférica ou o vácuo perfeito.

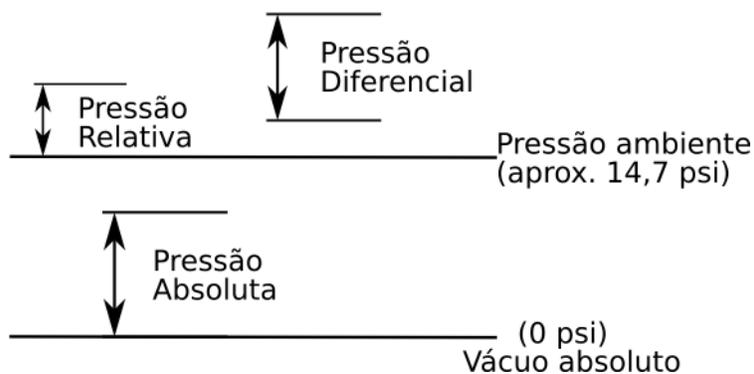


Figura 2.1 – Tipos de Medidas de Pressão.

2.4 – Padrões de Pressão

Padrões de pressão são a base de todas as medições de pressão. Os mais comuns são os *gauges* de peso morto, os monômetros, os barômetros, os tubos de Bourdon e os sensores de vácuo. Segue uma breve introdução de cada um deles.

2.4.1 – *Gauges* de Peso Morto

Este tipo de padrão de pressão foi utilizado pela primeira vez em 1883 por Amagat [14]. O *gauge* consiste de um pistão precisamente construído e inserido dentro de um cilindro. Pesos são adicionados em uma plataforma sob o pistão e uma pressão é aplicada então que uma conhecida pressão é obtida dentro do cilindro.

2.4.2 – Manômetro

O manômetro foi primeiro usado por Boyle em 1662 para a determinação precisa de pressões de fluídos estáticos [14]. Ele consiste de um tubo transparente (geralmente de vidro) construído na forma de um “U” e parcialmente preenchido com um líquido adequado (geralmente mercúrio ou água). Se uma pressão é aplicada em um dos lados do tubo “U”, causando o deslocamento do líquido, a altura de um dos lados diminui enquanto do outro lado aumenta. A diferença entre estas alturas pode ser relacionada à pressão.

2.4.3 – Barômetro

Como já mencionado, o primeiro barômetro foi usado por Torricelli em 1643 para uma precisa determinação de pressões atmosféricas estáveis [14]. Há alguns tipos de barômetros, tais como o cisterna e o aneróide. O barômetro aneróide consiste de uma

cápsula de metal evacuada com faces superiores e inferiores flexíveis. A forma da cápsula muda com variações na pressão atmosférica e esta deformação é geralmente amplificada via niveladores. A medição da deflexão é feita visualmente por um ponteiro conectado aos niveladores alinhados em uma escala apropriada [4]. Este tipo de barômetro é ainda muito utilizado hoje

2.4.4 – Tubo de Bourdon

O tubo de Bourdon foi patenteado por Eugene Bourdon na França em 1849. Este instrumento opera como o barômetro aneróide, mas ao invés de uma cápsula evacuada, há um tubo helicoidal ou na forma de “C”. O tubo é fechado em um dos lados e a pressão é aplicada à outra extremidade. A pressão causa um deslocamento da outra extremidade até que a pressão do fluido é balanceada pela resistência elástica do material. Com um ponteiro devidamente calibrado é possível medir a pressão em função deste deslocamento [4].

2.4.5 – Sensores de Vácuo

Em regiões de baixo vácuo os sensores de *gauge* do tipo *Pirani* é geralmente utilizado. A operação deste *gauge* é baseada em um fio aquecido e na sua resistência elétrica que é proporcional a sua temperatura. Quando o fio está sob pressão ocorre convecção e a energia de aquecimento é perdida do fio. Por outro lado, conforme o vácuo aumenta, ocorre menos convecção e o fio é aquecido. Conforme ocorre o aquecimento do fio, sua resistência elétrica aumenta. Através dessa variação de temperatura, este processo pode ser calibrado para se medir a pressão. Além do *gauge* do tipo *Pirani* há também outros que são conhecidos como *gauge* do tipo *Penning* ou de Cátodo Frio [4].

2.5 – Sensores de Pressão

A aplicação de MEMS para a medição de pressão é já uma bem conhecida aplicação de sensores mecânicos de silício micromecanizados. Alguns exemplos de aplicações destes sensores são: monitoramento da pressão dos pneus, controle de processos industriais, monitoramento de sistemas hidráulicos e medições de pressão sanguínea intravenosa. Nestas aplicações, transdutores são utilizados no sistema de controle.

Transdutores são dispositivos que convertem sinais pertencentes a diferentes domínios físicos. Estes domínios podem ser divididos em 6: o radiante, o mecânico, o térmico, o elétrico, o magnético e o químico [7]. Há dois tipos de transdutores: os de entrada e os de saída. Os primeiros, chamados também de sensores, convertem uma forma de energia não-elétrica para o domínio elétrico. O segundo, também chamado de atuador, converte uma forma de energia em outra que pode ser percebida por um dos sentidos humanos. Em particular, para o domínio mecânico, há o sensor de pressão que converte a deformação de um diafragma ou membrana sob pressão em um sinal elétrico através de um elemento sensor. A figura abaixo exemplifica um diagrama de blocos deste processo para um sensor de pressão.

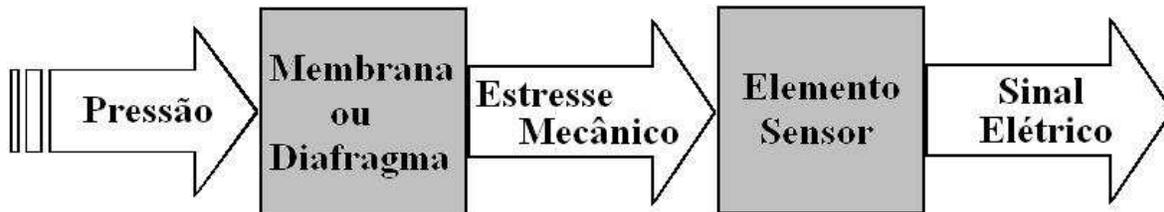


Figura 2.2 – Diagrama de Blocos de um Sensor de Pressão.

Há 2 grupos de transdutores, os chamados transdutores de autogeração ou ativos que não requerem qualquer fonte de alimentação e os modulantes ou passivos que necessitam de uma fonte de alimentação externa [7]. Embora haja transdutores elétricos e não-elétricos, os transdutores elétricos são, hoje em dia, os mais utilizados devido à possibilidade de condicionamento de seu sinal. Um exemplo atual desses transdutores elétricos são os sensores inteligentes que possuem um circuito de processamento de seu sinal incorporado a ele.

A fim de se fazer um sensor trabalhar, técnicas de transdução mecânica são necessárias. Estas técnicas são baseadas nos seguintes efeitos: piezoresistividade, piezoelectricidade, capacitância variável, ópticos e ressonantes [4]. Apresentamos em seguida alguns tipos de sensores que usam estas técnicas.

2.5.1 – Sensores Piezorresistivos

A piezoresistividade é um efeito presente em vários materiais que apresentam uma mudança de resistividade quando sob ação do estresse mecânico. Este efeito foi primeiro descoberto por Lord Kelvin em 1856 que percebeu que a resistência do cobre e do ferro aumentava quando submetidos ao estresse mecânico. Contudo, a primeira aplicação utilizando-se deste efeito somente apareceu em 1930 e, em 1954, Smith descobriu que o silício e o germânio apresentavam um grande efeito piezorresistivo [15]. Aquela aplicação feita por Kelvin consistia de um *strain gauge* feito de uma fina lâmina de metal sobre um filme que podia ser fixado em uma superfície. Quando esta superfície sofria uma deformação, a resistência do *strain gauge* variava e esta variação então podia ser medida.

O Fator *Gauge* (F_G) é definido como sendo a mudança relativa da resistência ($\Delta R/R$) dividida pela mudança relativa do comprimento do material ($\Delta L/L$), como segue:

$$F_G = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}. \quad (2.2)$$

Em metais, o efeito piezorresistivo é dominado pela deformação geométrica e F_G é pouco maior que a unidade ($0 \leq F_G \leq 2$). Semicondutores, por sua vez, apresentam um F_G variando de -140 até +180 devido ao seu efeito piezorresistivo físico. Portanto, sensores piezorresistivos fabricados utilizando materiais semicondutores, em especial o silício, devido às vantagens já mencionadas no capítulo 1, são uma alternativa atraente para sensores no domínio mecânico.

Além dos convencionais *strain gauges* como sensores baseados no efeito de piezoresistência, sensores baseados em resistores ligados em forma de uma Ponte de Wheatstone [10] e, recentemente, sensores baseados em piezorresistores de 4 terminais estão sendo estudados [11,13,16,17,18]. Estes sensores consistem de piezorresistores difundidos em uma membrana de silício. Quando sob ação de estresse mecânico, essa membrana sofre uma deformação elástica causando uma mudança de resistência nos piezorresistores (Figura 2.3).

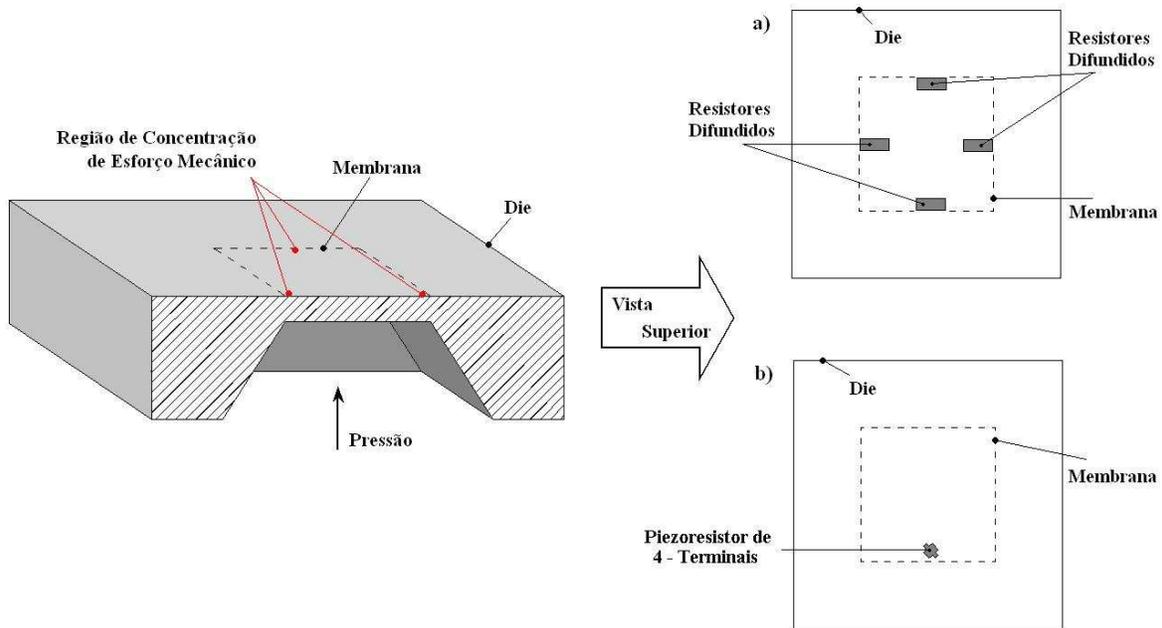


Figura 2.3 – Membrana dos sensores de pressão do tipo: a) Resistores difundidos em forma de Ponte de Wheatstone e b) FTPSs.

2.5.2 – Sensores Piezoelétricos

Este efeito foi descoberto por Jacques e Pierre Curie em 1880 usando o quartzo como material. Materiais piezoelétricos produzem uma carga elétrica quando estão sob ação de uma força mecânica ou se deformam quando um campo elétrico é aplicado externamente. Este efeito é resultante da assimetria dentro da estrutura cristalográfica de certas classes de materiais. Transdutores piezoelétricos podem trabalhar tanto como sensores ou como atuadores em um sistema de instrumentação.

O silício apresenta estrutura cristalográfica centrossimétrica e, desta forma, não apresenta efeito piezoelétrico. Já outros materiais ferroelétricos precisam ser polarizados para que possam apresentar um comportamento piezoelétrico.

2.5.3 – Sensores Capacitivos

Exemplos de sensores capacitivos são aqueles utilizados como sensores de deslocamento e aqueles para se medir pressão. Para ambos, os eletrodos devem ser paralelos e a capacitância (C), desprezando o efeito de franja, é então dada por:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}, \quad (2.3)$$

sendo que ϵ_0 é a permissividade do vácuo, ϵ_r é a permissividade do material entre os eletrodos, A é a área de sobreposição entre os eletrodos e d é a distância de separação dos eletrodos.

O sensor capacitivo para deslocamento pode ser de distância variável, de área variável ou de permissividade variável. Para os sensores de eletrodo variável e de área variável, um dos eletrodos é fixo enquanto o outro sofre um movimento: no sentido vertical ao eletrodo fixo, para o caso do sensor de distância variável (varia-se d) (Figura 2.4a) e no sentido horizontal, para o sensor de área variável (varia-se A) (Figura 2.4b). Já o de permissividade variável, ambos seus eletrodos são fixos e o material dielétrico é movimentado (varia-se ϵ_r) (Figura 2.4c). Estes tipos de sensores capacitivos são mostrados na Figura 2.4.

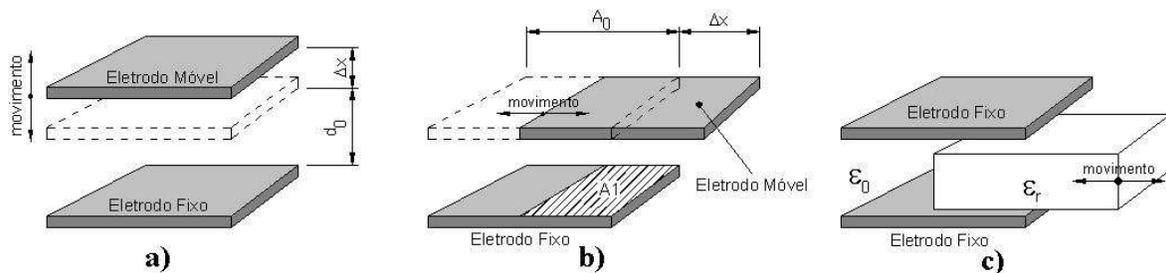


Figura 2.4 – Exemplos de sensores de deslocamento capacitivos simples: a) distância variável, b) área variável e c) permissividade variável.

Já o sensor de pressão capacitivo tem apenas um de seus eletrodos fixos enquanto o outro é variável. O eletrodo variável é feito sobre um diafragma ou membrana. Quando a membrana está sob pressão, ela se deforma diminuindo a distância entre os 2 eletrodos e portanto, alterando sua capacitância. Este sensor é mostrado na Figura 2.5.

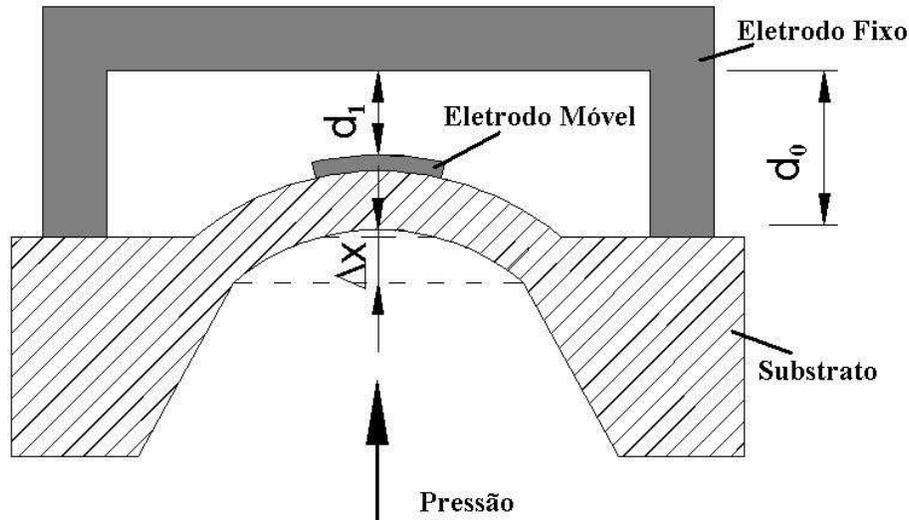


Figura 2.5 – Exemplo de um sensor de pressão capacitivo.

Uma das vantagens do sensor de pressão capacitivo é que sua estrutura física é relativamente simples consistindo de apenas 2 eletrodos. Embora, para sensores de capacitância diferencial, um terceiro eletrodo é necessário. Comparados aos sensores piezorresistivos de silício, os sensores capacitivos apresentam uma sensibilidade maior, um menor consumo de potência e uma maior linearidade. Contudo, estes tipos de sensores sofrem uma grande influência de capacitâncias parasitas na medida.

2.5.4 – Sensores Ópticos

Basicamente, são sensores que utilizam técnicas ópticas que modulam as propriedades de ondas eletromagnéticas. Essas propriedades podem ser: a intensidade, a fase, o comprimento de onda, a posição espacial, a frequência e a polarização. Cada uma com seu princípio particular de funcionamento.

Sensores ópticos podem ser também utilizados para medir pressão [54]. A Figura 2.6 mostra um sensor deste tipo.

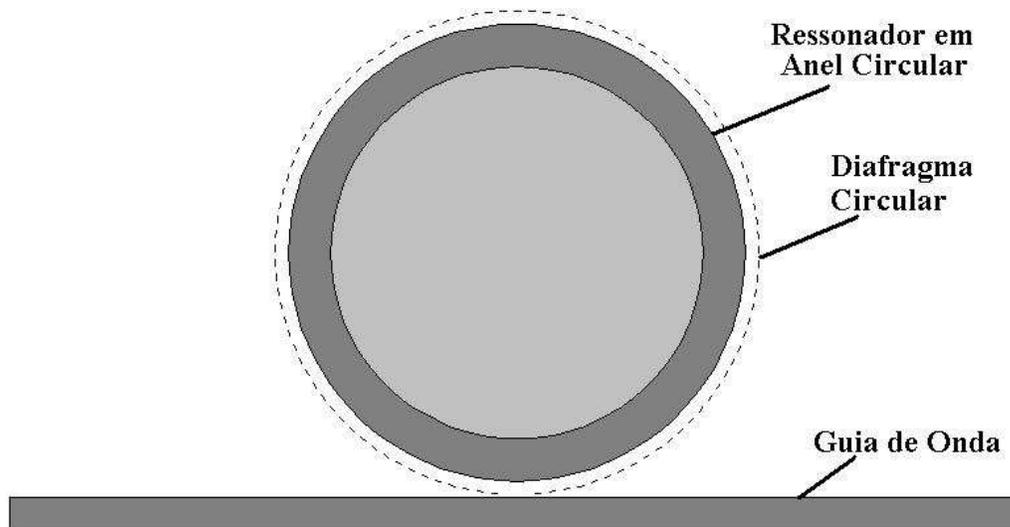


Figura 2.6 – Exemplo de um sensor de pressão óptico.

Neste sensor, quando uma pressão é aplicada no diafragma, devido ao estresse no guia de onda localizado sob o diafragma, o índice de refração muda (devido ao efeito foto-elástico) e, conseqüentemente, muda-se a fase da luz que se propaga no guia de onda. Esta mudança de fase é então lida como um deslocamento ressonante do comprimento de onda do circuito ressonador em anel localizado sob o diafragma.

Neste tipo de sensor, como a detecção da pressão é feita no domínio de frequência, ruídos de baixa frequência são minimizados.

2.5.5 – Sensores Ressonantes

Basicamente, sensores ressonantes são feitos de uma estrutura mecânica projetada para vibrar em uma frequência ressonante específica. Estas estruturas podem ser feitas de uma grande variedade de materiais e usarem técnicas de microfabricação. O sensor de pressão ressonante da STL (*Standard Telecommunication Laboratories*), mostrado na Figura 2.7, é um exemplo deste tipo de sensor.

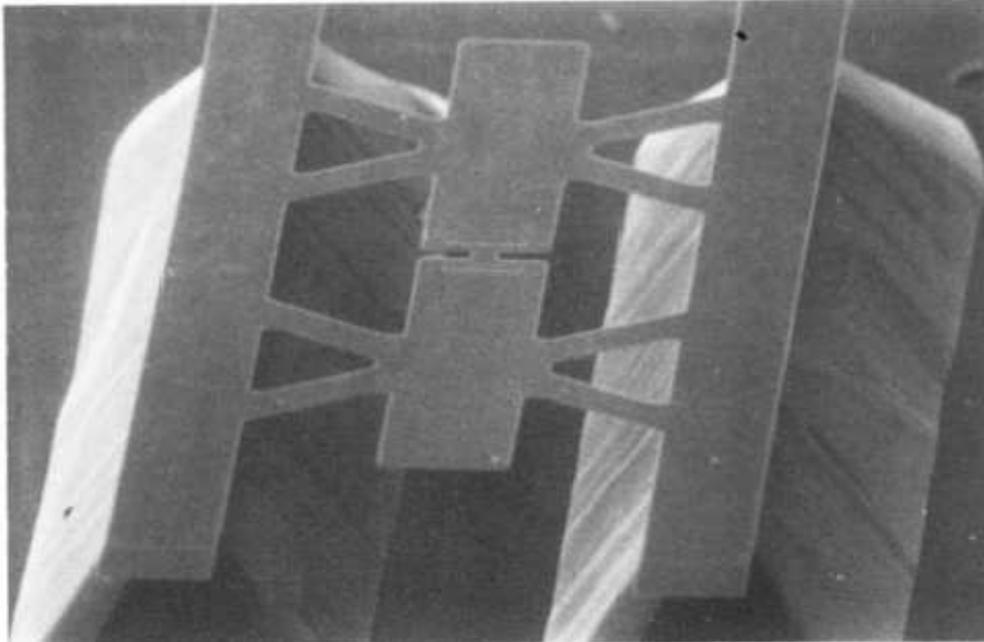


Figura 2.7 – Exemplo de um sensor de pressão ressonante da STL [19].

Quando uma pressão é aplicada nesta estrutura, a rigidez e/ou a tensão da estrutura é aumentada. O aumento dessa rigidez resulta no aumento da frequência natural do ressonador. Portanto, ressonadores podem ser utilizados para monitorar a deflexão de uma estrutura flexível e fornecer uma indicação da magnitude da pressão.

Ressonadores podem ser facilmente fabricados em silício com alta exatidão e baixo custo. Comparados aos sensores capacitivos e piezorresistivos, os sensores ressonantes apresentam um baixo consumo de potência, uma melhor resolução, baixa histerese e boa repetibilidade (Tabela 2.2). Porém, a fabricação e o encapsulamento destes sensores são mais complexos.

Tabela 2.2 – Comparação das características dos sensores de pressão do tipo ressonante, piezorresistivo e capacitivo [4,19].

Característica	Ressonante	Piezorresistivo	Capacitivo
Saída	Frequência (mudança de 10-50% de 100KHz)	Tensão (0 – 100 mV)	Tensão ou Frequência
Resolução	1 parte em 10^8	1 parte em 10^5	1 parte em 10^4 - 10^5
Exatidão	100 – 1000 ppm	500 – 10000 ppm	100 – 10000 ppm
Consumo de Potência	0,1 – 10 mW	= 10 mW	< 0,1 mW
Sensibilidade a Temperatura	$-30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$-1600 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$	$4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Limite de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	200	120	100
Drive ótico	sim	não	não

2.6 – Especificações de Sensores

Os sensores de pressão destinam-se as mais variadas aplicações. A fim de escolher um tipo correto de sensor para uma determinada aplicação, algumas especificações e/ou características dos sensores devem ser entendidas, tais como: função de transferência, *offset*, fundos de escala, faixa dinâmica ou faixa de medida, não-linearidade, histerese, repetibilidade, sensibilidade, resolução e seletividade [1][4][5]. A seguir apresentamos uma breve definição de cada uma destas características.

2.6.1 – Função de Transferência

Mostra a relação funcional entre o sinal de entrada físico do sensor e seu sinal de saída elétrico. Geralmente, esta relação é mostrada em um gráfico através da curva de calibração do sensor (Figura 2.8).

2.6.2 – *Offset*

Saída de um sensor, em ambiente de temperatura constante, quando nenhum estímulo é aplicado a ele (Figura 2.8).

2.6.3 – Fundo de Escala e Fundo de Escala de Saída

Da sigla em inglês *Full Scale Output* (FSO), fundo de escala de saída é a diferença algébrica entre pontos extremos da saída. Já fundo de escala (*Full Scale*) é o limite superior da saída do sensor ao longo da faixa de medição (Figura 2.8).

2.6.4 – Faixa Dinâmica ou Faixa de Medida

É o valor da medida (entrada), definida pelo limite superior e inferior, na qual o sensor é pretendido trabalhar. Em outras palavras, a faixa dos sinais físicos de entrada que podem ser convertidos em sinais elétricos é chamada de Faixa Dinâmica ou Faixa de Medida do sensor (Figura 2.8).

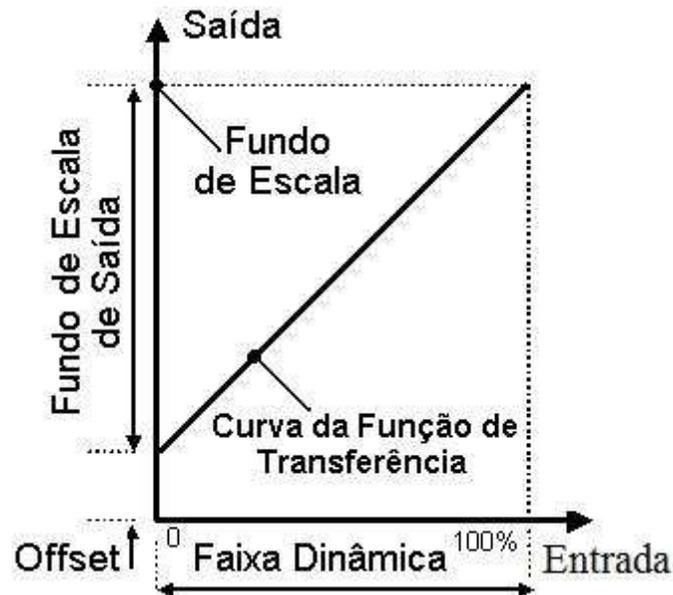


Figura 2.8 – Exemplificação gráfica para os conceitos de fundo de escala de saída, fundo de escala, função de transferência, faixa dinâmica e *offset*.

2.6.5 – Não-Linearidade

Freqüentemente chamada de linearidade, a não-linearidade é o desvio máximo entre a curva de calibração e a curva de uma faixa dinâmica especificada. Há, geralmente, 3 definições de linearidade usada nas especificações de sensores de pressão [4]:

- a linearidade independente: desvio máximo entre a medida e uma reta para fins de minimizar esse desvio;
- a linearidade de pontos finais: desvio máximo entre a medida e uma reta posicionada para coincidir com os pontos superior e inferior da curva de calibração;
- linearidade baseada em zero: desvio máximo entre a medida e uma reta posicionada para coincidir com o menor valor da curva de calibração e minimizar o desvio máximo.

2.6.6 – Histerese

Histerese é a máxima diferença na saída, em qualquer valor de medida (entrada), dentro da faixa de medida quando o valor, para um ponto específico da medida, é aproximado com um aumento e em seguida com uma diminuição em sentidos opostos (ver Figura 2.9). Histerese é expressa em %FSO.

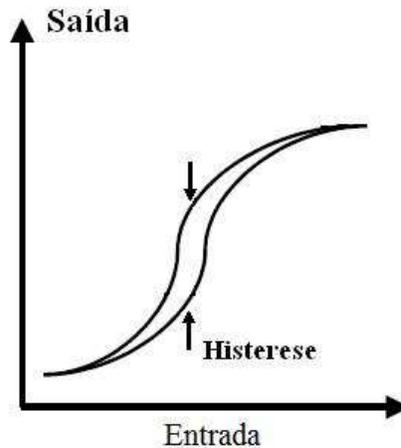


Figura 2.9 – Exemplificação gráfica do conceito de histerese.

2.6.7 – Repetibilidade

Repetibilidade é a habilidade do sensor de reproduzir leituras de saída, em temperatura constante, quando a mesma medida é aplicada sob as mesmas condições. Como a histerese, a repetibilidade é medida em porcentagem de FSO.

2.6.8 – Sensibilidade

É a relação na mudança da saída do sensor para uma mudança no valor da medida (entrada). Geralmente, esta relação é entre uma pequena mudança no sinal elétrico para uma pequena mudança no sinal físico.

2.6.9 – Resolução

Resolução é a mínima mudança do valor da medida (entrada) necessária para produzir uma mudança detectável na saída.

2.6.10 – Seletividade

Seletividade é a habilidade de o sensor medir uma grandeza na presença de outras. Sensores de pressão que variam com a pressão e a temperatura têm uma boa seletividade se eles são capazes de maximizar sua sensibilidade devido à pressão e de minimizar a influência da temperatura.

CAPÍTULO 3

Teoria Mecânica

Microsistemas são construídos com várias espécies de elementos estruturais, tais como: vigas, pontes e membranas. As relações entre as forças aplicadas e as deformações ocorridas nestas estruturas são governadas pelas leis da mecânica dos materiais.

Uma simples viga engastada por uma de suas extremidades (cantiléver) pode ser usada para converter uma força mecânica em um deslocamento. De uma forma similar, um cantiléver, uma ponte ou uma membrana podem ser usadas para medir não apenas uma força pontual, mas também uma força distribuída, tal como o estresse. Além disso, a membrana pode ser usada para medir pressões hidrostáticas ou barométricas [20].

Em geral, uma estrutura micromecânica atua como um conversor entre sinais do mesmo domínio: mecânico-mecânico. Os parâmetros deste conversor dependem da geometria da estrutura, da propriedade mecânica dos materiais envolvidos na fabricação desta estrutura e da forma em que as forças estão sendo aplicadas e dos graus de liberdade (engastes).

A análise estrutural de microssistemas mecânicos é normalmente realizada através do Método de Elementos Finitos (MEF). Com a utilização do programa ANSYS[®], fizemos um estudo numérico de membranas microfabricadas em silício. Através destas simulações, definimos o tamanho ótimo da membrana e obtemos a localização da região de concentração de estresse máximo. Ainda, obtemos a magnitude deste estresse que foi utilizado para simular, também através do mesmo programa, o efeito piezorresistivo transversal. Maiores detalhes destas simulações serão apresentados no Capítulo 6.

Para a análise estrutural da membrana, devemos nos familiarizar com as propriedades elásticas do material, tais como os coeficientes de elasticidade, a relação de Poisson e o Módulo de Young. Portanto, foi necessário o estudo da teoria da elasticidade de materiais.

Antes de introduzirmos a teoria de elasticidade, apresentamos uma breve revisão sobre o conceito de tensor o qual é usado para relacionar as grandezas físicas: deformação e estresse.

3.1 – Tensor

Os tensores obedecem a certas regras de transformação em uma mudança de coordenada [21]. Tensores podem ser de ordem zero, de primeira ordem, de segunda ordem, etc. Tensores de ordem zero são chamados de escalares. Tensores de primeira ordem ou de ordem maiores são quantidades representadas por vetores em um sistema cartesiano.

Escalar é uma grandeza que pode ser representada por um número simples que não possui uma orientação em um sistema de coordenadas. Exemplos de escalares são: a temperatura, o tempo, a densidade e a massa de um corpo. Em contraste a essa grandeza escalar que somente é definida pela sua magnitude, uma grandeza vetorial é também definida pela direção. Exemplos de grandezas vetoriais são: a velocidade, a aceleração e o campo elétrico. A Figura 3.1 mostra a representação gráfica de um vetor μ_i de um ponto P em um sistema cartesiano (x, y, z) .

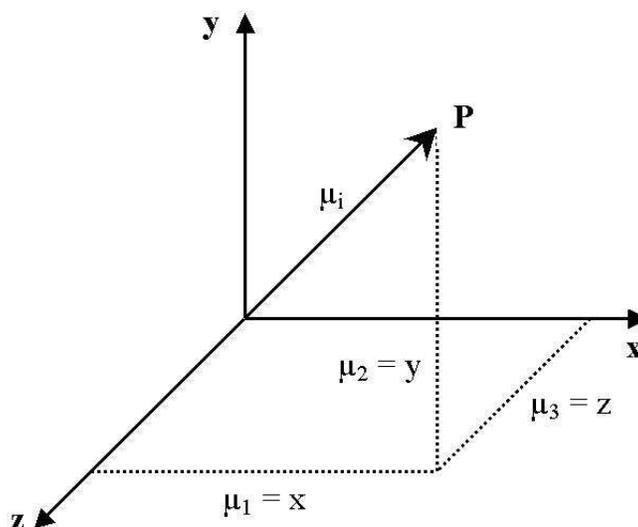


Figura 3.1 – Representação gráfica de um vetor em um sistema de coordenadas.

As coordenadas do ponto P correspondem às componentes (μ_1, μ_2, μ_3) do vetor μ_i . Quando é feita uma transformação de um sistema cartesiano para outro, as componentes de um vetor tri-dimensional são dadas por [21]:

$$U_\alpha = a_{\alpha\beta} \mu_\beta, \quad (3.1)$$

sendo que U_α é um tensor e $a_{\alpha\beta}$ é um conjunto de elementos deste tensor. O conjunto dos 3 vetores (μ_1, μ_2, μ_3) é chamado de tensores de primeira ordem. Tensores de ordem maiores são obtidos multiplicando-se os tensores de primeira ordem. Assim, multiplicando-se dois tensores de primeira ordem, consegue-se um tensor de segunda ordem. Se três tensores de primeira ordem são multiplicados entre si, um tensor de terceira ordem é obtido. Desta forma, o tensor da n -ésima ordem é dado por:

$$U_{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n} = a_{\alpha_1 \beta_1} a_{\alpha_2 \beta_2} \dots a_{\alpha_n \beta_n} \mu_{\beta_1 \beta_2 \dots \beta_n}. \quad (3.2)$$

O número de elementos de um tensor depende de sua ordem e do espaço dimensional. Um tensor de ordem x em um espaço dimensional de ordem y tem y^x elementos. Assim, um tensor de segunda ordem que está em um sistema cartesiano retangular (x, y, z) possui 9 elementos (3^2) e pode ser representado por uma matriz. A Tabela 3.1 mostra a notação do conjunto de elementos de um tensor para um escalar, para um vetor e para uma matriz.

Tabela 3.1 – Notação do conjunto de elementos de um tensor para diferentes ordens de tensores

Ordem	Nome	Notação
Zero	Escalar	A
Primeira	Vetor	a_i
Segunda	Matriz	a_{ij}

A somatória implícita na equação (3.1) é chamada de Somatória de Einstein. Pela Lei da Transformação, Einstein mostra que se um índice ocorre duas vezes em um termo de uma expressão, ele deve ser sempre somado. Os índices que se repetem são chamados de índices *dummy*. Isto significa que uma mudança deste índice não afeta o valor da soma.

Sem a convenção de Einstein, a equação (3.1) seria escrita da forma:

$$U_\alpha = \sum_{\beta=1}^3 a_{\alpha\beta} \mu_\beta, \quad \alpha = 1, 2, 3. \quad (3.3)$$

A notação através da somatória de Einstein é mais simples e será útil para a formulação da teoria da elasticidade. Para um completo desenvolvimento da convenção da Somatória de Einstein, consultar [22].

3.2 – Teoria de Elasticidade

A teoria da elasticidade explica o comportamento de um material submetido à ação de forças. Este comportamento é chamado de resposta elástica do material na qual o estresse, em cada ponto do corpo do material, depende da deformação na vizinhança deste ponto [21]. Obviamente, esta teoria somente pode ser aplicada a um corpo no qual as deformações não excedam o limite elástico do material.

Há 2 problemas clássicos que são estudados com o auxílio da teoria de elasticidade: a deformação de plano (*plane strain*) e o estresse de plano (*plane stress*) [21]. Se o plano é referido ao plano (x, y) , então a elasticidade de plano é caracterizada por condições em que o estresse e a deformação são independentes da coordenada z .

A seguir, revisaremos o conceito de deformação e de estresse. Posteriormente, introduziremos a Lei de Hooke que relaciona estas duas grandezas.

3.2.1 – Tensor de Deformação

Na teoria clássica de elasticidade, aproximações baseadas em deformações infinitesimalmente pequenas resultam em uma completa linearização da teoria de deformação [21]. Desta forma, para o estudo do tensor de deformação, consideramos uma extensão de um elemento de linha infinitesimal sob deformação.

Considere, portanto, uma fibra infinitesimal PA de comprimento ds em uma região R com direções definidas como $N: (N_1, N_2, N_3)$ em um sistema cartesiano retangular (X_1, X_2, X_3) , conforme Figura 3.2. Sob deformação, o elemento de linha PA passa a ser $\mathcal{P}\mathcal{A}$, de comprimento dS e direção $\mathcal{N}: (\mathcal{N}_1, \mathcal{N}_2, \mathcal{N}_3)$, em uma região \mathcal{R} . Desta forma, o ponto $P: (x_1, x_2, x_3)$ move-se para o ponto $\mathcal{P}: (y_1, y_2, y_3)$ e, conseqüentemente, o ponto $A: (x_1+dx_1, x_2+dx_2, x_3+dx_3)$ move-se para o ponto $\mathcal{A}: (y_1+dy_1, y_2+dy_2, y_3+dy_3)$ [21].

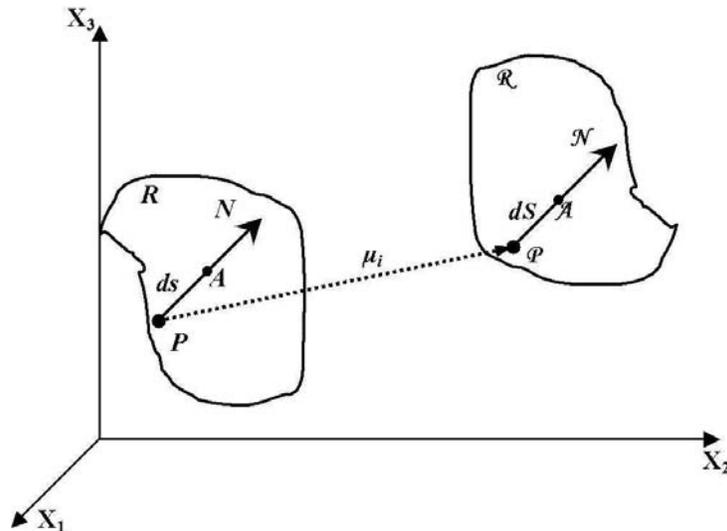


Figura 3.2 – Tensor de deformação: extensão de um elemento de linha infinitesimal.

As distâncias ds e dS podem ser definidas como:

$$\begin{aligned} ds^2 &= dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 = dx_i dx_i, \\ dS^2 &= dy_1^2 + dy_2^2 + dy_3^2 = dy_i dy_i, \quad \text{para } i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Agora, dy_i pode ser expresso em termos de dx_i como:

$$dy_i = \frac{\partial y_i}{\partial x_j} dx_j = y_{i,j} dx_j, \quad \text{para } i, j = 1, 2, 3. \quad (3.5)$$

Os coeficientes de deslocamento μ_i dados pelo vetor (μ_1, μ_2, μ_3) são expressos em função de y_i e x_i da seguinte forma:

$$\mu_i = y_i - x_i. \quad (3.6)$$

Subtraindo as equações (3.4) e substituindo a equação (3.6), obtemos:

$$dS^2 - ds^2 = 2\varepsilon_{ij} dx_i dx_j, \quad (3.7)$$

sendo que a deformação ε_{ij} é dada por:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{j,i} + u_{i,j} + u_{k,i}\mu_{k,j}). \quad i, j, k = 1, 2, 3. \quad (3.8)$$

Se a deformação e os ângulos de rotação são bem pequenos comparados à unidade e se as rotações são bem pequenas comparadas às deformações, os termos quadráticos da equação (3.8) podem ser negligenciados. Assim, (3.8) é dada por:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{j,i} + u_{i,j}), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.9)$$

da qual é a base da teoria de deslocamentos pequenos.

Em um sistema cartesiano retangular (x, y, z) temos 9 componentes ε_{ij} . Estes componentes podem ser representados por uma matriz [3x3] chamada de tensor de deformação. Esta matriz é representada como:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Há 2 tipos de deformações que podem ser diferenciadas analisando os coeficientes da equação (3.10): a deformação por contração ou alongamento e a deformação tangencial. A primeira, também chamada de deformação normal, é quando a deformação ocorre na mesma direção da força aplicada. Esta deformação é representada pelos coeficientes ε_{ij} quando $i = j$. Por outro lado, a deformação tangencial, também chamada de deformação tangencial unitária, é representada pelos coeficientes ε_{ij} quando $i \neq j$ (o símbolo γ pode também ser usado para representar esta deformação). Neste caso, superfícies paralelas se deformam uma em relação à outra devido a uma força tangencial. A Figura 3.3 mostra os 2 tipos de deformações.

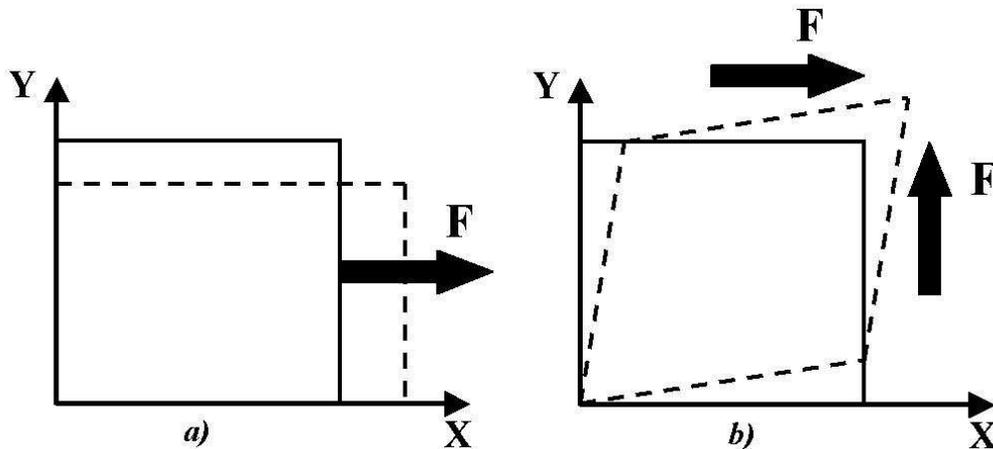


Figura 3.3 – Tipos de deformações: a) normal e b) tangencial unitária.

3.2.2 – Tensor de Estresse

A fim de entender a definição de estresse, vamos considerar uma região A onde uma força F está atuando. Em geral, F não é perpendicular a A . Em consequência, a força F pode ser decomposta nas componentes F_n e F_t onde F_n e F_t são as componentes normal e tangencial da força F , respectivamente; conforme Figura 3.4 [3].

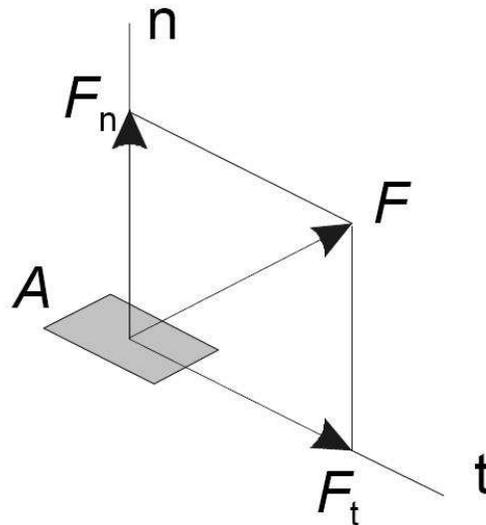


Figura 3.4 – Definição de estresse. Força F atuando em uma área A . As forças F_n e F_t são as componentes normal e tangencial da força F , respectivamente.

O conceito de estresse em um ponto é obtido por considerar a área A ser infinitesimal. Então, as relações F_n/A e F_t/A , geralmente, aproximam-se de limites diferentes de zero. Os valores limitantes destas relações são chamados de estresse normal e estresse tangencial onde a área infinitesimal A está localizada. Assim, os estresses são dados por [21]:

$$\lim_{A \rightarrow 0} \frac{F_n}{A} = \sigma \quad e \quad \lim_{A \rightarrow 0} \frac{F_t}{A} = \tau, \quad (3.11)$$

sendo que σ é o estresse normal em um ponto na área A no plano Q e τ é o estresse tangencial no mesmo ponto.

3.2.2.1 – Notação e Componentes de Estresse

As componentes de estresse normal e tangencial atuando em um elemento cúbico de volume infinitesimal são mostradas na Figura 3.5

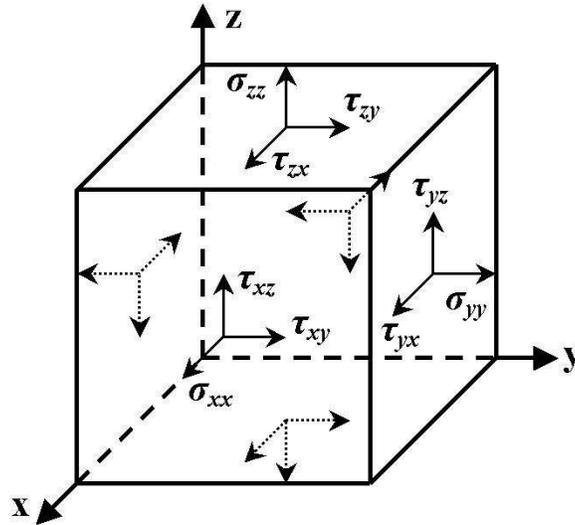


Figura 3.5 – Notação e componentes de estresses normais e tangenciais em um elemento cúbico infinitesimal.

As componentes do estresse na direção x são denominadas como σ_{xx} , τ_{xy} e τ_{xz} . A notação σ_{xx} representa a componente normal ao plano X e, portanto, σ_{xx} é denominado de estresse normal à direção X . Similarmente, τ_{xy} e τ_{xz} representam as componentes tangenciais do vetor de estresse ao plano X e, portanto, são denominados de estresses tangenciais à direção X . A mesma análise é feita para os coeficientes nas direções Y e Z . Há um conjunto de 9 componentes de estresse associado com o cubo infinitesimal apresentado na Figura 3.5. Estas componentes podem ser escritas na forma de índice σ_{ij} , onde $i, j = 1, 2, 3$ e as coordenadas (x, y, z) passa a ser (X_1, X_2, X_3) . As componentes são então dadas como segue:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_{11} & \tau_{xy} &= \tau_{12} & \tau_{xz} &= \tau_{13} \\ \tau_{yx} &= \tau_{21} & \sigma_{yy} &= \sigma_{22} & \tau_{yz} &= \tau_{23} \\ \tau_{zx} &= \tau_{31} & \tau_{zy} &= \tau_{32} & \sigma_{zz} &= \sigma_{33} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Tensores de estresse (T_1, T_2, T_3) em planos que são perpendiculares aos eixos (X_1, X_2, X_3) são dados por:

$$\begin{aligned} T_1 &= \sigma_{11}e_1 + \tau_{12}e_2 + \tau_{13}e_3 \\ T_2 &= \tau_{21}e_1 + \sigma_{22}e_2 + \tau_{23}e_3, \\ T_3 &= \tau_{31}e_1 + \tau_{32}e_2 + \sigma_{33}e_3 \end{aligned} \quad (3.13)$$

sendo que e_1, e_2 e e_3 são vetores unitários nas direções (X_1, X_2, X_3) .

Pela somatória de Einstein, os tensores de estresse de segunda ordem em (3.13) podem ser apresentados como:

$$T_i = \sigma_{ij} e_j. \quad (3.14)$$

O conjunto de componentes de estresse (σ_{ij}) é simétrico em relação à diagonal principal. Conseqüentemente, somente 6 componentes de estresse são necessários para definir o estresse em um ponto. Desta forma, σ_{ij} pode ser apresentado como um vetor, da seguinte forma:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

sendo σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} as componentes normais e τ_{23} , τ_{13} e τ_{12} as componentes tangenciais.

3.2.3 – Lei de Hooke

Introduzida por Robert Hooke no século XVII, a Lei de Hooke relaciona a deformação com o estresse aplicado a um determinado material isotrópico [23], como:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.16)$$

sendo que E é o Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young.

Generalizando a Lei de Hooke para um material anisotrópico, cada um dos componentes de estresse é uma função linear dos componentes do tensor de deformação. Desta forma, os tensores de deformação e de estresse podem ser relacionados através de um tensor de quarta ordem. A equação (3.16) é então apresentada como:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad i, j, k, l = 1, 2 \text{ e } 3 \quad (3.17)$$

sendo que C_{ijkl} é um conjunto de 81 elementos chamados de coeficientes de elasticidade.

Como tanto o tensor de deformação como o tensor de estresse são simétricos, os tensores de quarta ordem C_{ijkl} também são simétricos. Em conseqüência, o conjunto de 81

elementos pode ser representado por um conjunto de 21 elementos. Usando a notação de simplificação de índices mostrada na Tabela 3.2, a equação (3.17) pode ser escrita na forma matricial da seguinte forma:

Tabela 3.2 – Simplificação de Índices

Índices	11	22	33	23	13	12
Redução	1	2	3	4	5	6

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

e, na forma tensorial, por:

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ e } 6 \quad (3.19)$$

sendo que os coeficientes de elasticidade C_{ij} são também chamados de coeficientes de rigidez.

A deformação pode também ser expressa em função do estresse. Assim, a equação (3.19) é escrita como:

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ e } 6 \quad (3.20)$$

sendo que os coeficientes S_{ij} são os coeficientes independentes de elasticidade. Estes coeficientes também podem ser representados na forma matricial, como segue:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Os coeficientes de rigidez e seus correspondentes, os coeficientes independentes de elasticidade, definem todas as propriedades elásticas de um material anisotrópico. Cada material possui um conjunto de coeficientes particular. Estes coeficientes são normalmente medidos experimentalmente em temperatura ambiente. Entretanto, os coeficientes de cada material são, de alguma forma, dependentes da temperatura.

3.2.4 – Teoria de Elasticidade Aplicada ao Silício

O comportamento de materiais quando sob ação de forças externas pode ser estudado através da teoria apresentada nas seções anteriores. Contudo, há certos tipos de materiais, como o silício, que apresentam tipos especiais de simetria em sua estrutura cristalográfica que nos permite introduzir algumas simplificações à teoria de elasticidade apresentada.

O silício cristalino tem uma estrutura de diamante. Sua estrutura é do tipo cúbica de face-centrada com 2 átomos (1 na borda da face e o outro nas coordenadas $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$) associados com cada átomo centrado das faces adjacentes àqueles 2 átomos, conforme mostrada na Figura 3.6b. Estruturas do tipo face-centrada possuem um átomo em cada canto das faces de um cubo e outro no centro destas faces, conforme mostrada na Figura 3.6a. A estrutura do silício, além destes átomos, possui 4 outros átomos nas coordenadas $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$, conforme mencionado. A Figura 3.6 mostra estas respectivas células unitárias. A Célula unitária é uma pequena porção de qualquer cristal que pode ser usado para reproduzir este cristal [24]. Na célula unitária de silício da Figura 3.6b, os círculos escuros são os átomos de silício presentes nos cantos e nos centros de suas faces; os círculos claros são os átomos nas coordenadas $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$. Nesta figura estão apenas sendo representados os átomos que estão associados àqueles das coordenadas $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$. Deve-se salientar que a célula unitária de silício possui um átomo em cada canto de uma face, conforme Figura 3.6a.

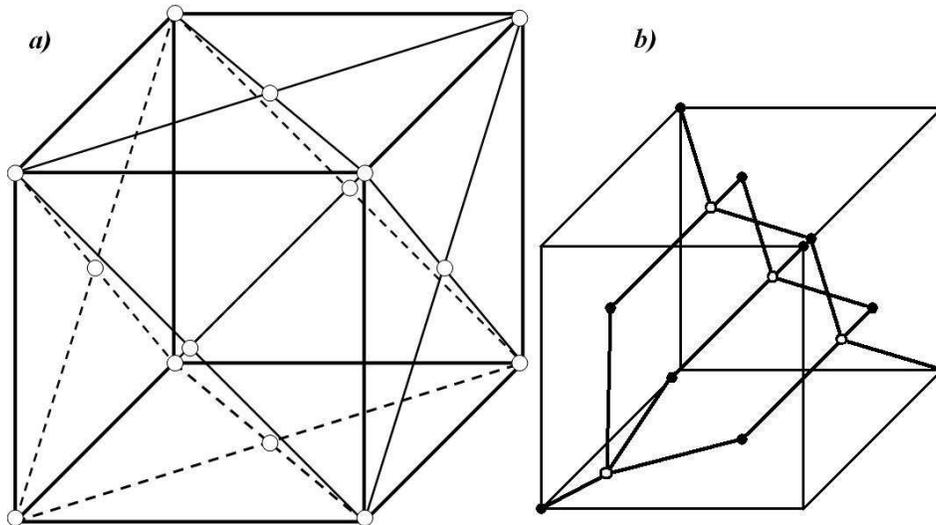


Figura 3.6 – Células unitárias: a) célula unitária de um cristal de face-centrada e b) célula unitária de silício com átomos nas coordenadas $1/4, 1/4, 1/4$.

Este tipo de estrutura cristalográfica possui 3 planos de simetria e suas propriedades mecânicas são anisotrópicas: dependem tanto dos planos cristalográficos como de suas orientações. A fim de identificar estes planos e orientações, os chamados Índices de Miller são empregados. Estes índices utilizam uma seqüência de 3 números para identificação das direções e dos planos. A Tabela 3.3 apresenta um resumo da convenção de Miller. Para um estudo detalhado de como estes índices são calculados, consulte [24].

Tabela 3.3 – Convenção de Miller

Convenção	Descrição
(hkl)	Plano do Cristal
{hkl}	Planos Equivalentes
[hkl]	Direção do Cristal
<hkl>	Direções Equivalentes

Uma ilustração dos 3 planos de simetria presentes na estrutura cristalográfica do silício e suas direções é apresentada na Figura 3.7.

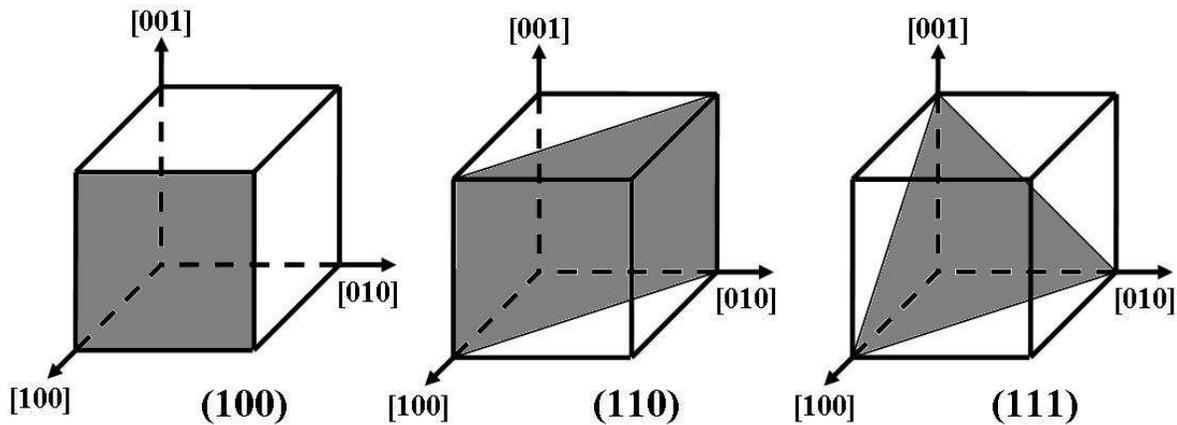


Figura 3.7 – Planos de simetria do silício e suas direções.

Devido àquela característica do cristal de silício ser do tipo face-centrada, os 21 elementos da equação (3.21) podem ser reduzidos a somente 9 elementos:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}, \quad (3.22)$$

sendo que os coeficientes S 's são relacionados com os coeficientes C 's, da seguinte forma [55]:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{C_{11} + C_{12}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}; \\ S_{12} &= \frac{-C_{12}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}; \\ S_{44} &= \frac{1}{C_{44}}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

As magnitudes destes coeficientes são apresentadas na Tabela 3.4 [25].

Tabela 3.4 – Magnitudes dos coeficientes C_{ij} e S_{ij} para o silício

C_{11}	C_{12} (10^7 MPa^{-1})	C_{44}	S_{11}	S_{12} (10^7 MPa^{-1})	S_{44}
1,657	0,639	0,796	0,768	-0,214	1,26

Os parâmetros, Módulo de Young, Relação de Poisson e Módulo de Rigidez, podem também ser usados para representar as características mecânicas de um material.

O Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade (E) é a relação entre o estresse uniaxial e a deformação na mesma direção do estresse aplicado em um corpo. Também chamado de constante de proporcionalidade do material, E é dado por:

$$E_i = \frac{\sigma_{ij}}{\epsilon_{ij}} = \frac{1}{S_{ij}}, \quad (3.24)$$

para $i = j = 1, 2$ ou 3 . Quanto maior o valor de E , menos o corpo é deformado para um dado estresse aplicado. Esta relação, para materiais anisotrópicos, resulta na Lei de Hooke.

A fim de definirmos a Relação de Poisson, considere um bloco retangular feito de um material elástico, conforme Figura 3.8. Quando materiais elásticos estão sujeitos a ação de força em um de seus eixos, ele também deformará nos eixos ortogonais a este eixo. Assim, se ele está sob ação de uma força no sentido de seu comprimento, ele sofrerá um alongamento em seu comprimento e uma compressão em sua largura e espessura. As deformações em direção ao comprimento, a largura e a espessura do bloco são ϵ_l , ϵ_w e ϵ_t ; e l , w e t são o comprimento, largura e espessura inicial do bloco.

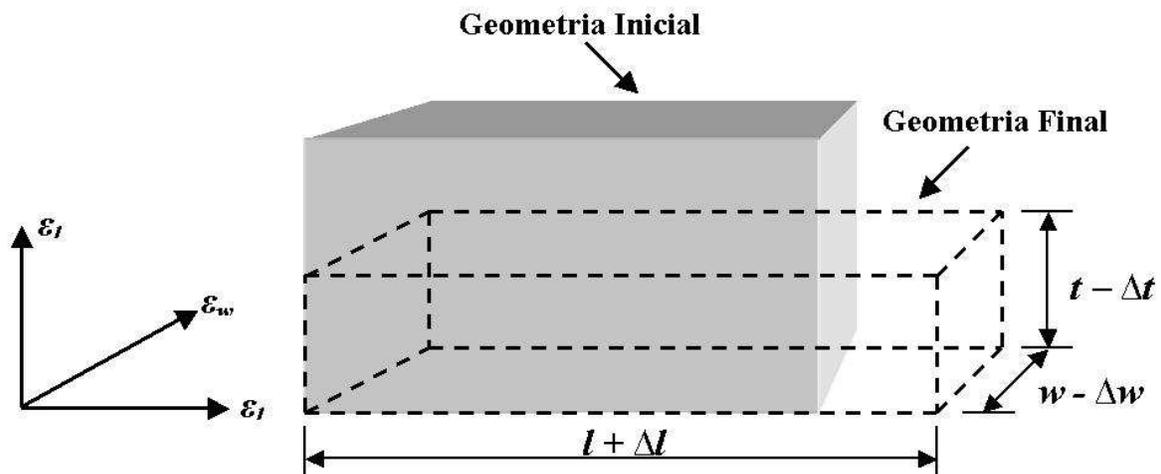


Figura 3.8 – Relação de Poisson: Deformação de um material elástico.

A Relação de Poisson (ν) é definida pela razão entre a deformação normal e a deformação transversa. Como, por definição,

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon_l \quad , \quad \frac{dw}{w} = \varepsilon_w \quad e \quad \frac{dt}{t} = \varepsilon_t, \quad (3.25)$$

então,

$$\nu = -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_l} = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad ou \quad \nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} = -\frac{S_{ij}}{S_{ii}}, \quad para \quad i \neq j = 1, 2 \quad ou \quad 3 \quad (3.26)$$

sendo que o sinal (-) indica que tanto a largura como a espessura sofrem uma compressão.

O Módulo de Rigidez (G) relaciona a deformação tangencial (γ_{ij}) com o estresse tangencial (τ_{ij}):

$$G = \frac{1}{2} \frac{\tau_{ij}}{\gamma_{ij}} = \frac{1}{S_{ij}}, \quad (3.27)$$

para $i \neq j = 4, 5$ ou 6 .

Considerando estes 3 parâmetros, a equação (3.22) pode ser representada na seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Esta matriz será usada como entrada do programa de simulação mecânica [26].

A Tabela 3.5 mostra algumas propriedades físicas do silício [4][27]. É importante lembrar que algumas destas propriedades, como o Módulo de Young e a Relação de Poisson, são propriedades anisotrópicas e, portanto, variam com a orientação.

Tabela 3.5 – Propriedades físicas do silício

Módulo de Young, orientação (100) (10^{12} dyn/cm ²)	Densidade (g/cm ³)	Condutividade Térmica (W/cm °C)	Relação de Poisson, orientação (100)	Ponto de Fusão (°C)	Constante <i>Lattice</i> (Å)	Coefficiente de Expansão Térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
1,6	2,3	1,57	0,28	1410	4,435	2,33

Até aqui, temos considerado uma análise mecânica do silício independente da orientação. Porém, é importante salientar que tanto os componentes de estresse como os de deformação são alterados pela orientação. Wortman e Evans [25] têm estudado a dependência dos coeficientes de elasticidade com a orientação para um sistema de coordenada arbitrária. Estes coeficientes podem ser calculados para qualquer orientação do cristal de acordo com a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Cálculo dos coeficientes de elasticidade para uma coordenada arbitrária

Coefficiente	Expressão	Coefficientes Análogos
$C'_{11} =$	$C_{11} + C_c (l_1^4 + m_1^4 + n_1^4 - 1)$	C'_{22}, C'_{33}
$C'_{12} =$	$C_{12} + C_c (l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2)$	C'_{13}, C'_{23}
$C'_{14} =$	$C_c (l_1^2 l_2 l_3 + m_1^2 m_2 m_3 + n_1^2 n_2 n_3)$	$C'_{36}, C'_{25}, C'_{24}, C'_{35}, C'_{26}, C'_{34}, C'_{16}, C'_{15}, C'_{46}, C'_{45}, C'_{56}$
$C'_{44} =$	$C_{44} + C_c (l_2^2 l_3^2 + m_2^2 m_3^2 + n_2^2 n_3^2)$	C'_{56}, C'_{66}
$S'_{22} =$	$S_{11} + S_c (l_2^4 + m_2^4 + n_2^4 - 1)$	S'_{11}, S'_{33}
$S'_{12} =$	$S_{12} + S_c (l_1^2 l_3^2 + m_1^2 m_3^2 + n_1^2 n_3^2)$	S'_{12}, S'_{23}
$S'_{14} =$	$2 S_c (l_1^2 l_2 l_3 + m_1^2 m_2 m_3 + n_1^2 n_2 n_3)$	$S'_{36}, S'_{25}, S'_{24}, S'_{35}, S'_{26}, S'_{34}, S'_{16}$
$S'_{56} =$	$4 S_c (l_1^2 l_2 l_3 + m_1^2 m_2 m_3 + n_1^2 n_2 n_3)$	S'_{46}, S'_{45}
$S'_{55} =$	$S_{44} + 4 S_c (l_3^2 l_1^2 + m_3^2 m_1^2 + n_2^2 n_1^2)$	S'_{44}, S'_{66}

Os coeficientes S'_{ij} e C'_{ij} representam os coeficientes rotacionados para uma determinada orientação e l , m e n são os co-senos da direção. Para a Tabela 3.6, as seguintes equivalências são válidas:

$$\begin{aligned} C'_{ij} &= C'_{ji}, & S'_{ij} &= S'_{ji}, \\ C_c &= C_{11} - C_{12} - 2C_{44}, & S_c &= S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2}S_{44}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Os coeficientes de elasticidades também podem ser dependentes com a temperatura. Contudo, para materiais anisotrópicos e para uma faixa de temperatura entre 150 Kelvin (K) e 1000 K, podemos considerar que estes coeficientes são praticamente independentes com a temperatura. Para esta faixa de temperatura, há uma variação do módulo de elasticidade de apenas $-90 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [3].

Portanto, para um projeto adequado de um sensor mecânico em silício, a orientação do sensor no plano cristalográfico do silício é de fundamental importância para maximização de sua sensibilidade.

CAPÍTULO 4

Piezoefeitos e o Efeito Piezorresistivo Transversal em Silício

Sensores baseados na tecnologia MEMS e os sensores inteligentes (*smart sensors*) são os atrativos das indústrias de desenvolvimento de sensores [2]. Tecnologias MEMS permitem a miniaturização dos sensores e a integralização destes com circuitos eletrônicos. Devido às boas propriedades elétricas e mecânicas do silício, este material tem sido usado desde a década 60 no campo de sensores [28]. O silício possui também alguns piezoefeitos que são favoráveis para a fabricação de diversos tipos de sensores.

Piezoefeitos relacionam a influência da ação mecânica na mudança das propriedades do material. Os piezoefeitos em silício são: o de piezojunção, o piezorresistivo, o piezo-MOS, o de piezotunelamento e o piezo-Hall [3]. Segue uma breve discussão de cada um destes piezoefeitos.

4.1 – Breve Introdução aos Piezoefeitos em Silício

4.1.1 – O Efeito de Piezojunção

O efeito de piezojunção descreve como o estresse mecânico afeta a corrente de saturação reversa de um transistor bipolar ou de uma junção p-n [3]. Este efeito foi descoberto em 1951, mas somente na década de 60 é que ele foi realmente investigado. Este efeito tem muitas similaridades com o efeito piezorresistivo e foi utilizado em sensores mecânicos por quase 40 anos. Contudo, estes sensores eram facilmente danificados e, portanto, não se tornaram muito populares [29].

Comparados a sensores baseados no efeito piezorresistivos, os sensores de efeito de piezojunção apresentam um mais baixo consumo de potência e tamanho reduzido necessitando de uma menor área de *chip* [29]. Por outro lado, apresentam uma alta deriva térmica.

4.1.2 – O Efeito Piezorresistivo

O efeito piezorresistivo descreve como a resistividade de um material é influenciada pelo estresse mecânico aplicado a este material [3]. Descoberto em 1954 por Smith [15], o efeito piezorresistivo é muito maior em semicondutores, tais como: o silício e o germânio, do que em condutores metálicos, como será analisado posteriormente neste capítulo.

Este piezoefeito tem sido a técnica de transdução mecânica mais utilizada em sensores de pressão de silício. A maioria destes sensores consistem de resistores, difundidos na forma de uma Ponte de Wheatstone, sobre uma membrana [30]. Contudo, uma nova topologia destes sensores vem sendo investigada. Esta topologia é baseada em piezorresistores de 4-terminais [11,13,16,17,18].

Sensores baseados no efeito piezorresistivo apresentam boa sensibilidade e linearidade [31]. Por outro lado, apresentam um alto consumo de potência, ocupam grande área e são afetados pelo descasamento entre componentes, principalmente quando os piezorresistores são dispostos em Ponte de Wheatstone. O estudo de uma nova topologia de sensor de pressão baseado neste piezoefeito é a principal motivação deste trabalho.

4.1.3 – O Efeito Piezo-MOS

A corrente de dreno de transistores MOS é determinada pela resistividade do canal. O efeito piezo-MOS descreve como o estresse mecânico modifica a corrente de dreno através da mudança da mobilidade. Este efeito tem características (anisotropia, deriva térmica) similares ao efeito piezorresistivo, no entanto ele trata da variação, induzida pelo estresse mecânico, na mobilidade dos portadores da camada invertida.

Atualmente, sensores de pressão têm usado este piezoefeito como técnica de transdução mecânica [32]. Estes sensores apresentam um baixo consumo de potência, mas um alto *offset*.

4.1.4 – O Efeito de Piezotunelamento

Considerando um diodo com uma junção lateral, altamente dopada e polarizada reversamente, a corrente reversa, que flui através desta junção, é dominada pelo tunelamento banda-a-banda. Sob uma deformação induzida, este tunelamento depende do estresse, sendo que este modifica a corrente reversa na junção lateral.

Embora o fator *gauge* deste tipo de sensor seja ao redor de 4 vezes mais baixo do que o fator *gauge* de um piezorresistor [3], a mudança da sensibilidade devido à temperatura é aproximadamente uma ordem de magnitude menor do que aquela de piezorresistores convencionais [33]. Este tipo de sensor também precisa de uma etapa a mais de processo para gerar a junção altamente dopada.

4.1.5 – O Efeito Piezo-Hall

Descoberto por E. H. Hall em 1879, o efeito Hall é um efeito físico que ocorre em materiais que conduzem corrente na presença de um campo magnético [34]. O transporte de portadores de carga na presença de um campo magnético é calculado através da mobilidade Hall. A mobilidade Hall é dependente do estresse mecânico presente no material semiconductor. Esta dependência é descrita pelo efeito Piezo-Hall.

Normalmente o efeito piezo-Hall não é utilizado em sensores de pressão. Por outro lado, este efeito é o responsável pelo grande *offset* presente em sensores Hall microeletrônicos [34]. As vantagens dos sensores Hall são: simplicidade na fabricação e coeficiente de baixa temperatura da sensibilidade devido à variação da corrente [34].

Para o domínio mecânico, os efeitos de piezojunção, o efeito piezorresistivo e o efeito piezo-MOS são os mais utilizados. O sensor apresentado neste trabalho é baseado no efeito piezorresistivo através do chamado efeito piezorresistivo transversal em silício. Uma

das principais características deste sensor é a forte dependência de sua sensibilidade com sua geometria. Esta dependência esta também presente nos dispositivos Hall. Apresentamos, a seguir, uma revisão mais detalhada sobre os efeitos piezo-Hall e piezorresistivo.

4.2 – Estudo Analítico do Efeito Piezo-Hall

Sensores baseados no efeito Hall, assim como sensores baseados no efeito piezorresistivo, como aqueles estudados por Bao e Gridchin *et al*, têm sua sensibilidade dependente da sua geometria. Esta dependência é semelhante a ambos os sensores, mesmo quando diferentes piezoefeitos estão envolvidos.

Popovic apresentou um estudo matemático desta dependência para um dispositivo Hall com geometria retangular [34]. Com relação ao sensor de pressão apresentado neste trabalho, a geometria do sensor será um caso particular daquela estudada por Popovic. Desta forma, podemos extrapolar o resultado daquela dependência obtido por Popovic para o nosso trabalho. Desta forma, se torna conveniente, o estudo analítico do efeito piezo-Hall.

4.2.1 - A Placa Hall

Uma placa Hall é formada por sua área ativa e por suas áreas de contatos. A área ativa é toda região do dispositivo que não leva em consideração as regiões de contato. O Efeito Hall descreve a influência de um campo magnético em um fluxo de corrente elétrica [34]. Para exemplificar, consideramos a placa Hall retangular, conforme mostrada na Figura 4.1.

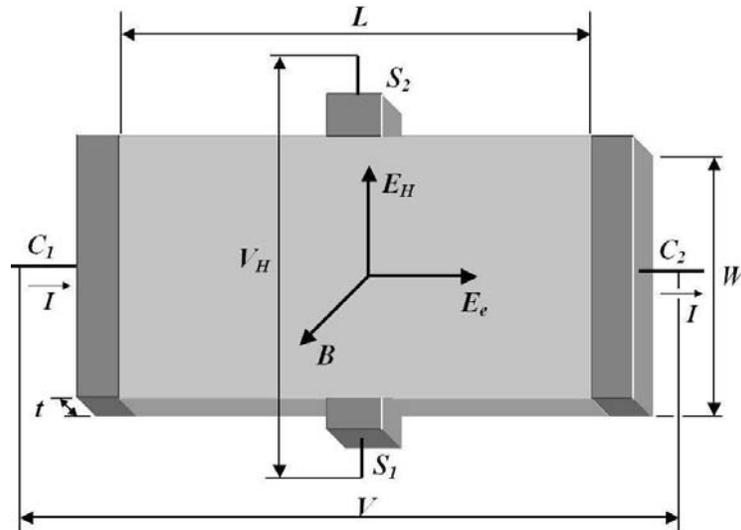


Figura 4.1 – Placa Hall retangular.

Os parâmetros L , W e t são as dimensões da área ativa da placa: comprimento, largura e espessura, respectivamente. C_1 e C_2 são os contatos-corrente e S_1 e S_2 são os contatos-sensor. A tensão de polarização (V) cria um campo elétrico \vec{E}_e e força uma corrente I entre os contatos-corrente. Se a placa está sob ação de um campo magnético \vec{B} perpendicular ao plano da placa, um campo elétrico \vec{E}_H aparece entre os contatos-sensor. Este campo elétrico é dado por:

$$\vec{E}_H \square \mu [\vec{E}_e \times \vec{B}], \quad (4.1)$$

sendo μ a mobilidade do portador. O campo magnético \vec{B} introduz um ângulo entre o campo elétrico total e os vetores de densidade de corrente. Este ângulo é chamado de ângulo Hall (Θ_H) e é dado por:

$$\Theta_H \square \arctan(\mu \vec{B}). \quad (4.2)$$

Na presença de campos magnéticos fracos, a equação (4.2) é reduzida a:

$$\Theta_H \square \mu \vec{B}. \quad (4.3)$$

O campo elétrico \vec{E}_H faz surgir entre os contatos-sensor uma tensão \vec{V}_H . Esta tensão é chamada de tensão Hall. Ela pode ser calculada integrando o campo elétrico Hall na distância entre os contatos sensor. \vec{V}_H é então dada por:

$$\vec{V}_H = \int_{S_1}^{S_2} \vec{E}_H \cdot \vec{dW}, \quad (4.4)$$

sendo S_1 e S_2 os contatos-sensor e \vec{dW} uma parte diferencial de W . Integrando (4.4) entre a distância que separa S_1 de S_2 , temos que V_H é dado por:

$$V_H = E_H W \quad (4.5)$$

O campo elétrico \vec{E}_e pode ser escrito como:

$$\vec{E}_e = \frac{V}{L}. \quad (4.6)$$

Substituindo (4.5) e (4.6) em (4.1), obtemos a tensão Hall que é dada por:

$$V_H = \mu \frac{W}{L} V \vec{B}. \quad (4.7)$$

A equação (4.7) é suficiente para quantificar a tensão Hall de uma placa Hall ideal, ou seja, a placa retangular é muito longa ($L \rightarrow \infty$) e seus contatos-sensor são bem pequenos (S_1 e $S_2 \rightarrow 0$) [34]. Nesta configuração, a influência da geometria do dispositivo em sua sensibilidade é minimizada.

Devido à obtenção da placa infinita com contatos-sensor pontuais ser impraticável, para aplicações práticas, diferentes tipos de geometrias e tamanhos de contatos são utilizados.

O chamado Fator de Correção Geométrico (G) é um parâmetro usado para quantificar aquela dependência para vários tipos de geometrias. Então, a equação (4.7) pode ser escrita em função do fator G como segue:

$$V_H = \mu \frac{W}{L} V \vec{B} G. \quad (4.8)$$

Este fator quantifica os efeitos de curto-circuito causados pelos contatos ôhmicos dos contatos-sensor e do efeito de alinhamento das linhas equipotenciais causado pelos contatos-corrente. Como será revisado posteriormente, condutores ou semicondutores que estão polarizados por uma fonte de tensão ou corrente, possuem, perpendicularmente às suas linhas de densidade corrente, linhas equipotenciais. Quando os contatos-sensor não são pontuais, estes contatos curto-circuitam linhas equipotenciais adjacentes diminuindo a tensão de saída do sensor. Desta forma, o fator G é um fator limitante que varia de 0 a 1 ($0 < G < 1$) [34].

Para uma placa retangular relativamente longa ($L > 1,5$) e contatos-sensor relativamente pequenos ($S/W < 0,18$) sob um campo magnético fraco, o fator G pode ser aproximado pela seguinte equação [35]:

$$G_{ret} = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi L}{2W}\right) \right] \left[1 - \frac{2S}{\pi W} \right], \quad (4.9)$$

sendo G_{ret} o fator de correção geométrico para um dispositivo retangular longo e S é a largura dos contatos-sensor (S_1 e S_2).

4.3 – Estudo Analítico do Efeito Piezorresistivo

A partir da formulação do efeito piezorresistivo por Smith em 1954 [15], este efeito tem sido estudado extensivamente até hoje. Materiais que apresentam este efeito têm sua resistividade alterada quando sob ação de um estresse mecânico. Para exemplificar, consideramos um condutor retangular, conforme mostrado na Figura 4.2.

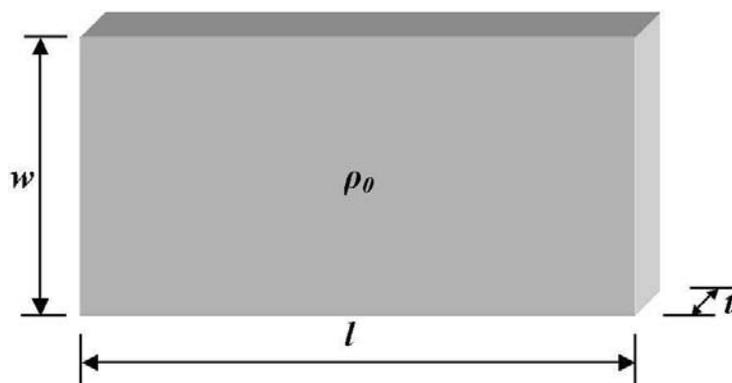


Figura 4.2 – Dimensões de um condutor retangular.

A resistência (R) deste condutor retangular é dada por:

$$R = \rho_0 \frac{l}{A} = \rho_0 \frac{l}{wt}, \quad (4.10)$$

sendo que l , w e t são o comprimento, a largura e a espessura do condutor, respectivamente; ρ_0 é a resistividade do material e A é a área do condutor. Se este condutor está sob ação de um estresse mecânico σ , a mudança relativa na resistência é dada por:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta \rho}{\rho_0}. \quad (4.11)$$

O Fator *Gauge* (F_G) é dado pela equação (2.2), como sendo:

$$F_G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_l}, \quad (4.12)$$

sendo que $\varepsilon_l = \Delta L/L$ é a deformação, como visto em (3.25).

Substituindo (3.26) em (4.11) e, então, em (4.12), F_G pode ser expresso como:

$$F_G = (1 + 2\nu) \varepsilon_l + \frac{\Delta \rho}{\rho_0}. \quad (4.13)$$

O termo relacionado a ε_l representa a mudança na resistência do material devido a mudanças dimensionais do condutor (efeito geométrico). Já o último termo representa a mudança relativa na resistividade. O efeito piezorresistivo em metais e semicondutores difere basicamente que o primeiro é governado pelas variações dimensionais (efeito geométrico) e o segundo é governado pela variação na resistividade, que é aproximadamente duas ordens de grandeza maior que as variações dimensionais. Desta forma, enquanto o fator *gauge* de metais é pouco maior que a unidade variando de 1 a 2, em semicondutores F_G varia de -140 até $+180$.

Para semicondutores, o efeito geométrico pode ser desprezado. Desta forma, a equação (4.11) pode ser simplificada para:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0}. \quad (4.14)$$

4.3.1 – Efeito Piezorresistivo Anisotrópico em Silício

O silício possui propriedades mecânicas e elétricas anisotrópicas quando estressado mecanicamente, ou seja, estas propriedades são dependentes da orientação cristalográfica do material (ver seção 3.2.4).

A variação relativa da resistividade do silício pode ser calculada através dos coeficientes piezorresistivos e do estresse mecânico aplicado a ele. Estes coeficientes piezorresistivos descrevem a mudança da resistividade relativa pelo estresse induzido, como segue:

$$\frac{\Delta \rho_{ij}}{\rho_0} = \pi_{ijkl} \sigma_{kl} + \pi_{ijklmn} \sigma_{kl} \sigma_{mn}, \quad (4.15)$$

sendo que σ_{kl} e σ_{mn} são tensores de estresse de segunda ordem, π_{ijkl} e π_{ijklmn} são os coeficientes piezorresistivo de primeira e segunda ordem, respectivamente. Para níveis de estresse de até 200 MPa, os coeficientes de segunda ordem podem ser desconsiderados [36]. Através da somatória de Einstein, a equação (4.15) pode ser simplificada a:

$$\frac{\Delta \rho_{ij}}{\rho_0} = \pi_{ijkl} \sigma_{kl}. \quad (4.16)$$

Como já apresentado no capítulo 3, a estrutura cristalográfica do silício possui planos de simetria. Isto faz com que os coeficientes piezorresistivos de primeira e segunda ordem da equação (4.15) se restrinjam a 3 e 9, respectivamente. Usando a convenção de simplificação de índices da Tabela 3.2, os coeficientes piezorresistivos de primeira ordem (CPRP) da equação (4.16) podem ser simplificados como apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Simplificação dos coeficientes piezorresistivos de primeira ordem para a estrutura cristalográfica de silício

CPRP (π_{ijkl})
$\pi_{11} = \pi_{22} = \pi_{33}$
$\pi_{12} = \pi_{21} = \pi_{13} = \pi_{31} = \pi_{23} = \pi_{32}$
$\pi_{44} = \pi_{55} = \pi_{66}$

O tensor de coeficientes π_{ijkl} é então simplificado da seguinte forma:

$$\pi_{ij} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

sendo que π_{11} , π_{12} e π_{44} são os coeficientes fundamentais de piezoresistência onde π_{11} é o chamado coeficiente longitudinal, π_{12} é o coeficiente transverso e π_{44} é o coeficiente *shear*. Estes coeficientes piezorresistivos são um conjunto de constantes obtidas empiricamente.

A Tabela 4.2 apresenta os valores destas constantes obtidas por Smith [15] e Matsuda [36] em temperatura ambiente para silício tipo p e n na direção [100].

Tabela 4.2 – Magnitudes dos coeficientes piezorresistivos em temperatura ambiente para silício tipo p e n

CPRP	Silício Tipo-p		Silício Tipo-n	
	Smith	Matsuda	Smith	Matsuda
	$[10^{-10} \text{ Pa}^{-1}]$			
π_{11}	0,7	-0,6	-10,2	-7,7
π_{12}	-0,1	0,1	5,3	3,9
π_{44}	13,8	11,2	-1,4	-1,4

Estes valores dos coeficientes de piezoresistência são válidos para certa condição de temperatura, concentração de impurezas e orientação cristalográfica. Para seus experimentos, Smith utilizou silício tipo-p de resistividade 7,8 Ωcm e tipo-n de 11,7 Ωcm , ambos em temperatura ambiente. Matsuda considerou silício tipo-p com uma concentração de impureza de $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ e o tipo-n de 10^{17} cm^{-3} . Esta dependência dos coeficientes piezorresistivos pela concentração de impurezas e temperatura foi estudada sistematicamente por Kanda *et al* [37] e Chun Cho *et al* [38]. Ambos mostram que estes coeficientes são inversamente proporcionais à temperatura e à concentração de impurezas.

Como os coeficientes de elasticidade do silício, os coeficientes piezorresistivos também são dependentes com a orientação cristalográfica do material. Para projeto de sensores de pressão piezorresistivo, piezorresistores devem ser projetados para maximização do efeito piezorresistivo. Para obter esta maximização do efeito, é importante conhecer os coeficientes piezorresistivos relacionados à orientação cristalográfica do material.

4.3.2 – Considerações para os coeficientes piezorresistivos em função de qualquer orientação cristalográfica.

A rotação dos coeficientes de piezoresistência para um sistema de coordenada arbitrária é feito através dos ângulos de Euler: ϕ , θ e ψ . A definição destes ângulos é dada de acordo com a Figura 4.3.

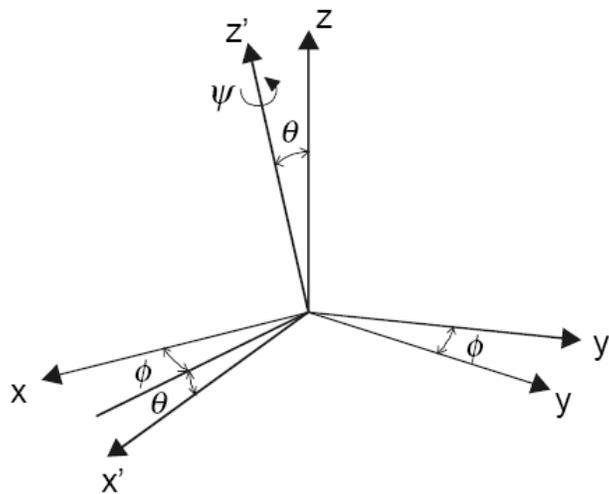


Figura 4.3 – Definição dos ângulos de Euler: ϕ , θ e ψ .

Se considerarmos o tensor dos coeficientes piezorresistivos de silício em um sistema de coordenada cartesiano alinhado com os eixos cristalográficos sendo π , o tensor dos coeficientes em um sistema de coordenada cartesiana fora do alinhamento cristalográfico π' é obtido através da equação (A.4) usando a matriz de transformação (A.3). Contudo, outras técnicas de transformação podem ser usadas, como aquelas apresentadas por C. S. Smith [39] e Minhang Bao *et al* [40].

Segundo Smith, a transformação de π em um sistema de coordenada arbitrário pode ser obtido por:

$$(\pi') = (\alpha)(\pi)(\alpha^{-1}), \quad (4.18)$$

sendo que α é a matriz de transformação de coordenada para um tensor de segunda ordem e α^{-1} é a sua inversa.

Para o cálculo de cada componente de π' , a seguinte equação é formulada baseada na equação (4.18):

$$\pi'_{ij} = \sum \alpha_{ik} \pi_{kl} \alpha_{lj}^{-1}, \quad (4.19)$$

sendo $i,j,k,l = 1,2,3$. As componentes α_{ik} e α_{ij}^{-1} formam uma matriz [6 x 6] dadas por:

$$\alpha = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2m_1n_1 & 2n_1l_1 & 2l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 & 2l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 & 2l_3m_3 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 & m_2l_3 + m_3l_2 \\ l_3l_1 & m_3m_1 & n_3n_1 & m_3n_1 + m_1n_3 & n_3l_1 + n_1l_3 & m_3l_1 + m_1l_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & m_1n_2 + m_2n_1 & n_1l_2 + n_2l_1 & m_1l_2 + m_2l_1 \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

e,

$$\alpha^{-1} = \begin{bmatrix} l_1^2 & l_2^2 & l_3^2 & 2l_2l_3 & 2l_3l_1 & 2l_1l_2 \\ m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 & 2m_2m_3 & 2m_3m_1 & 2m_1m_2 \\ n_1^2 & n_2^2 & n_3^2 & 2n_2n_3 & 2n_3n_1 & 2n_1n_2 \\ m_1n_1 & m_2n_2 & m_3n_3 & m_2n_3 + m_3n_2 & m_3n_1 + m_1n_3 & m_1n_2 + m_2n_1 \\ n_1l_1 & n_2l_2 & n_3l_3 & n_2l_3 + n_3l_2 & n_3l_1 + n_1l_3 & n_1l_2 + n_2l_1 \\ l_1m_1 & l_2m_2 & l_3m_3 & m_2l_3 + m_3l_2 & m_3l_1 + m_1l_3 & m_1l_2 + m_2l_1 \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

sendo l , m e n os co-senos de direção dos vetores de direção das coordenadas arbitrárias dados pelos ângulos de Euler [Apêndice A].

A equação (4.19) pode ser também formulada usando o método de derivação proposto por Minhang Bao *et al* [40]. Por este método, a equação (4.19) é reescrita como:

$$\pi'_{ij} = \pi_{ij} + k_{ij}(\pi_{11} - \pi_{12} + \pi_{44}), \quad (4.22)$$

sendo que k_{ij} é uma matriz [6 x 6], mas com somente 15 componentes, como segue:

$$k = \begin{bmatrix} -2(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + l_1^2 n_1^2) & k_{12}=k_{21} & k_{13}=k_{31} & k_{14}=2k_{41} & k_{15}=2k_{51} & k_{16}=2k_{61} \\ l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2 & -2(l_2^2 m_2^2 + m_2^2 n_2^2 + l_2^2 n_2^2) & k_{23}=k_{32} & k_{24}=2k_{42} & k_{25}=2k_{52} & k_{26}=2k_{62} \\ l_1^2 l_3^2 + m_1^2 m_3^2 + n_1^2 n_3^2 & l_2^2 l_3^2 + m_2^2 m_3^2 + n_2^2 n_3^2 & -2(l_3^2 m_3^2 + m_3^2 n_3^2 + l_3^2 n_3^2) & k_{34}=2k_{43} & k_{35}=2k_{53} & k_{36}=2k_{63} \\ l_1^2 l_2 l_3 + m_1^2 m_2 m_3 + n_1^2 n_2 n_3 & l_2^3 l_3 + m_2^3 m_3 + n_2^3 n_3 & l_2 l_3^3 + m_2 m_3^3 + n_2 n_3^3 & k_{44}=2k_{32} & k_{45}=2k_{63} & k_{46}=2k_{52} \\ l_1^3 l_3 + m_1^3 m_3 + n_1^3 n_3 & l_1 l_2^2 l_3 + m_1 m_2^2 m_3 + n_1 n_2^2 n_3 & l_1 l_3^3 + m_1 m_3^3 + n_1 n_3^3 & k_{54}=2k_{63} & k_{55}=2k_{31} & k_{56}=2k_{41} \\ l_1^3 l_2 + m_1^3 m_2 + n_1^3 n_2 & l_1 l_2^3 + m_1 m_2^3 + n_1 n_2^3 & l_1 l_2 l_3^2 + m_1 m_2 m_3^2 + n_1 n_2 n_3^2 & k_{64}=2k_{52} & k_{65}=2k_{41} & k_{66}=2k_{21} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

4.4 – Aspecto Físico do Efeito Piezorresistivo

Do ponto de física físico, o efeito piezorresistivo é explicado pela teoria de mecânica quântica. Esta teoria atribui números de ondas k 's para as componentes do movimento do elétron em cada direção (x , y , z). Geralmente, estas ondas são denominadas de k_1 , k_2 e k_3 nas direções 1, 2 e 3 [5]. Em materiais como o silício, o elétron precisa de uma energia mínima para se manter na banda de condução através de diferentes combinações de k_1 , k_2 e k_3 . Estas combinações, também chamadas de pontos de limite de banda (PLB), descrevem uma superfície de energia constante ao redor daquele ponto e podem ser representadas no espaço-k.

Uma família dessas superfícies, centrada em um ponto de limite de banda, representa um vale de energia no espaço-k. Estas famílias são todas elipsóides de revolução [24]. Devido à simetria da estrutura cristalográfica de silício, este material possui vários vales para uma mesma direção. Em consequência, este modelo de vale de energia é dito ser um *modelo de vales múltiplos*, conforme Figura 4.4a.

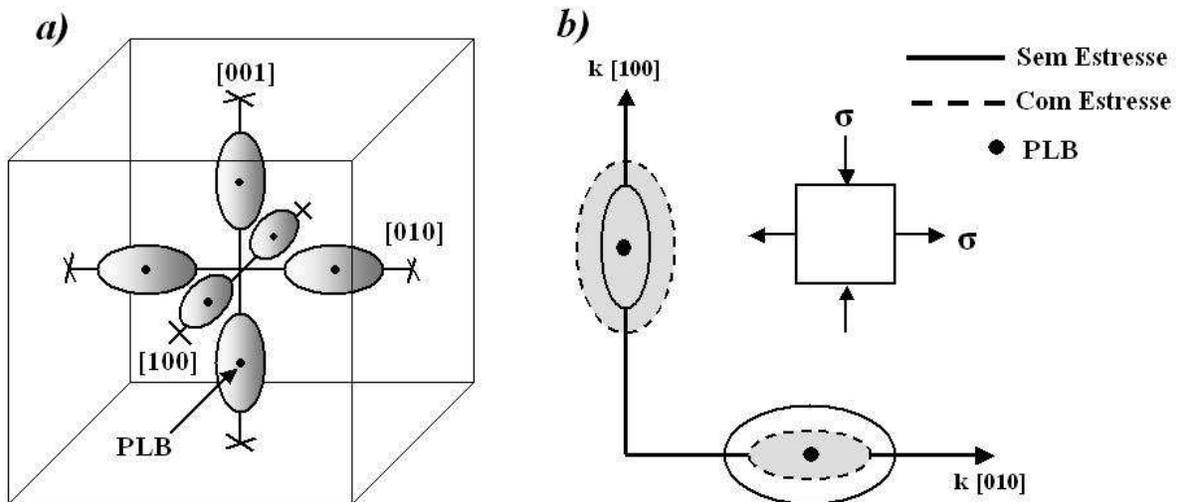


Figura 4.4 – Representação gráfico no espaço-k para: a) o modelo de vales múltiplos e b) 2 vales de silício tipo-n alinhados com os eixos [100].

A Figura 4.4b mostra 2 dos 6 vales alinhados com as 6 direções $\langle 100 \rangle$ para o silício tipo-n. As componentes de massa efetiva e mobilidade de elétrons nestes vales são diferentes nas 3 direções principais. A mobilidade é mais baixa na direção do vale (direções $\langle 100 \rangle$) e mais alta na direção normal a esta do vale. Assim, estes elétrons causam uma contribuição anisotrópica na condutividade total do material. No caso do silício não-estressado mecanicamente, onde todos os elipsóides têm as mesmas propriedades e todos os vales são igualmente preenchidos com elétrons, a condutividade é isotrópica.

Quando um estresse uniaxial é aplicado nas direções [100], os limites de banda para os 4 vales nos eixos [010] e [001] descem e aqueles nos eixos [100] sobem. Se o material está sob tração na direção de um vale, os elétrons são removidos deste vale e transferidos aos vales que são perpendiculares à tração. Já a compressão tem o efeito oposto. Na Figura 4.4b, a linha pontilhada indica vale sob ação de estresse e a linha contínua indica vale sem ação de estresse.

Quanto mais o estresse afeta a simetria da estrutura do vale, maior é o efeito piezorresistivo produzido. No silício tipo-n, os vales estão alinhados com as direções $\langle 100 \rangle$ o que explica porque o coeficiente piezorresistivo π_{11} é maior neste tipo de silício. No caso de um estresse na direção $\langle 111 \rangle$, o efeito é muito pequeno sendo que esta direção é simétrica aos 3 vales.

Para silício tipo-p, o modelo de vales múltiplos mostra ser pouco exato e suas superfícies de energia são muito complexas. Contudo, algumas conclusões podem ser feitas baseadas naquele modelo. Os coeficientes de piezoresistência são imaginados estarem em 4 vales, um em cada direção $\langle 111 \rangle$. Conseqüentemente, um estresse nesta direção resultaria em um alto coeficiente π_{44} . Para mais detalhes do estudo físico do efeito piezorresistivo consultar [5], [15] e [31].

4.5 – Efeito Piezorresistivo Transversal

Para o entendimento do efeito piezorresistivo transversal é conveniente estudarmos o comportamento das linhas de densidade de corrente e das linhas equipotenciais em um condutor.

4.5.1 – Revisão de Conceitos sobre Linhas de Corrente e Linhas Equipotenciais para um Material com Condutividade Isotrópica

Uma carga elétrica q_0 , em um espaço qualquer, distante de outra carga q sofrerá ação de forças eletrostáticas. A região que envolve a carga-teste q_0 é denominada de campo elétrico [41]. Se q_0 é uma carga positiva, aparecerá uma força \vec{F} nesta carga, como mostrada Figura 4.5.

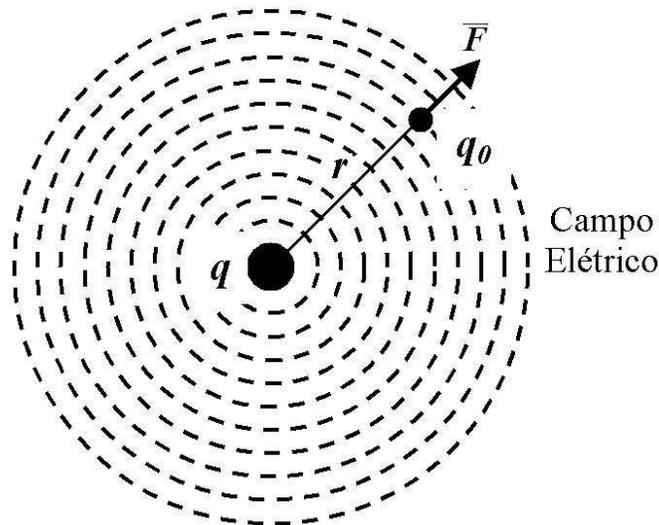


Figura 4.5 – Representação de uma região de campo elétrico.

Esta força por unidade de carga é chamada de campo elétrico. O campo elétrico é uma grandeza vetorial desde que a força é também vetorial. O vetor campo elétrico ou intensidade do campo elétrico no ponto onde está a carga-teste é definido como:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}, \quad (4.24)$$

sendo que q_0 indica a carga-teste, \vec{F} é a força que atua sobre ela e \vec{E} é o vetor campo elétrico. A unidade de medida do campo elétrico no Sistema Internacional (SI) é Newton por Coloumb (N/C). A força eletrostática sofrida por q_0 devido à somente uma carga q é dada por:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0q}{r^2}, \quad (4.25)$$

sendo que ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo e r a distância entre as cargas elétricas q e q_0 . Como \vec{F} é uma função da distância do centro da carga e \vec{E} sendo proporcional a \vec{F} , \vec{E} tende a zero quando r tende ao infinito.

A notação de linhas de força, introduzida por Faraday, é um procedimento conveniente para visualização e análise de campos elétricos. O sentido das linhas de força é, em todos os pontos, o mesmo do campo elétrico. O número de linhas por unidade de área da seção transversal das linhas de força é proporcional a magnitude da intensidade do campo elétrico. Assim, para campos elétricos intensos, há uma maior quantidade de linhas de força. O efeito é inverso pra campos elétricos fracos. A Figura 4.6a mostra algumas linhas de força para uma carga puntiforme.

O campo elétrico pode também ser descrito em função do potencial. A diferença de potencial elétrico entre dois pontos quaisquer é o trabalho que deve ser feito para mover, sem aceleração, uma carga elétrica unitária entre aqueles dois pontos. Se A e B são estes pontos, a diferença de potencial é dada por:

$$V_A - V_B = \frac{\vec{W}_{AB}}{q_0}, \quad (4.26)$$

sendo que V_B e V_A são os potenciais em B e A , respectivamente. \bar{W}_{AB} é o trabalho entre os pontos A e B e q_0 é a carga elétrica unitária.

O trabalho efetuado por uma força \bar{F} para deslocar a partícula de uma distância \bar{dl} é:

$$\bar{W} = \int \bar{F} \cdot \bar{dl}, \quad (4.27)$$

sendo que \bar{F} é uma força externa dada por:

$$F_{ext} = -q_0 \vec{E}, \quad (4.28)$$

visto que o sinal (-) indica que a força externa deve balancear a força elétrica para evitar a aceleração.

Substituindo a equação (4.28) em (4.27) e esta na equação (4.26), temos que a diferença de potencial entre dois pontos A e B em função da intensidade de campo elétrico é:

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot \bar{dl}. \quad (4.29)$$

Note que pela equação (4.29), a unidade do campo elétrico é o volt por metro (V/m).

Pelas equações (4.24) e (4.25), nota-se que o campo elétrico é uma função da distância entre duas cargas. Sendo o potencial uma função de \vec{E} , o potencial elétrico também depende daquela distância. Como esta distância é em relação ao centro de uma carga, todos os pontos distantes do centro formam linhas equipotenciais circulares em torno desta carga. Como a diferença de potencial entre dois pontos em uma linha equipotencial é zero, nenhum trabalho é necessário para mover uma carga nesta linha. Para o trabalho ser zero, o produto escalar ($\vec{E} \cdot \bar{dl}$) na equação (4.29) deve ser zero. Isto somente é possível se a linha equipotencial é perpendicular ao vetor campo elétrico. Em consequência, as linhas equipotenciais são perpendiculares as linhas de força, conforme mostradas na Figura 4.6b.

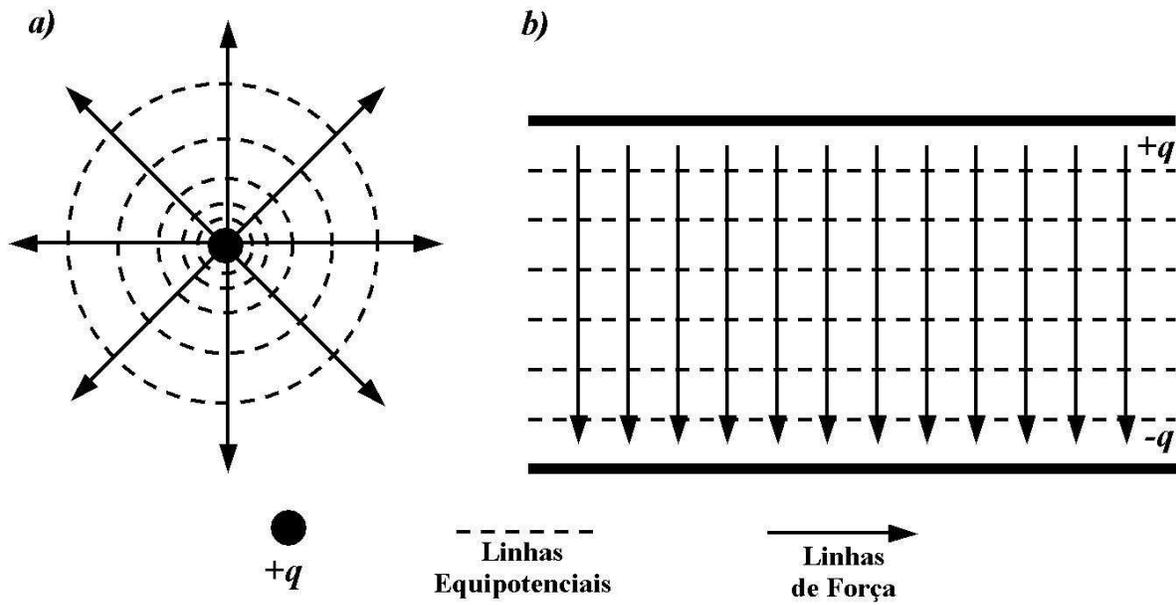


Figura 4.6 – Representação de linhas de força e de linhas equipotenciais para: a) uma carga puntiforme e b) um campo elétrico uniforme.

A Figura 4.6a representa linhas de força e linhas equipotenciais para uma carga puntiforme. Note que próximo à carga $+q$, as linhas equipotenciais estão mais próximas do centro significando que o potencial elétrico é mais intenso quanto mais próximo a carga. Conforme ele se distancia da carga, linhas equipotenciais adjacentes tornam-se mais espaçadas desde que o potencial diminui com o aumento da distância. A Figura 4.6b representa as linhas de força e linhas equipotenciais para um campo elétrico uniforme entre duas placas paralelas carregadas com cargas opostas. Observe que as linhas de força que representam o campo elétrico são sempre perpendiculares as linhas equipotenciais.

O campo elétrico pode também ser descrito em função da densidade de corrente elétrica. Para condutores metálicos, a Lei de Ohm que relaciona a corrente elétrica e o potencial elétrico através de uma constante de proporcionalidade, é dada por:

$$V = RI, \quad (4.30)$$

sendo que V é o potencial elétrico, I a corrente elétrica e R é a constante de proporcionalidade denominada de resistência.

A resistência de um condutor é dada pela equação (4.10). Substituindo esta equação na equação (4.30), obtemos a densidade de corrente:

$$\vec{J} = \frac{I}{A} = \frac{V}{l} \frac{1}{\rho_0}, \quad (4.31)$$

sendo que I/A (ampere por área) é a densidade de corrente \vec{J} , V/l (volt por metro) é o campo elétrico \vec{E} e ρ_0 é a resistividade do material. Como o campo elétrico é uma grandeza vetorial, a densidade de corrente também é e a equação (4.31) pode agora ser reescrita como:

$$\vec{E} = \rho_0 \vec{J}, \quad (4.32)$$

A densidade de corrente pode ser escrita em função do campo elétrico invertendo-se a equação (4.32):

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho_0} \vec{E} = \kappa \vec{E}; \quad (4.33)$$

sendo que κ é a condutividade do material.

Como o campo elétrico é representado pelas linhas de força, pela equação (4.32) podemos dizer que as linhas de densidade de corrente seguem a direção das linhas de força. Conseqüentemente, as linhas de corrente são também perpendiculares às linhas equipotenciais. Se considerarmos um condutor com condutividade isotrópica, onde uma fonte de corrente constante é aplicada entre os terminais 1 e 2, as linhas de densidade de corrente, as linhas equipotenciais e o campo elétrico podem ser representados como na Figura 4.7a. A Figura 4.7b mostra os vetores campo elétrico e densidade de corrente posicionados no centro do condutor.

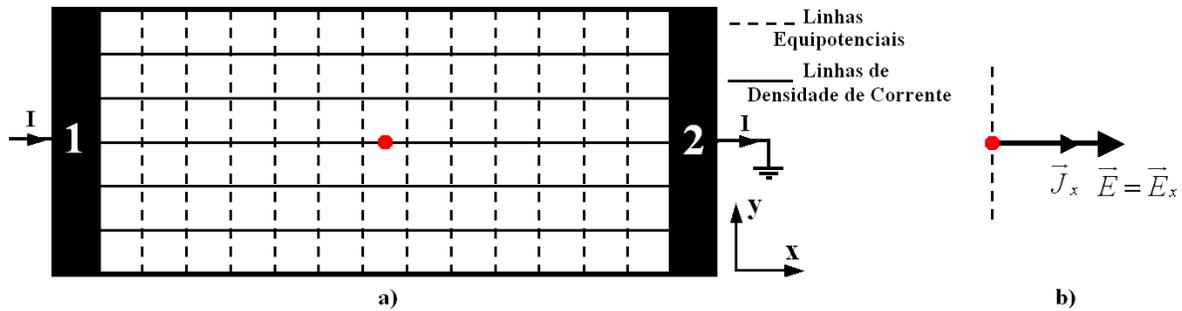


Figura 4.7 – Condutor com condutividade isotrópica: a) Comportamento das linhas equipotenciais e linhas de densidade de corrente e b) Comportamento do campo elétrico no centro do condutor.

Como há uma fonte de cargas elétricas entre os terminais 1 e 2, as linhas de densidade de corrente estão no mesmo sentido da fonte de cargas elétricas. Sendo que os contatos ôhmicos (terminais 1 e 2) estão separados por uma distância na direção x , temos então uma densidade de corrente \vec{J}_x e um campo elétrico \vec{E}_x também na direção x . Desde que a condutividade deste condutor é isotrópica, as linhas de densidade de corrente na direção x estão perpendiculares às linhas equipotenciais e, portanto, o campo elétrico total \vec{E} é igual ao campo elétrico \vec{E}_x . Como os terminais deste condutor comportam-se como placas carregadas eletricamente, o comportamento das linhas equipotenciais e das linhas de força deste condutor é esperado ser como o mostrado na Figura 4.6b.

4.5.2 – Efeito Piezorresistivo Transversal em Silício

Até aqui analisamos o comportamento das linhas de densidade de corrente, das linhas de força e das linhas equipotenciais em condutores que apresentam condutividade isotrópica. Contudo, há certos tipos de materiais, como o silício, que, sob certas condições, podem apresentar uma condutividade anisotrópica.

Discutimos na seção 4.4 sobre alguns aspectos da condutividade anisotrópica do silício monocristalino quando na presença de estresse mecânico. Quando o silício está livre de estresse, sua condutividade é isotrópica e as linhas de densidade de corrente são perpendiculares às linhas equipotenciais, como mostrado na Figura 4.7a. Contudo, quando o silício está sob ação de estresse, a simetria da rede cristalina é quebrada e sua condutividade passa a ser anisotrópica. Desta forma, o comportamento das linhas

equipotenciais com relação às linhas de densidade de corrente deve ser estudado com mais detalhe.

Para este estudo, consideramos um condutor retangular de silício sob estresse em um sistema de coordenada (x, y) , conforme mostrado na Figura 4.8a. Consideramos também que entre os terminais 1 e 2 está sendo aplicada uma fonte de corrente constante. A Figura 4.8b mostra os vetores campo elétrico e densidade de corrente posicionados no centro do condutor.

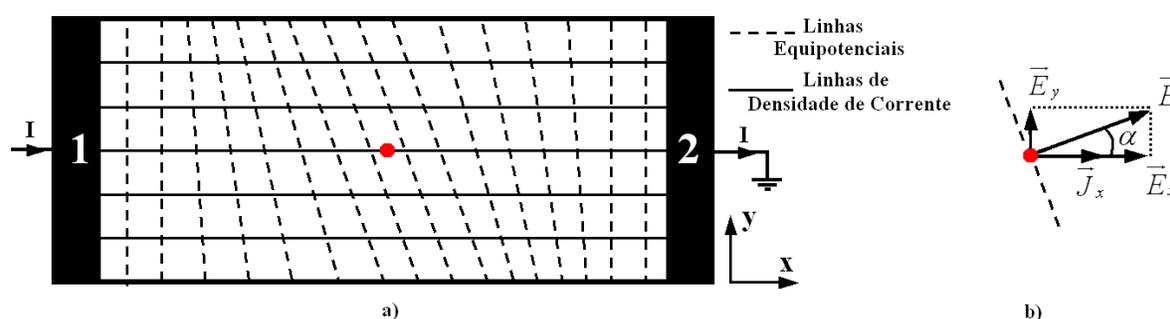


Figura 4.8 – Condutor com condutividade anisotrópica: a) Comportamento das linhas de densidade de corrente e linhas equipotenciais e b) Comportamento do campo elétrico no centro do condutor.

Quando sob ação de estresse, o silício não apresenta mais uma simetria cúbica. Devido a uma resistividade anisotrópica deste condutor, o campo elétrico total \vec{E} não é mais paralelo a linhas de densidade de corrente \vec{J} . Este campo elétrico pode ser decomposto em duas componentes: \vec{E}_x e \vec{E}_y . Isto faz com que as linhas equipotenciais não estejam mais perpendiculares as linhas de densidade de corrente, mas inclinadas por um ângulo α . Este ângulo é o ângulo entre a densidade de corrente \vec{J}_x e o campo elétrico total \vec{E} . Devido à similaridade deste efeito com o efeito piezo-Hall, o ângulo α pode ser denominado de um ângulo análogo-mecânico do ângulo Hall.

Sensores de pressão baseados no efeito piezorresistivo transversal possuem, ao menos, outros 2 contatos ôhmicos opostos posicionados na borda da placa e equidistantes dos terminais 1 e 2. Estes terminais medem uma diferença de potencial devido aos

desalinhamentos das linhas equipotenciais. Uma análise quantitativa deste tipo de sensor será detalhada no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

Estudo Analítico dos Sensores de Pressão Piezorresistivos baseados no Efeito Piezorresistivo Transversal em Silício

O efeito piezorresistivo em silício tem sido muito usado em sensores de pressão na forma de Ponte de Wheatstone (PW). Contudo, sensores de pressão de 4 terminais (FTPSs, do inglês *Four-Terminal Pressure Sensors*) têm sido, mais recentemente, empregados por projetistas de sensores no domínio mecânico [11, 12, 13, 17]. Sensores de pressão na forma de PW apresentam algumas desvantagens [6], tais como:

- Não-compacta. Em alguns projetos ainda são usados 4 resistores difundidos em cada região de concentração de estresse da membrana (ver Figura 2.3);
- Devido aos resistores estarem distantes, há, normalmente, um grande descasamento, contribuindo para o aumento do *offset*;
- Grande número de interconexões e grande área de metalização (Efeito Seebeck e Interferência Eletromagnética).

Embora o projeto dos FTPSs seja mais complexo do que os sensores em forma de PW, os FTPSs não apresentam estas desvantagens.

FTPSs são piezoelementos que possuem uma parte ativa chamada de região de espalhamento de corrente (REC), 2 contatos para medição do sinal de tensão de saída e outros 2 contatos de alimentação (polarização). Os primeiros são também chamados de contatos-sensor e os outros de contatos-corrente. A REC destes sensores pode ter várias formas geométricas. Contudo, as mais investigadas são [42][34]: as retangulares, as cruzes gregas ou cruzes de malta, as octógonas, as quadradas e as circulares, conforme mostradas na Figura 5.1.

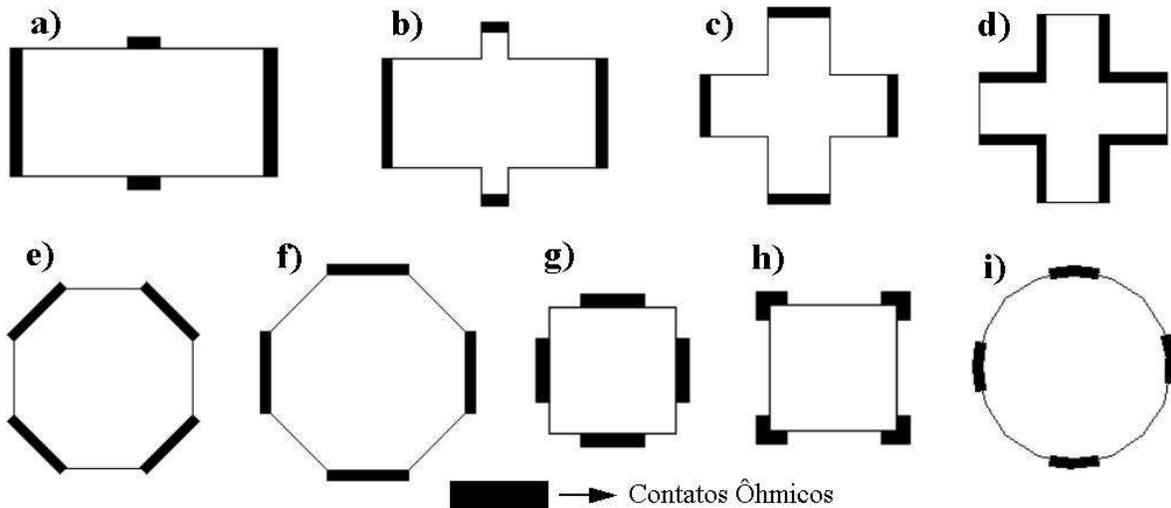


Figura 5.1 – Topologias da REC para um FTPS.

As topologias (a) e (b) são as RECs retangulares, (c) e (d) são as cruzeiras gregas, (e) e (f) são as octogonais, (g) e (h) são as RECs quadradas e (i) é a REC circular. Todas estas topologias possuem 4 contatos de metais (eletrodos) que formam seus 2 contatos-sensor e seus 2 contatos-corrente. Neste trabalho, porém, nós apresentamos uma nova topologia baseada em um sensor de pressão de multi-terminais (MTPSs, do inglês *Multi-Terminal Pressure Sensors*) que é derivada de topologias apresentadas na Figura 5.1.

Uma importante característica dos FTPSs é a dependência de seus parâmetros de saída na geometria de seus contatos (eletrodos) e na forma geométrica da REC. Em consequência, para uma análise precisa destes sensores, cálculos baseados somente na Lei de Ohm não são suficientes [17]. Condições de contorno na borda da REC devem também ser levadas em consideração.

Como já discutido nos capítulos anteriores, os coeficientes de elasticidade e o efeito piezorresistivo do silício variam com a orientação cristalográfica da lâmina de silício. Portanto, a sensibilidade destes sensores também é dependente de sua localização e de sua orientação no plano cristalográfico do silício. Outras características como o tipo de silício (p ou n), concentração de impurezas e a geometria da membrana também são de grande importância.

Como os MTPSs são derivados dos FTPSs, nós inicialmente analisamos analiticamente os FTPSs e, então, estendemos este estudo aos MTPSs. Primeiro, contudo, analisaremos as condições de contorno destes sensores.

5.1 - Condições de Contorno

Devido aos contatos do FTPS, tanto os contatos-sensor como os contatos-corrente, serem eletrodos de metais, eles fornecem uma região de baixa resistência para as linhas equipotenciais. Esta baixa resistividade dos eletrodos faz com que as linhas equipotenciais, próximas a estes eletrodos, tendam a ficarem alinhadas a estes contatos. No caso dos contatos-sensor, como as linhas de densidade de corrente é sempre perpendicular às linhas equipotenciais, o alinhamento destas equipotenciais com este contato causa o curto-circuito de linhas de densidade de corrente. Já no caso dos contatos-corrente, estes contatos afetam a inclinação das linhas equipotenciais próximas a eles. Portanto, estes efeitos têm uma influência direta na sensibilidade destes sensores de pressão. A Figura 5.2 mostra estes efeitos.

Se considerarmos um condutor como o da Figura 4.8a, a baixa resistividade dos contatos-corrente explica porque as linhas equipotenciais próximas a estes contatos tendem a não ficarem inclinadas, mas, sim, sofrerem uma maior inclinação à medida que se distanciam destes eletrodos, conforme mostradas na Figura 5.2b. Assim, é intuitivo concluir que o centro deste condutor é a região onde esta inclinação alcança um máximo, conforme Popovic [34] tem estudado. Portanto, para uma máxima sensibilidade do sensor, os contatos-sensor deveriam estar localizados na borda da REC, e em lados opostos, equidistantes dos contatos-corrente.

Se então consideramos 2 contatos-sensor opostos na borda da REC e equidistantes dos contatos-corrente, conforme o sensor Hall da Figura 4.1, o efeito de curto-circuito está então presente no sensor. Este efeito resulta no curto-circuito das linhas equipotenciais adjacentes e das linhas de corrente que fluem entre os contatos-corrente, quando o sensor está polarizado por uma fonte de tensão ou corrente. A Figura 5.2 mostra estes efeitos.

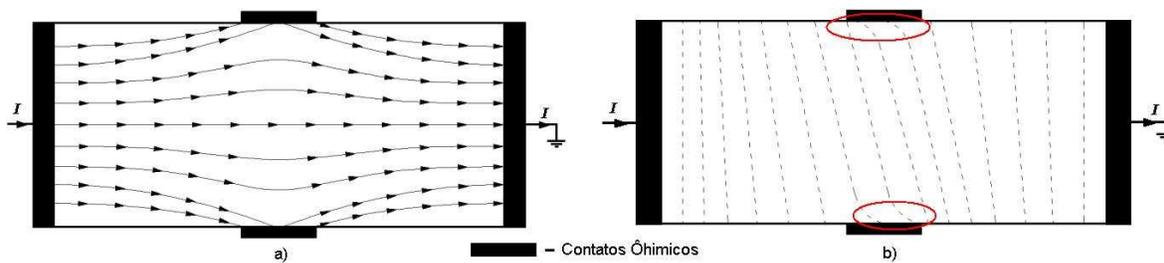


Figura 5.2 – Efeito de curto-circuito em condutores devido a contatos-sensor não pontuais: a) Curto-circuito das linhas de densidade de corrente e b) Alinhamento das linhas equipotenciais.

Para a minimização destes efeitos e, conseqüente maximização da sensibilidade do sensor de pressão, o sensor deveria ter o comprimento de sua REC tão longo quanto possível, a fim de se obter a máxima inclinação das linhas equipotenciais no centro da REC. Por sua vez, o comprimento dos contatos-sensor deveria ser tão pequeno quanto possível, a fim de diminuir o número de linhas equipotenciais adjacentes e linhas de densidade de corrente que são curto-circuitadas pelos eletrodos. Idealmente, estes contatos-sensor deveriam ser pontuais.

A dependência da sensibilidade do sensor, com estes efeitos da condição de contorno, pode ser quantificada pelo já mencionado Fator de Correção Geométrico (G). Este parâmetro será analisado ainda neste capítulo. Um estudo numérico da localização dos contatos-sensor é feito no capítulo 6.

5.2 – Estudo Analítico de um FTPS

Para a análise de um FTPS, deve-se primeiro escolher a forma geométrica de sua REC. Cada forma geométrica apresentada na Figura 5.1 tem, como um dos objetivos, minimizar os efeitos de contorno do sensor. Portanto, cada geometria da REC tem seu próprio fator de correção geométrico. Dentre estas geometrias, a forma retangular e suas derivações são as formas geométricas que mais vem sendo estudadas, tanto para sensores de pressão piezorresistivos como para sensores Hall [11,12,13,17].

Como o cálculo analítico da sensibilidade de um FTPS, não considerando as condições de contorno, não depende da geometria da sua REC, fizemos uma análise analítica de um FTPS retangular análogo a placa Hall apresentada na Figura 4.1, conforme

apresentado na Figura 5.3. Em seguida, apresentamos uma estrutura retangular modificada, a fim de introduzirmos uma nova topologia de MTPS.

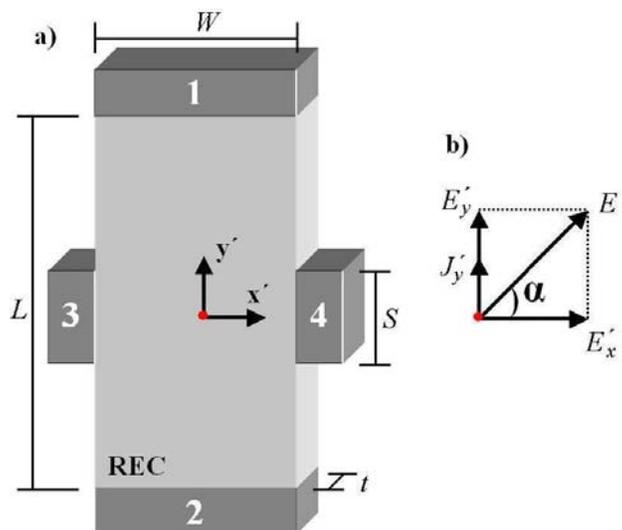


Figura 5.3 – a) *Layout* de um FTPS e b) Decomposição do vetor campo elétrico no centro da REC do FTPS estressado mecanicamente.

Na Figura 5.3a, L e W são o comprimento e a largura, respectivamente, da REC do FTPS; S é a largura dos contatos-sensor e t a espessura do FTPS. Os contatos 1 e 2 são os contatos-corrente e os contatos 3 e 4 são os contatos-sensor. A Figura 5.3b apresenta a decomposição do vetor campo elétrico no centro da REC para o FTPS estressado mecanicamente. O ângulo α é um ângulo análogo-mecânico ao ângulo Hall.

Considerando que entre os contatos 1 e 2 é aplicada uma fonte de tensão constante V_s , o sinal do sensor é obtido entre os contatos 3 e 4 onde uma tensão dependente do estresse mecânico pode ser medida. Para maximização da sensibilidade, assumimos que a REC do FTPS está numa região de máximo estresse na superfície de uma membrana quadrada (ver Figura 2.3) e que este estresse mecânico é uniforme nesta região. Ainda, consideramos que o FTPS está orientado em um sistema de coordenada arbitrária (x', y') . Uma análise da região de concentração de estresse em uma membrana quadrada será feita no capítulo 6.

Quando sob estresse, os campos elétricos e as linhas de densidade de corrente comportam-se como apresentados na Figura 4.8a. Nesta situação, a resistividade na REC do

sensor é anisotrópica. Lembrando que a mudança relativa da resistência de um material semiconductor é igual à mudança relativa da resistividade (ver seção 4.3), podemos descrever a influência do estresse mecânico nas características do FTPSs através da Lei de Ohm. Esta lei, que relaciona o campo elétrico com a densidade de corrente através da matriz de resistividade anisotrópica, é dada, em 3 dimensões, por:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}'_x \\ \bar{E}'_y \\ \bar{E}'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho'_{xx} & \rho'_{xy} & \rho'_{xz} \\ \rho'_{yx} & \rho'_{yy} & \rho'_{yz} \\ \rho'_{zx} & \rho'_{zy} & \rho'_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{J}'_x \\ \bar{J}'_y \\ \bar{J}'_z \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

sendo que \bar{E}'_i e \bar{J}'_i são as componentes de campo elétrico e de densidade de corrente, respectivamente. As componentes ρ'_{ij} são as componentes do tensor resistividade. Usando a simplificação de índices em notação reduzida apresentada na Tabela 3.2, os tensores de resistividade, sob ação de estresse, podem ser representados como:

$$\begin{bmatrix} \rho'_1 & \rho'_6 & \rho'_5 \\ \rho'_6 & \rho'_2 & \rho'_4 \\ \rho'_5 & \rho'_4 & \rho'_3 \end{bmatrix} = \rho_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\rho'_1 & \Delta\rho'_6 & \Delta\rho'_5 \\ \Delta\rho'_6 & \Delta\rho'_2 & \Delta\rho'_4 \\ \Delta\rho'_5 & \Delta\rho'_4 & \Delta\rho'_3 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

sendo que ρ_0 é a resistividade do silício não estressado e $\Delta\rho'_i$ é a mudança de resistividade de estresse induzido.

Como exposto no capítulo 4, a piezoresistência de um material é geralmente representada por um conjunto de constantes experimentais: os coeficientes de piezoresistência. Assim, a mudança de resistividade pode ser escrita conforme equação (4.16). Através da somatória de Einstein e da simplificação de índices, a variação relativa na resistividade é dada por:

$$\frac{\Delta\rho'_i}{\rho_0} = \pi'_{ij} \sigma'_j, \quad (5.3)$$

sendo que π'_{ij} é o tensor piezorresistivo, σ'_j é o tensor de estresse e $i, j = 1, 2$ e 3 .

Em uma difusão (ou implantação) rasa, a maior concentração de portadores está localizada próxima a superfície. Desta maneira, o fluxo de corrente está confinado próximo a superfície do FTPS. Então, a Lei de Ohm pode agora ser representada em 2 dimensões. Assim, substituindo a equação (5.2) na (5.1), a equação (5.1) é agora dada por:

$$\frac{1}{\rho_0} \begin{bmatrix} \bar{E}_x \\ \bar{E}_y \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{1}{\rho_0} \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 & \Delta\rho_6 \\ \Delta\rho_6 & \Delta\rho_2 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \bar{J}_x \\ \bar{J}_y \end{bmatrix}. \quad (5.4)$$

Reescrevendo a equação (5.4) em forma de equações explícitas, temos:

$$\frac{\bar{E}_x}{\rho_0} = \left(1 + \frac{\Delta\rho_1}{\rho_0} \right) \bar{J}_x + \frac{\Delta\rho_6}{\rho_0} \bar{J}_y, \quad (5.5a)$$

e,

$$\frac{\bar{E}_y}{\rho_0} = \frac{\Delta\rho_6}{\rho_0} \bar{J}_x + \left(1 + \frac{\Delta\rho_2}{\rho_0} \right) \bar{J}_y. \quad (5.5b)$$

Se os contatos-sensor (contatos 3 e 4) estão conectados a um multímetro de alta impedância, então podemos considerar que a densidade de corrente em x' é nula ($J_x' = 0$). Das equações (5.5), temos:

$$\frac{\bar{E}_x}{\rho_0} = \frac{\Delta\rho_6}{\rho_0} \bar{J}_y, \quad (5.6a)$$

e,

$$\frac{\bar{E}_y}{\rho_0} = \left(1 + \frac{\Delta\rho_2}{\rho_0} \right) \bar{J}_y. \quad (5.6b)$$

Isolando \bar{J}_y da equação (5.6b) e substituindo-a na equação (5.6a), obtemos:

$$\bar{E}_x = \frac{\Delta\rho_6}{\rho_0} \frac{\bar{E}_y}{\left(1 + \frac{\Delta\rho_2}{\rho_0} \right)}, \quad (5.7)$$

Ainda, podemos escrever a equação (5.7) em função do potencial. A diferença de potencial entre dois pontos é dada pela equação (4.29). Desta forma, temos:

$$V'_{y_2} - V'_{y_1} = - \int_{y_1}^{y_2} \vec{E}'_y \cdot \vec{dl}, \quad (5.8a)$$

e,

$$V'_{x_3} - V'_{x_4} = - \int_{x_4}^{x_3} \vec{E}'_x \cdot \vec{dw}, \quad (5.8b)$$

sendo que V'_{x_3} e V'_{x_4} são os potenciais nos contatos 3 e 4, respectivamente; V'_{y_1} e V'_{y_2} são os potenciais nos contatos 1 e 2, respectivamente; \vec{dl} e \vec{dw} são uma parte diferencial de L e W , respectivamente.

Integrando-se a equação (5.8a) entre a distância que separa os contatos 1 e 2, e a equação (5.8b) entre a distância que separa os contatos 3 e 4, temos que as diferenças de potenciais entre estes contatos são:

$$V'_y = E'_y L, \quad (5.9a)$$

e,

$$V'_x = E'_x W, \quad (5.9b)$$

sendo que V'_y e V'_x são as diferenças de potenciais na direção y' e x' , respectivamente. No caso da direção y' , a diferença de potencial é a própria tensão de alimentação V_s . Já para a direção x' , a diferença de potencial é o sinal de saída em tensão do FTPS: $V'_{out_{FTPS}}$.

Substituindo as equações (5.9) na equação (5.7), obtemos:

$$V'_{out_{FTPS}} = \frac{W}{L} \frac{\left(\frac{\Delta\rho'_6}{\rho_0} \right)}{\left(1 + \frac{\Delta\rho'_2}{\rho_0} \right)} V_s, \quad (5.10)$$

sendo que a mudança de resistividade relativa das componentes de resistividade da equação (5.10), podem ser calculadas pela equação (5.3), como sendo:

$$\frac{\Delta\rho'_6}{\rho_0} = \pi'_{61}\sigma'_1 + \pi'_{62}\sigma'_2 + \pi'_{66}\sigma'_6, \quad (5.11a)$$

e,

$$\frac{\Delta\rho'_2}{\rho_0} = \pi'_{21}\sigma'_1 + \pi'_{22}\sigma'_2 + \pi'_{26}\sigma'_6. \quad (5.11b)$$

A fim de calcular a tensão de saída do FTPS em um sistema de coordenada arbitrária, as componentes de piezoresistência e de estresse das equações (5.11) devem sofrer uma transformação de coordenadas. A relação entre os sistemas de coordenadas do sensor e da lâmina, onde este é fabricado, pode ser obtida através dos ângulos de Euler, como apresentada na seção 4.3.2. Desta forma, usando o método de derivação apresentado pela equação (4.22), obtemos as seguintes expressões para os coeficientes piezorresistivos em um sistema de coordenada arbitrária:

$$\begin{aligned} \pi'_{21} &= \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2), \\ \pi'_{22} &= \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_2^2 m_2^2 + m_2^2 n_2^2 + l_2^2 n_2^2), \\ \pi'_{26} &= (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1 l_2^3 + m_1 m_2^3 + n_1 n_2^3), \\ \pi'_{61} &= (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^3 l_2 + m_1^3 m_2 + n_1^3 n_2), \\ \pi'_{62} &= \frac{1}{2}(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1 l_2^3 + m_1 m_2^3 + n_1 n_2^3), \\ \pi'_{66} &= \pi_{44} + 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2), \end{aligned} \quad (5.12)$$

sendo que l , m e n são os cossenos da direção (ver Apêndice A) e os coeficientes π_{ij} são os componentes piezorresistivos fundamentais do silício (ver Tabela 4.2).

As componentes de estresse também podem ser calculadas em um sistema de coordenadas arbitrárias através da equação (A.4). Assim, obtemos as seguintes expressões das componentes de estresse em um sistema de coordenada arbitrária [11]:

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= l_1^2 \sigma_1 + m_1^2 \sigma_2 + 2l_1 m_1 \sigma_6, \\ \sigma'_2 &= l_2^2 \sigma_1 + m_2^2 \sigma_2 + 2l_2 m_2 \sigma_6, \\ \sigma'_6 &= l_1 l_2 \sigma_1 + m_1 m_2 \sigma_2 + (l_1 m_2 + l_2 m_1) \sigma_6, \end{aligned} \quad (5.13)$$

sendo que σ_{ij} são os componentes de estresse para o sistema de coordenada da lâmina de silício.

Considerando que o sensor é fabricado em lâminas de silício {100} tipo p ou tipo n, devemos fazer uma rotação dos ângulos de Euler com respeito à direção [110]. Esta direção é a direção do estresse mecânico em uma membrana quadrada em sua região de concentração de estresse máximo, como será estudado no capítulo 6.

De acordo com a Figura 4.3, o ângulo ϕ é o ângulo com respeito àquela direção, enquanto θ e ψ são nulos. Substituindo a equação A.3 nas equações (5.12) e (5.13) e, então, nas equações (5.11), obtemos as seguintes expressões para as mudanças de resistividade relativas em uma coordenada arbitrária:

$$\frac{\Delta\rho'_6}{\rho_0} = \frac{1}{2}\pi_{44}(\sigma_2 - \sigma_1)\text{sen}(2\phi) + (\pi_{11} - \pi_{12})\sigma_6\text{cos}(2\phi), \quad (5.14a)$$

e,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\rho'_2}{\rho_0} = & \left[-\frac{1}{2}\pi_{44}\text{cos}(2\phi) + \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12}) \right] \sigma_1 + \left[\frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12}) + \frac{1}{2}\pi_{44}\text{cos}(2\phi) \right] \sigma_2 \\ & - (\pi_{11} - \pi_{12})\text{sen}(2\phi)\sigma_6. \end{aligned} \quad (5.14b)$$

As equações (5.14) podem ser simplificadas dependendo do tipo de silício (p ou n) em que o sensor é fabricado. Analisando a Tabela 4.2, verificamos que, para silício tipo-p, o coeficiente de piezoresistência π_{44} é muito maior que os coeficientes π_{11} e π_{12} . Ao passo que, para silício tipo-n, estes coeficientes são maiores que o coeficiente π_{44} . Desta maneira, as seguintes aproximações são válidas para estes coeficientes:

$$\pi_{11} \approx \pi_{12} \ll \pi_{44} \quad \text{para silício tipo-p}, \quad (5.15a)$$

e,

$$\pi_{44} \ll \pi_{11} \text{ e } \pi_{44} \ll \pi_{12} \quad \text{para silício tipo-n}, \quad (5.15b)$$

sendo que, no primeiro caso, desprezamos π_{11} e π_{12} e, no segundo caso, desprezamos π_{44} .

As equações (5.14) podem agora ser simplificadas de acordo com as equações (5.15). A Tabela 5.1 mostra os valores das mudanças de resistividade de acordo com o tipo de silício da REC de um FTSP.

Tabela 5.1 – Simplificações para as mudanças de resistividade relativa de um FTSP de acordo com tipo de silício de sua região de espalhamento de corrente.

Mudança de Resistividade	Silício de Tipo-p	Silício de Tipo-n
$\frac{\Delta\rho'_6}{\rho_0} =$	$\frac{1}{2}\pi_{44}(\sigma_1 - \sigma_2)\text{sen}(2\phi)$	$(\pi_{11} - \pi_{12})\sigma_6\text{cos}(2\phi)$
$\frac{\Delta\rho'_2}{\rho_0} =$	$-\frac{1}{2}\pi_{44}(\sigma_1 - \sigma_2)\text{cos}(2\phi)$	$(\pi_{12} - \pi_{11})\sigma_6\text{sen}(2\phi) + \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12})(\sigma_1 + \sigma_2)$

A Tabela 5.2 mostra as tensões de saída para um FTSP fabricado em silício tipo-n e em tipo-p. Definimos a tensão de saída para um FTSP do tipo-p e do tipo-n como sendo $V_{out_{FTSP-p}}$ e $V_{out_{FTSP-n}}$, respectivamente.

Tabela 5.2 – Tensões de saída para FTSPs fabricados em silício tipo-n e tipo-p.

Representação		Tensão de Saída de um FTSP
Silício de Tipo-p	$V_{out_{FTSP-p}} =$	$\frac{1}{2} \frac{W}{L} \frac{\pi_{44}(\sigma_1 - \sigma_2)\text{sen}(2\phi)}{\left[1 - \frac{1}{2}\pi_{44}(\sigma_1 - \sigma_2)\text{cos}(2\phi)\right]} V_s$
Silício de Tipo-n	$V_{out_{FTSP-n}} =$	$\frac{W}{L} \frac{(\pi_{12} - \pi_{11})\sigma_6\text{cos}(2\phi)}{\left[1 + (\pi_{12} - \pi_{11})\sigma_6\text{sen}(2\phi) + \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12})(\sigma_1 + \sigma_2)\right]} V_s$

Para maximização da tensão de saída dos FTSPs, o ângulo ϕ deve ser escolhido diferentemente para cada tipo de silício. De acordo com a Tabela 5.2, para um FTSP fabricado em silício tipo-p, o ângulo ϕ é 45° . Por outro lado, para FTSP do tipo-n, ϕ deveria ser escolhido igual a 0° ou 90° . Em outras palavras, sensores fabricados em silício (100) tipo-p devem ser alinhados com as direções cristalográficas $\langle 100 \rangle$, e sensores fabricados em material tipo-n devem ser alinhados com as direções $\langle 110 \rangle$ para maximização de suas sensibilidades.

Para sensores de pressão piezorresistivo, o silício tipo-p é preferível a um tipo-n. Como analisado pelas equações na Tabela 5.2, para silício tipo-n, o sinal de saída é dependente das componentes de estresse *shear*. Já para o silício tipo-p, as componentes de estresse são normais e a membrana microfabricada em silício concentra estas componentes de estresse, como será visto no capítulo 6.

Considerando, então, um FTPS fabricado em silício (100) com uma REC do tipo-p, sua tensão de saída máxima é dada por:

$$V_{out_{FTPS-p}} = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \pi_{44} (\sigma_1 - \sigma_2) V_s, \quad (5.16)$$

A equação (5.16) pode ainda ser escrita em função de uma fonte de corrente constante. Neste caso, pela equação (4.30), nós obtemos que:

$$V_s = R_{FTPS} I_s, \quad (5.17)$$

sendo que V_s é tensão de alimentação do FTPS, R_{FTPS} é a sua resistência de entrada da REC e I_s a corrente de polarização devido a V_s . Utilizando a equação (4.10), a resistência da REC pode ser escrita em função de sua resistividade, como segue:

$$R_{FTPS} = \rho_0 \frac{L}{A} = \rho_0 \frac{L}{tW}, \quad (5.18)$$

sendo que ρ_0 é a resistividade do material não-estressado, L e A são o comprimento e a área da REC, respectivamente. A área é dada pelo produto da espessura (ou profundidade de junção) t com a largura W do FTPS. A resistência de folha (r_s) do sensor é definida como sendo a relação entre sua resistividade (ρ_0) e sua profundidade de junção (t). Assim, a equação (5.18) pode ser reescrita em função de r_s , como segue:

$$R_{FTPS} = \frac{\rho_0}{t} \frac{L}{W} = r_s \frac{L}{W}. \quad (5.19)$$

Substituindo a equação (5.19) em (5.17) e, então, em (5.16), obtemos que a tensão de saída de um FTPS do tipo-p em função de uma fonte de corrente constante é dada por:

$$V_{out_{FTPS-p}} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_1 - \sigma_2) r_s I_s. \quad (5.20)$$

Note que quando uma fonte de corrente é utilizada para polarização do FTPS, sua tensão de saída é proporcional a sua resistência de folha. Portanto, a REC dos FTPSs deveria ser do tipo-p para maximização da tensão de saída.

É importante lembrar que o estresse introduz um ângulo entre o campo elétrico total e as linhas de densidade de corrente, conforme mostrado na Figura 5.3b. Este ângulo pode ser calculado através da distribuição de potencial em 2 dimensões [17] e é dado por:

$$\beta = \arctan \left[\frac{\frac{\Delta_6}{\rho_0}}{\left(\sqrt{1 + \frac{\Delta_1}{\rho_0}} \right) \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta_2}{\rho_0}} \right)} \right], \quad (5.21)$$

sendo que β é o ângulo análogo-mecânico ao ângulo Hall. Este ângulo, além de determinar a inclinação das linhas equipotenciais, é usado para o cálculo do fator de correção geométrico no método de mapeamento conforme. Da mesma forma como as componentes de variação da resistividade relativa, este ângulo também pode ser simplificado usando a Tabela 5.1.

A equação (5.20) não leva em consideração os efeitos de contorno do sensor. Assim, é necessário introduzirmos nesta equação o parâmetro que quantifica estes efeitos: o fator de correção geométrico (G). Se considerarmos que o efeito de desalinhamento do vetor densidade de corrente com o vetor campo elétrico, observado no sensor baseado no efeito piezorresistivo transversal, é semelhante ao ocorrido na placa Hall, podemos considerar que os efeitos de contorno nos piezorresistores de 4 terminais são análogos aos efeitos de contorno bem conhecidos das placas Hall. Desta maneira, o G de uma placa Hall

revisado no capítulo 4 (ver equação 4.9) é o mesmo a ser utilizado para a equação (5.20). Assim, podemos reescrever esta equação como:

$$V_{out_{FTPS-p}} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_2 - \sigma_1) r_s I_s G_{FTPS}, \quad (5.22)$$

sendo que G_{FTPS} é o fator de correção geométrico para um FTPS e é dado pela equação (4.9). Este parâmetro pode ser calculado usando os seguintes métodos: métodos de mapeamento conforme, métodos de elemento de contorno e aproximações de elementos finitos.

O método de mapeamento conforme é o método que freqüentemente tem sido aplicado para o cálculo de G para vários tipos de topologias dos sensores [34, 42, 43, 44]. Contudo, neste trabalho, estudamos o fator de correção geométrico através do método de elementos finitos para topologias retangulares, conforme será visto no capítulo 6.

É importante lembrar que este fator de correção geométrico, introduzido na equação (5.22), é também válido para a tensão de saída de FTPS do tipo-n.

O fator de correção geométrico de uma topologia retangular pode ser melhorado, ou seja, aproximado de 1, se introduzirmos terminais aos contatos-sensor, conforme Figura 5.1b. Estes terminais são prolongamentos da REC em direção aos contatos-sensor. Estes prolongamentos causam um efeito direto na sensibilidade do FTPS devido à minimização dos efeitos de contorno causados pelos contatos-sensor: menos linhas de densidade de corrente e menos linhas equipotenciais tendem a ser curto-circuitadas por estes contatos. Isto possibilita um aumento da tensão de saída do FTPS por melhorar o fator de correção geométrico, conforme pode ser observado pelas simulações por elementos finitos apresentadas no capítulo 6.

A fim de projetarmos a nova topologia de um MTPS, introduzimos uma topologia retangular modificada ao da apresentada na Figura 5.3. Esta topologia é baseada em ambas

as topologias apresentadas nas Figuras 5.1b e 5.3a. Em seguida, fizemos a extrapolação desta topologia para um MTPS.

5.3 – Estudo Analítico de um MTPS

Como uma alternativa aos sensores de pressão piezorresistivos convencionais de silício baseados na topologia de Ponte de Wheatstone (PW), nós propomos uma nova topologia baseada em um piezotransdutor de multi-terminais. Esta nova topologia é derivada daquela de um FTPS e maximiza tanto a sensibilidade do sensor quanto seu fator de correção geométrico.

A Figura 5.4 mostra uma topologia de um FTPS modificada. Consideramos que tanto a largura quanto o comprimento dos terminais de contatos-corrente também podem variar. Na Figura 5.4, l_F e w_F são o comprimento e a largura dos terminais dos contatos-corrente, respectivamente; L e W são o comprimento e a largura da REC, respectivamente; S é a largura dos contatos-sensor e gap_F é distância entre um lado dos terminais dos contatos-corrente e a borda da REC do FTPS.

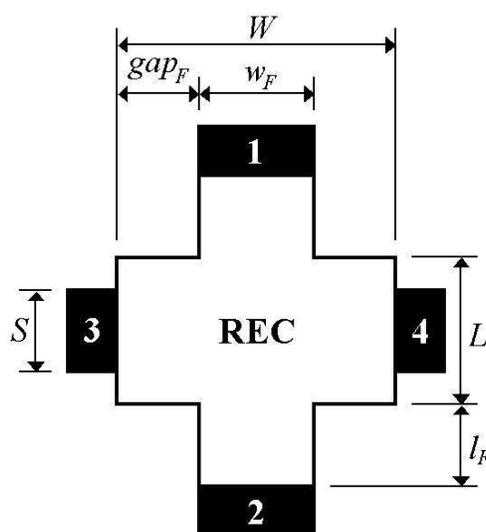


Figura 5.4 – FTPS com uma topologia retangular modificada.

A análise analítica da tensão de saída para um FTPS com esta topologia é idêntica a já apresentada pela equação (5.22). Contudo, suas sensibilidades podem ser diferentes, uma vez que o fator de correção geométrico depende da forma geométrica da REC. Nesta

topologia modificada estamos considerando que os contatos-corrente possuem terminais. Assim, esta topologia assemelha-se àquela da Figura 5.1b e, da mesma forma àquela topologia, os efeitos de contorno são minimizados.

Os FTPSs podem ser estudados através de modelos elétricos de suas RECs. Há 3 tipos de modelos que podemos considerar: o de resistência de entrada, o de resistência de saída e o de tensão de saída ou modelo de Ponte [34]. É conveniente estudarmos estes modelos a fim de aperfeiçoarmos o projeto do sensor.

Através de seus circuitos elétricos equivalentes, podemos, por exemplo, pensar em maneiras de diminuir o consumo de potência ou mesmo maximizar a sensibilidade do sensor. A Figura 5.5 apresenta estes modelos onde os C 's são os contatos-corrente, os S 's são os contatos-sensor, o R_{out} é a resistência equivalente de saída, o R_{in} é a resistência equivalente de entrada, os R 's são as resistências equivalentes da REC e os ΔR 's são suas variações.

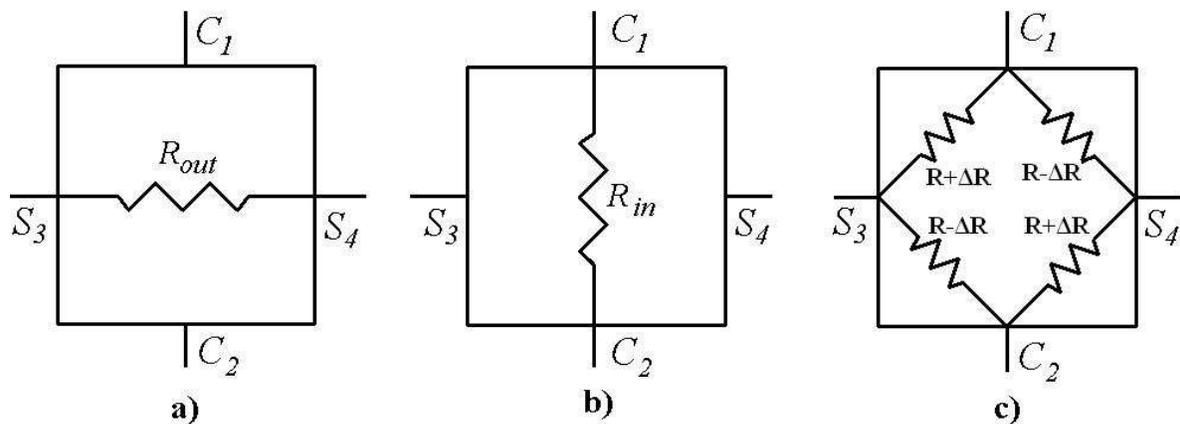


Figura 5.5 – Circuitos elétricos equivalentes para um FTPS: a) Circuito elétrico equivalente para a resistência de saída, b) Circuito elétrico equivalente para a resistência de entrada e c) Circuito elétrico equivalente em Ponte de Wheatstone.

É claro, então, que o cálculo para as resistências de entrada e de saída pode ser feito direto da equação (4.10). Já o modelo de Ponte nos possibilita calcular a tensão de saída do FTPS se conhecemos suas resistências e respectivas variações. Se aplicarmos uma fonte de corrente entre os contatos C_1 e C_2 no circuito da Figura 5.5c e se considerarmos que as

resistências são todas iguais (topologia simétrica), obtemos uma tensão de saída, entre os contatos S_1 e S_2 , dada por:

$$V_{PW} = \Delta R I_s, \quad (5.23)$$

sendo que V_{PW} é a tensão de saída da Ponte de Wheatstone, ΔR é a variação da resistência R e I_s a corrente de polarização.

Se a topologia do sensor não é simétrica, haverá um desbalanceamento da PW o que ocasiona um *offset* nestes dispositivos. Por outro lado, é intuitivo pensar que podemos maximizar a sensibilidade dos FTPSs por adicionarmos mais “pontes” a ele. A adição de mais pontes significa que outros FTPSs devem ser colocados juntos. Quando isto é feito, obtemos o MTPS, conforme mostrado na Figura 5.6a. A Figura 5.6b representa o circuito elétrico equivalente de sua tensão de saída.

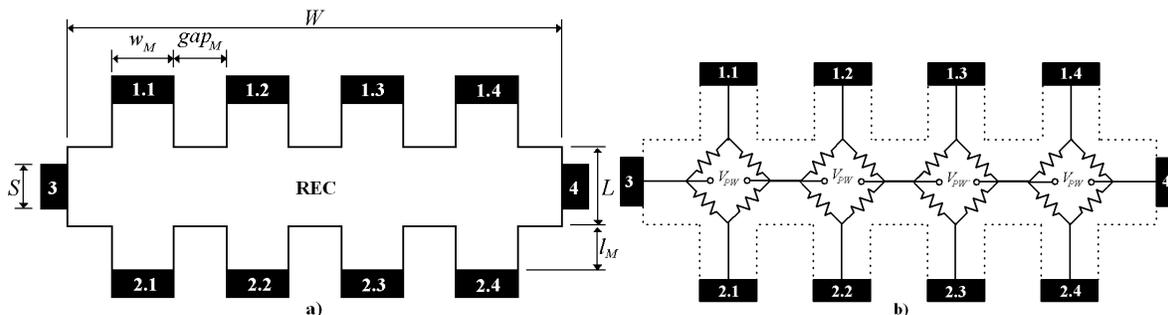


Figura 5.6 – a) *Layout* do MTPS e b) Circuito elétrico equivalente do MTPS.

Na Figura 5.6a, L e W são o comprimento e a largura da REC do MTPS; l_F e w_F são o comprimento e a largura dos terminais dos contatos-corrente; S é a largura dos contatos-sensor e gap_M é a distância entre 2 terminais de contatos-corrente. Na Figura 5.6b, V_{PW} é a diferença de potencial causada pelo desbalanceamento das Pontes de Wheatstone.

É claro agora que a tensão de saída de um MTPS é a soma de todas as quedas de tensão de cada PW. Se a queda de tensão de uma PW é a tensão de saída de um FTPS, podemos escrever que a tensão de saída de um MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada é, segundo a Figura 5.6b, dada por:

$$V_{OUT4-MTPS} = 4V_{OUTFTPS}, \quad (5.24)$$

sendo que $V_{out_{4-MTPS}}$ é a tensão de saída do MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada e $V_{out_{FTPS}}$ é a tensão de saída de um FTPS.

A tensão de saída de um MTPS é diretamente proporcional ao número de terminais de contatos-corrente de entrada do dispositivo. A Figura 5.6 representa um caso particular de um MTPS que é obtido a partir de 4 FTPS. No entanto, teoricamente, um MTPS pode ser obtido a partir de N FTPS. Então, é conveniente extrapolar a equação (5.24) para um caso geral onde um MTPS tem N terminais de contatos-corrente de entrada, conforme mostrado na Figura 5.7a. Por conveniência, nomeamos este dispositivo como um N -MTPS. A Figura 5.7b mostra seu circuito elétrico equivalente.

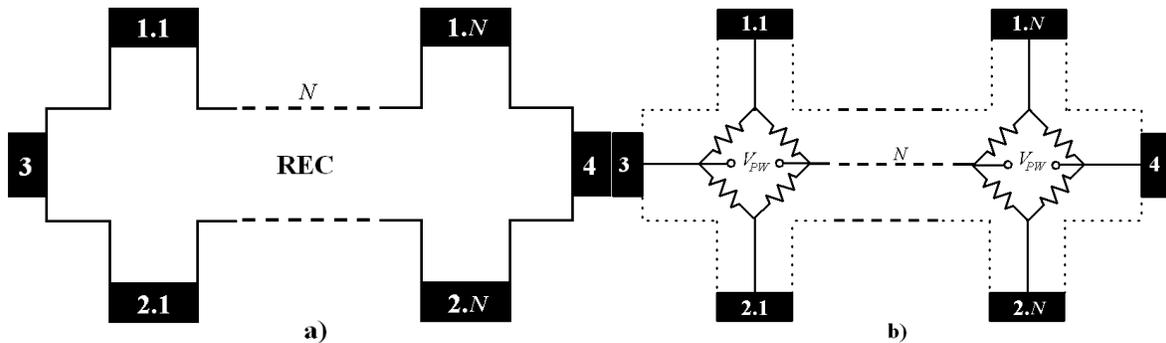


Figura 5.7 – a) *Layout* do N -MTPS e b) Circuito elétrico equivalente do N -MTPS.

Neste caso, podemos dizer que a tensão de saída do N -MTPS é agora dada pela somatória das N 's pontes de Wheatstone. Assim, a equação (5.24) pode ser reescrita como sendo:

$$V_{out_{N-MTPS}} = \sum_{n=1}^N N V_{out_{FTPS}}, \quad (5.25)$$

sendo que N é o número de terminais de contatos-corrente de entrada.

Como em nosso trabalho consideramos um MTPS de 4 terminais de entrada em silício tipo-p (4-MTPS-p*), a tensão de saída esperada para o nosso sensor é dada substituindo a equação (5.24) na (5.22), como segue:

*Por conveniência, em nosso trabalho, denominamos que o parâmetro antes da palavra MTPS designa quantos terminais de contatos-corrente de entrada o MTPS tem e o parâmetro depois da palavra MTPS designa em qual tipo de silício o MTPS é fabricado. Este último é também adotado para a palavra FTPS.

$$V_{out4-MTPS-p} = 2 \pi_{44} (\sigma_1 - \sigma_2) r_s I_s G_{MTPS}, \quad (5.26)$$

sendo que $V_{out4-MTPS-p}$ é a tensão de saída de um MTPS do tipo-p com 4 terminais de entrada e G_{MTPS} é o seu fator de correção geométrico.

O G_{MTPS} é obtido extrapolando a equação (4.9). Desta forma, podemos reescrever a equação (4.9), como sendo:

$$G_{MTPS} = \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{2} \left(\frac{2l_M + L}{w_M} \right) \right] \right\} \left[1 - \frac{2}{\pi} \frac{S}{W} \right], \quad (5.27)$$

sendo que $(2l_M + L)/w_M > 1,5$ e $S/W < 0,18$.

5.4 – Estudo analítico das sensibilidades do FTPS e do MTPS

A sensibilidade do estímulo de entrada de um sensor é a relação na mudança na variável de saída do sensor para uma mudança no valor da medida. Para um sensor na qual sua saída y está relacionada com sua entrada x por uma equação do tipo $y = f(x)$, a sensibilidade absoluta, em um ponto x_a , é dada por [45]:

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a}. \quad (5.28)$$

A tensão de saída dos FTPSs e dos MTPSs é relacionada com o estresse que atua em suas RECs. Desta forma, as sensibilidades ao estresse dos FTPSs e dos MTPSs podem ser calculadas, a partir de (5.28), por:

$$S = \frac{d}{d\sigma} V_{out}, \quad (5.29)$$

sendo que S é a sensibilidade, σ é o estresse no qual os sensores estão submetidos e V_{out} é a tensão de saída dos sensores.

Considerando $\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$, da equação (5.22) e (5.25), podemos calcular a sensibilidade de um FTPS e de um N -MTPS da seguinte forma:

$$S_{FTPS-p} = \frac{d}{d\sigma} V_{out_{FTPS-p}} = \frac{1}{2} \pi_{44} r_s I_s G_{FTPS}, \quad \text{para um FTPS} - p, \quad (5.30a)$$

e,

$$S_{N-MTPS-p} = \frac{d}{d\sigma} V_{out_{N-MTPS-p}} = \frac{N}{2} \pi_{44} r_s I_s G_{MTPS}, \quad \text{para um } N - \text{MTPS} - p, \quad (5.30b)$$

sendo que S_{FTPS-p} e $S_{N-MTPS-p}$ são as sensibilidades em V/MPa de um FTPS e de um N -MTPS em silício tipo-p, respectivamente; e N é o número de terminais de contatos-corrente de entrada do MTPS.

Dividindo a equação (5.30b) pela (5.30a), temos que:

$$S_{N-MTPS-p} = N S_{FTPS-p}. \quad (5.31)$$

A equação (5.30b) mostra que a sensibilidade de um MTPS depende do número de terminais de contatos-corrente de entrada, da mesma forma que sua tensão de saída. Desta maneira, a sensibilidade de um MTPS é N vezes maior que a sensibilidade de um FTPS.

Embora a sensibilidade de um MTPS seja maior que a de um FTPS, o seu consumo de potência aumenta proporcionalmente, conforme será estudado na seção seguinte.

5.5 – Estudo Analítico do Consumo de Potência de um FTPS e de um MTPS

Consideramos para o estudo do consumo de potência dos FTPSs e dos MTPSs, uma representação elétrica das resistências de entrada destes dispositivos, conforme mostradas na Figura 5.8.

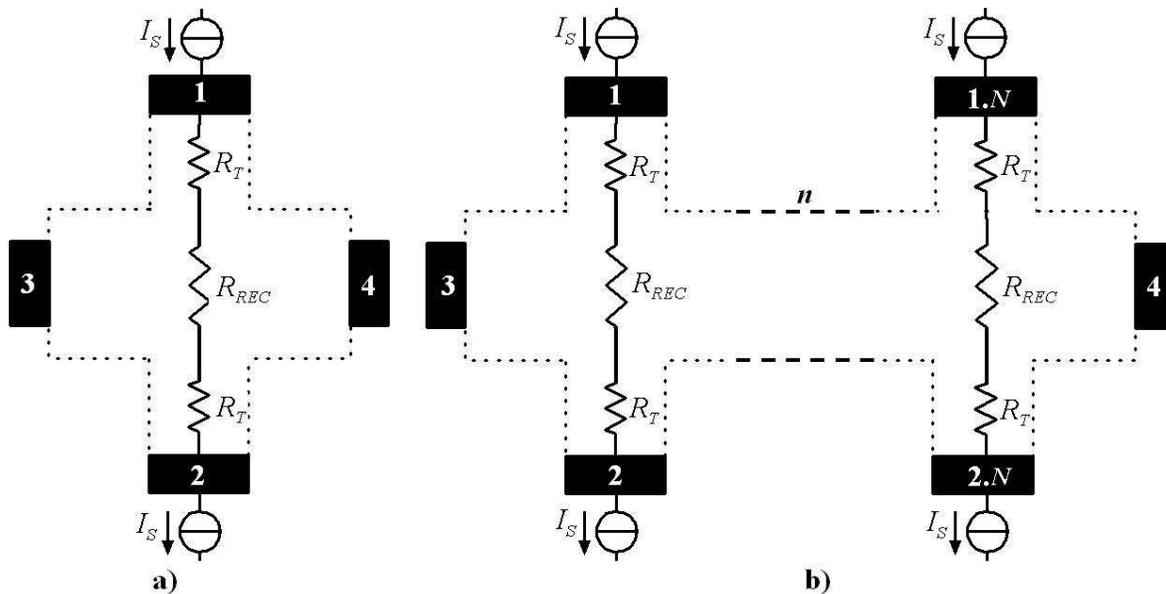


Figura 5.8 – Circuito elétrico equivalente das resistências de entrada para um: a) FTPS e b) MTPS.

A Figura 5.8a apresenta o circuito elétrico para a resistência de entrada de um FTPS e a Figura 5.8b apresenta o circuito elétrico para a resistência de entrada de um N -MTPS, ambos com uma corrente de polarização I_S . Os parâmetros R_T e R_{REC} são as resistências de entrada devido aos terminais de contatos-corrente e as resistências da REC dos dispositivos, respectivamente.

A potência consumida (P) por um condutor é dada por:

$$P = R I^2, \quad (5.31)$$

sendo que R é a resistência do condutor e I é sua corrente de polarização. A resistência R pode ser obtida pela equação (4.10).

Por inspeção da Figura 5.8 podemos escrever que a resistência de entrada de um FTPS e de um terminal de contatos-corrente do N -MTPS é dada por:

$$R_{FTPS} = R_{N-MTPS} = 2R_T + R_{REC}, \quad (5.32)$$

sendo que R_{FTPS} é a resistência de entrada total de um FTPS e R_{N-MTPS} é a resistência de entrada equivalente de um terminal de corrente de entrada de um N -MTPS. Portanto, a

resistência de entrada total de um N -MTPS é a soma das resistências de entrada de cada terminal. Em consequência, o consumo de potência total de um N -MTPS é a soma do consumo de potência de cada terminal de corrente de entrada, como segue:

$$P_{Total_{N-MTPS}} = P_{T_1} + P_{T_2} + \dots + P_{T_N} = \sum_{N=1}^N NP_T, \quad (5.33)$$

sendo que $P_{Total_{N-MTPS}}$ é o consumo de potência total de um N -MTPS e P_T é consumo de potência de cada terminal de corrente de entrada.

Pela equação (5.19) podemos escrever que:

$$R_{T_F} = r_s \frac{l_F}{w_F} \quad e \quad R_{REC_F} = r_s \frac{L_F}{W_F}, \quad (5.34a)$$

e,

$$R_{T_M} = r_s \frac{l_M}{w_M} \quad e \quad R_{REC_M} = r_s \frac{L_M}{W_M}, \quad (5.34b)$$

sendo que R_{T_F} e R_{T_M} são as resistências dos terminais de um FTPS e de um MTPS, respectivamente; R_{REC_F} e R_{REC_M} são as resistências da REC de um FTPS e de um MTPS, respectivamente. Os parâmetros l_F e l_M e os w_F e w_M são os comprimentos e as larguras dos terminais de contatos-correntes de um FTPS e de um MTPS, respectivamente. Os parâmetros L_F e L_M e os W_F e W_M são os comprimentos e as larguras do piezoelemento de 4 terminais e multi-terminais, respectivamente.

Substituindo as equações (5.34) na equação (5.32), obtemos as seguintes resistências de entrada:

$$R_{FTPS} = r_s \frac{(2l_F + L_F)}{w_F}, \quad (5.35a)$$

e,

$$R_{N-MTPS} = r_s \left[\frac{(2l_M + L_M)}{w_M} \right]. \quad (5.35b)$$

Se uma corrente I_s é aplicada nos terminais de contatos-corrente de entrada de ambos os dispositivos, temos que:

$$I_{FTPS} = I_{N-MTPS} = I_s, \quad (5.36)$$

sendo que I_{FTPS} é a corrente de polarização do FTPS e I_{N-MTPS} é a corrente de polarização para cada um dos terminais de corrente de entrada do MTPS.

O consumo de potência do FTPS é dado substituindo a equações (5.36) e (5.35a) na equação (5.31). Já o consumo do N -MTPS é dado substituindo a equações (5.36) e (5.35b) na equação (5.33). Assim, temos:

$$P_{FTPS} = r_s \frac{(2l_F + L_F)}{w_F} I_s^2, \quad (5.37a)$$

e,

$$P_{N-MTPS} = N r_s \left[\frac{(2l_M + L_M)}{w_M} \right] I_s^2. \quad (5.37b)$$

As equações (5.37) podem ser simplificadas por nomearmos alguns outros parâmetros que chamamos de parâmetro D . Se considerarmos que D_{T_F} e D_{T_M} são a relação entre o comprimento e a largura dos terminais dos contatos-corrente para um FTPS e um MTPS, respectivamente; e que D_{REC_F} e D_{REC_M} é a relação do comprimento de suas RECs pela largura dos contatos-corrente, os parâmetros D 's são dados por:

$$D_{T_F} = \frac{2l_F}{w_F} \quad e \quad D_{REC_F} = \frac{L_F}{w_F}, \quad (5.38a)$$

e por,

$$D_{T_M} = \frac{2l_M}{w_M} \quad e \quad D_{REC_M} = \frac{L_M}{w_M}, \quad (5.38b)$$

Podemos ainda escrever os parâmetros D_{REC} 's em função da largura do piezoelemento W . Para os FTPS convencionais (sem terminais de contatos-corrente e a Cruz Grega), $w = W$ e os parâmetros D 's são dados como nas equações (5.38). Para o FTPS Modificado e o N -MTPS, temos que, para gap 's iguais a w , $w_F = W/3$ e $w_M = W/(2N+1)$.

Desta forma, podemos reescrever as equações (5.38) como sendo:

$$D_{T_F} = 2 \frac{l_F}{w_F} \quad e \quad D_{REC_F} = 3 \frac{L_F}{W_F}, \quad (5.39a)$$

e por,

$$D_{T_M} = 2 \frac{l_M}{w_M} \quad e \quad D_{REC_F} = (2N + 1) \frac{L_M}{W_M}. \quad (5.39b)$$

O consumo de potência dado pelas equações (5.37) podem ser reescritos utilizando os parâmetros D 's, como segue:

$$P_{FTPS} = r_s (D_{T_F} + D_{REC_F}) I_s^2, \quad (5.40a)$$

e,

$$P_{N-MTPS} = N r_s (D_{T_M} + D_{REC_M}) I_s^2, \quad (5.40b)$$

sendo que o parâmetro D é obtido pelas equações (5.38) e (5.39). Portanto, o consumo de potência de um N-MTPS é proporcional ao aumento do número de contatos-corrente de entrada.

Se considerarmos um caso particular onde o FTPS Modificado tem as mesmas relações de dimensões de seus contatos-corrente e de sua REC com um N-MTPS, podemos assumir que seus parâmetros D 's são iguais. Desta forma, igualando as equações (5.40), obtemos que:

$$P_{N-MTPS} = N P_{FTPS}, \quad (5.41)$$

ou seja, o consumo de potência de um N-MTPS é N vezes maior que o consumo de um FTPS para o caso em que seus parâmetros D 's são iguais.

Um estudo do consumo de potência dos piezoelementos pode ser feito por analisar seus fatores de correção geométricos. Através desta análise podemos definir as resistências de entrada dos piezoelementos analisando seus parâmetros geométricos. Uma análise numérica destes fatores é feita no próximo capítulo.

CAPÍTULO 6

Análise Numérica dos Piezoelementos

Métodos numéricos aproximados que permitem a solução de problemas em geometria arbitrária começaram a ser desenvolvidos a partir da década de setenta e foram impulsionados pelo surgimento de computadores. O crescente desenvolvimento da microeletrônica e agora também da microeletromecânica nos defronta com problemas que envolvem geometria mais complexa e condições de contorno particulares.

O estudo de modelos microeletromecânicos através de métodos numéricos é indispensável para o aprimoramento da pesquisa e desenvolvimento de sensores integrados. Sensores de pressão, acelerômetros e outras estruturas microeletromecânicas possuem componentes mecânicos. Estes componentes são normalmente microfabricados com materiais que possuem constantes elásticas anisotrópicas que devem ser levadas em consideração para a elaboração de modelos confiáveis. O estudo de microestruturas com característica elásticas anisotrópicas é um problema complexo quando resolvido por métodos analíticos.

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é um método numérico desenvolvido para resolver problemas do meio contínuo sem o qual se tornaria muito complicado ou até mesmo impossível de se resolver com métodos analíticos. O estudo através de FEM contribui para a otimização das estruturas mecânicas, proporcionando a construção de sensores com características melhoradas com relação à sensibilidade, seletividade, *offset* e deriva.

Neste capítulo, modelos baseados em FEM serão utilizados nas seguintes atividades: a) estudo da distribuição do estresse mecânico na membrana do sensor de pressão e b) análise da distribuição das equipotenciais na região de espalhamento de corrente do piezoelemento.

6.1 – Método dos Elementos Finitos (FEM)

O FEM é um procedimento numérico que pode ser aplicado para se obter soluções a uma variedade de problemas. Problemas transientes, lineares e não-lineares em análises de estresse, transferência de calor, fluxo de fluídos, campos eletromagnéticos, etc podem ser analisados com o método dos elementos finitos [46].

A primeira etapa de qualquer procedimento baseado em FEM é a discretização. Este processo é uma técnica chamada de *meshing*. Esta técnica consiste na divisão do objeto a ser analisado em pequenas sub-regiões e nós. Assim, esta técnica transforma uma geometria complexa em vários pequenos elementos de geometria simples. Quanto mais elementos o modelo possuir, mais precisa será a solução.

O comportamento individual de cada elemento é fundamental para a resolução de um problema. Cada elemento é caracterizado por diferentes formas geométricas, consulte [47] para uma completa referência dos elementos. Cada forma geométrica é usada para certo tipo de análise e possui diferentes propriedades de material e quantidades de nós. Estas geometrias podem ser superficiais, lineares e volumétricas. A resposta de cada elemento a um estímulo é caracterizada pelos graus de liberdade (DOF, do inglês *Degrees of Freedom*) dos nós. Os DOFs representam as variáveis a serem determinadas no problema.

6.2 – O Programa Ansys®

O programa Ansys® é uma ferramenta de simulação, por elementos finitos, capaz de fazer análises estruturais, de vibração, térmicas, acústicas, fluídicas, eletromagnéticas, piezoelétricas e piezoresistivas.

A análise de dispositivos MEMSs envolve muitos domínios físicos, tais como: o mecânico, o elétrico, o térmico e o óptico. Todos os domínios podem se interagir e influenciar um ao outro, o que faz a análise de MEMSs muito mais complexa. Contudo, o Ansys® é capaz não só de fazer análises nestes domínios individualmente, mas também de fazer uma combinação destas análises. Este tipo de análise é chamada de análise multifísica. A Figura 6.1 mostra um conjunto de análises que são possíveis de se fazer utilizando o Ansys®.

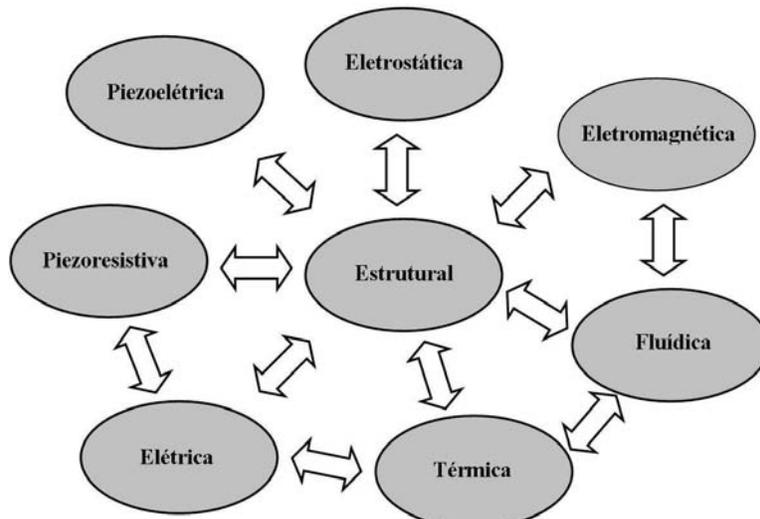


Figura 6.1 – Tipos de análises multifísicas em Ansys®.

Como visto nos capítulos anteriores, os sensores de pressão apresentados neste trabalho são baseados no efeito piezorresistivo. Estes sensores são polarizados eletricamente e são estimulados por um estresse mecânico, devido à deformação de uma membrana. Portanto, uma análise multifísica (elétrica + mecânica estrutural) é necessária para o estudo do comportamento destes sensores.

As etapas que compõem o processo de simulação de nossos sensores são então baseadas em: uma análise estrutural da membrana sob a qual o sensor é fabricado, uma análise piezoresistiva que é o mecanismo de transdução do sensor e uma análise elétrica para o estudo da sensibilidade e do efeito de curto-circuito dos piezoelementos.

O Ansys® é flexível quanto às unidades de medidas a serem utilizadas. Geralmente, para simulação de MEMS, onde as unidades são dadas em micrometros (μm), usamos o padrão μMKS . Este é o padrão que estamos considerando em nossas análises.

6.3 - Simulação da Membrana

A análise estrutural da membrana microfabricada em silício é de fundamental importância no projeto dos sensores de pressão, desde que ela converte a pressão aplicada em estresse mecânico. A maximização da sensibilidade do sensor é obtida por fabricar os piezoelementos em regiões de concentração de estresse mecânico.

O estudo do comportamento do estresse mecânico na membrana é feito utilizando o FEM. Assim, as regiões de máximo estresse nesta membrana são determinadas.

Para a simulação desta membrana, utilizamos do estudo feito por Garcia [26]. Portanto, apenas apresentaremos uma breve discussão sobre a construção do modelo da membrana e sobre suas condições de contorno e de carga. Para uma completa referência sobre este estudo, consultar [26].

6.3.1 – Membrana Quadrada

A fabricação da membrana em silício é feita por um processo químico chamado de corrosão úmida. Este processo é feito pelo uso da substância química KOH (hidróxido de potássio) dissolvido em água e consiste em aplicar esta solução na parte traseira (*back-side*) da lâmina de silício. Esta técnica de fabricação é chamada de *back-side micromachining* e define ângulos de $54,77^\circ$ no local corroído. O aparato de corrosão está disponível no Centro de Componentes Semicondutores (CCS) da Unicamp através de um equipamento chamado Reator de KOH. A Figura 2.3 mostra uma vista em corte transversal e superior de uma membrana quadrada típica.

As especificações de projeto para a fabricação da membrana são baseadas nos seguintes parâmetros: área do *die*, área da membrana, espessura da lâmina e espessura da membrana. A área do *die* foi definida levando-se em consideração a tecnologia disponível

no CCS para confecção das máscaras que são usadas no processo de fabricação da membrana. A área da membrana foi dimensionada baseada na área do *die* disponível, a fim de se ter área suficiente para o encapsulamento do sensor. Para a espessura da membrana, sabemos que quanto menor a espessura maior será o estresse induzido na membrana. Portanto, devemos fabricar uma membrana tão fina quanto possível.

As máscaras fotolitográficas utilizadas na fabricação do sensor foram confeccionadas por uma fotorepetidora com campo de projeção de 4 mm x 4 mm e resolução de 5 μm . Desta forma, o campo de projeção definiu a área do *die*. Alguns testes preliminares indicaram a possibilidade de realizar membranas com 30 μm de espessura. A lâmina de silício utilizada em nosso processo possui, aproximadamente, 300 μm de espessura. Por conveniência, optamos por uma membrana quadrada com 2 mm de lado. De posse destas dimensões, a largura da cavidade da membrana é dada por:

$$w_c = w_m + \left[\frac{2(t_w - t_m)}{\tan \alpha} \right], \quad (6.1)$$

sendo que w_c é a largura da cavidade, w_m é a largura da membrana, t_w é a espessura da lâmina (substrato) de silício, t_m a espessura da membrana e α é o ângulo de corrosão. A Figura 6.2 mostra a estrutura da membrana contida no *die*.

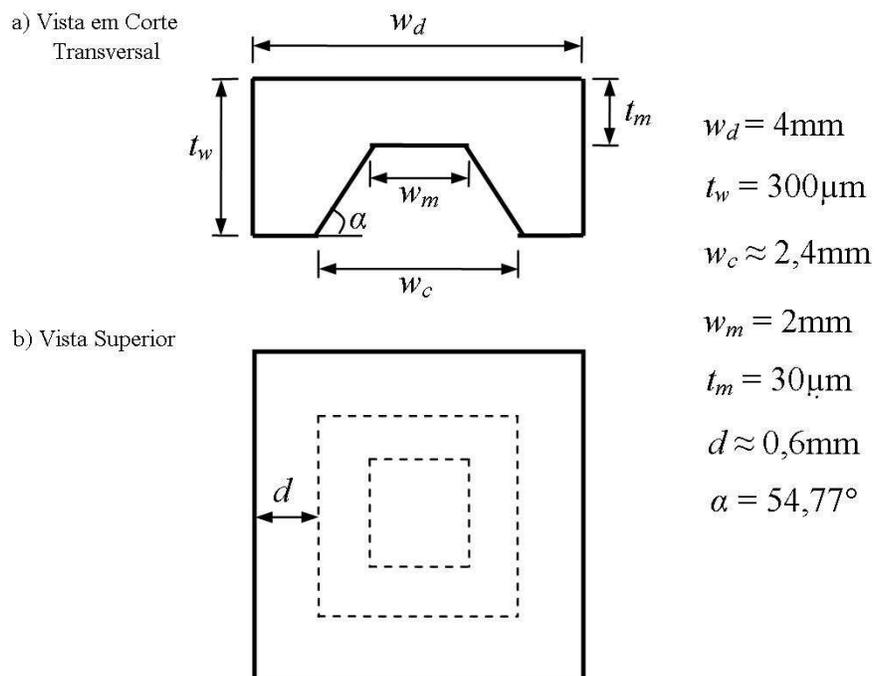


Figura 6.2 – Definição dos parâmetros geométricos de uma membrana quadrada.

6.3.2 – Construção do Modelo da Membrana em Elementos Finitos, Condições de Contorno e de Aplicação de Carga

O modelo construído foi baseado no elemento SOLID186 [47] que possui 20 nós e é utilizado em análise estrutural com formato quadrático. O elemento utiliza as propriedades anisotrópicas do material (silício) para a análise estrutural. Desta forma, o tensor de elasticidade do material é usado como dado de entrada do modelo. Este tensor de elasticidade é dado pela equação (3.28) e os coeficientes de elasticidade pela Tabela 3.4.

A aplicação das condições de contorno e de carga da membrana é feita por definir as regiões de engastamento e de aplicação de carga. As regiões de engastamento definem o contato do *die* com a base do encapsulamento. A região de aplicação de carga (pressão externa) é a parte inferior do *die* no centro da membrana. A Figura 6.3 mostra estas regiões. Note que, devido à simetria da membrana com relação à distribuição do estresse, é necessário analisar apenas $\frac{1}{4}$ da membrana.

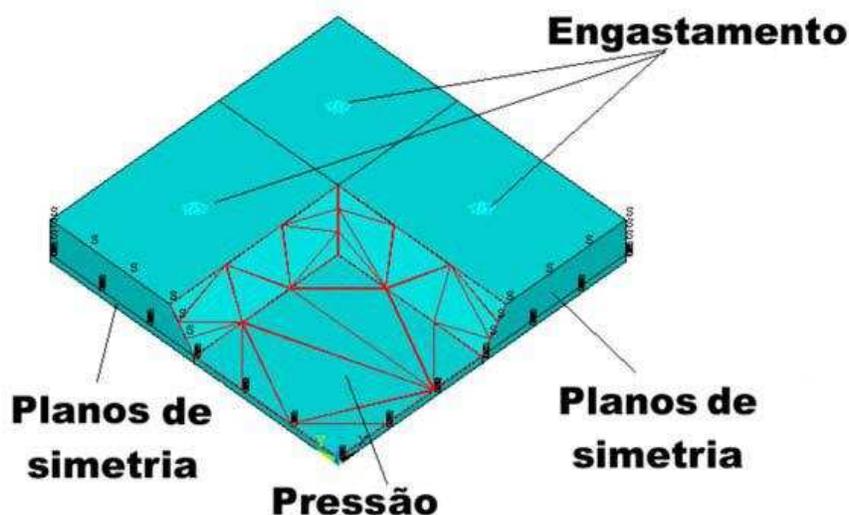


Figura 6.3 – Condição de contorno e de aplicação de cargas da membrana quadrada.

6.3.3 – Resultados FEM para a Membrana Quadrada

Usando os parâmetros de projeto especificados na seção 6.3.1 e aplicando uma pressão diferencial de 15 psi em faces opostas da membrana, obtemos os seguintes resultados para a membrana quadrada, conforme mostrado na Figura 6.4.

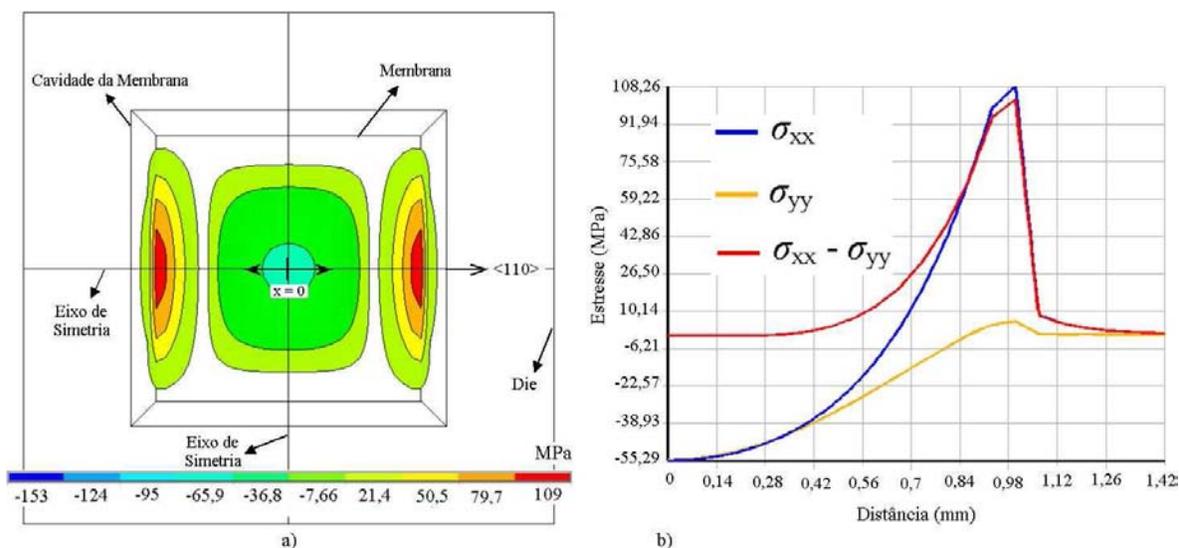


Figura 6.4 – Resultado do FEM para a membrana quadrada: a) Regiões de concentração de estresse e b) Magnitude do estresse σ_{xx} e σ_{yy} ao longo da membrana.

Uma diferença de estresse de aproximadamente 100 MPa foi obtida das simulações. Esta intensidade de estresse será usada como um dos parâmetros de entrada para a simulação dos piezoelementos. A Figura 6.4a mostra as regiões de máximo estresse. Pela Figura 6.4b notamos que a região de máximo estresse fica próxima a borda da membrana.

As regiões próximas às bordas da membrana deveriam ser as regiões onde os piezoelementos devem ser fabricados para a maximização da sensibilidade dos sensores de pressão. Note que a região de concentração de estresse é restrita a somente alguns micros, o que dificulta o posicionamento dos piezoelementos. Desta maneira, os piezoelementos devem ser fabricados tão pequenos quanto possível e localizados de forma a garantir que toda sua região ativa esteja sob a ação de um estresse mecânico normal e uniaxial as direções <110>.

6.4 – Simulação dos Piezoelementos

Como discutido anteriormente, a sensibilidade de um FTPS ou de um MTPS depende da localização da sua REC, da sua orientação angular e do fator de correção geométrico. O efeito de curto-circuito dos eletrodos destes piezoelementos pode causar uma redução significativa em suas sensibilidades, se eles não são geometricamente otimizados.

Métodos analíticos para estudo destes parâmetros são de difícil solução, necessitando de trabalhosos cálculos matemáticos [34,42,43,44]. Pela análise de elementos finitos, se as condições de contorno e de carga são fielmente aplicadas, as soluções para a otimização destes parâmetros mostram-se uma ótima alternativa àquele método.

Pela simulação da membrana quadrada da seção anterior, determinamos a localização ótima da REC e a magnitude do estresse mecânico nesta região. Agora, simularemos algumas topologias de piezoelementos, a fim de obtermos o perfil da curva de seus fatores de correção geométrico e da magnitude de suas tensões de saída. A Figura 6.5 apresenta as topologias em estudo.

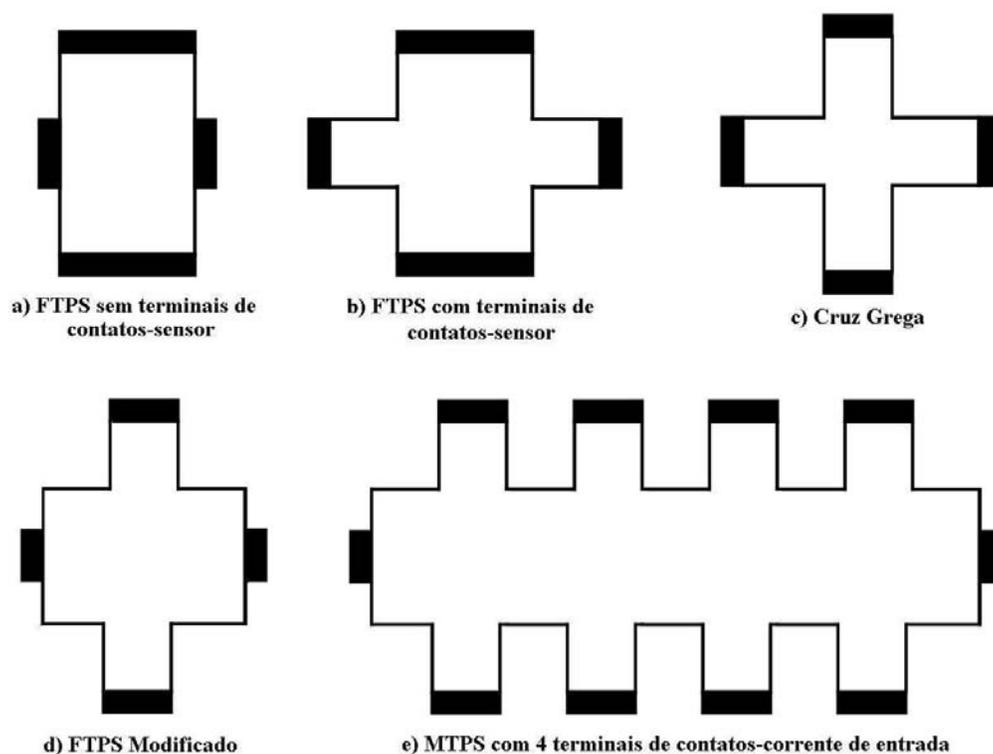


Figura 6.5 – Topologias dos piezoelementos para análise de elementos finitos.

6.4.1 – Construção do Modelo dos Sensores em Elementos Finitos

Na construção dos modelos consideramos que a distribuição do potencial na REC dos piezoelementos está contida no plano x - y . Desta maneira, o modelo de elementos finitos da membrana e do piezoelemento pode ser reduzido a 2D. Consideramos também no estudo analítico, através das equações (5.22) e (5.24), que a REC está sob ação de um estresse mecânico uniforme e rotacionada de 45° em relação ao estresse aplicado.

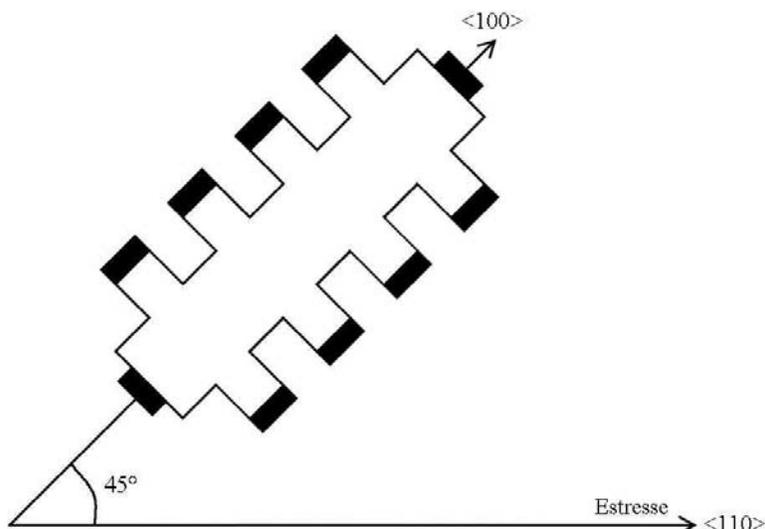


Figura 6.6 – Orientação do piezoelemento em relação ao estresse aplicado.

Devido à análise ser multifísica (estrutural + elétrica), utilizamos 2 elementos diferentes para cada análise: o PLANE183 e o PLANE223. O PLANE183 pode ser usado para análise de estresse, de deformação e de deformação generalizada de plano. O PLANE223 pode ser usado para análises estruturais, térmicas, elétricas, termoelétricas, piezoresistivas e piezoelétricas. Desta forma, por estes elementos possuírem um tipo de análise em comum (estrutural), eles interagem entre si o que nos permite mesclar uma análise elétrica e piezoresistiva com uma análise estrutural. Para mais detalhes, consultar [47].

O PLANE183 é um elemento de 8 nós com 2 graus de liberdade em cada nó (UX e UY). Este elemento possibilita a análise estrutural utilizando as propriedades anisotrópicas do silício. Os coeficientes de elasticidade, apresentados na Tabela 3.4, são inseridos como dados de entrada para este elemento. A Figura 6.7 apresenta a geometria deste elemento com seus nós.

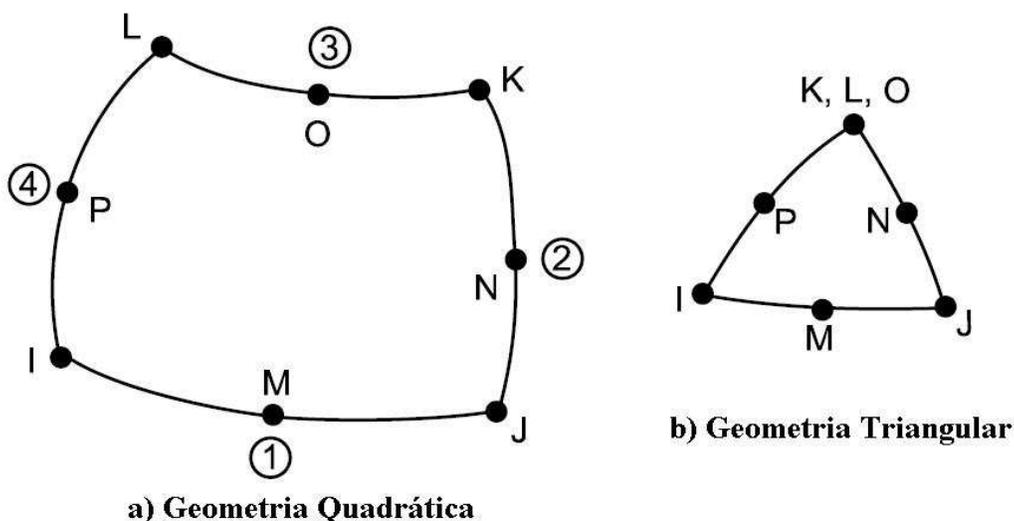


Figura 6.7 – Geometria do elemento finito: PLANE183 e PLANE223.

O PLANE223 é um elemento de 8 nós com até 3 graus de liberdade por nó. O número de DOFs por nó depende do tipo de análise. Para uma análise piezoresistiva há 3 DOFs: UX, UY e Volt (força em X, força em Y e tensão). Este elemento possibilita realizar análises estruturais e piezoresistivas utilizando as propriedades de material anisotrópico. Os coeficientes de elasticidade e de piezoresistência do material, Tabela 3.4 e Tabela 4.2 respectivamente, são utilizados como dados de entrada para este elemento. A Figura 6.7 apresenta a geometria destes elementos com seus nós.

6.4.2 – Condições de Contorno e Aplicação de Cargas

A membrana quadrada simulada na seção 6.3 possui 2 lados de engastamento (4 lados se consideramos o modelo inteiro) que estão opostos à pressão aplicada. Para o modelo em 2D, basta termos um lado da membrana engastado e outro sofrendo ação da força desejada. Desta maneira, as forças atuando na direção X e Y do lado do engaste devem ser nulas.

No capítulo 5, salientamos a respeito das condições de contorno dos piezoelementos devido aos seus eletrodos. Estes eletrodos causam o efeito de curto-circuito em sua vizinhança devido a sua baixa resistividade. Consideramos também que não há linhas de densidade de corrente na direção dos contatos-sensor, desde que um destes contatos esta conectado a uma carga de alta impedância. O modelo de elementos finitos descreve o efeito

de curto-circuito por considerar a região de interfaceamento entre o eletrodo e a REC como sendo de baixa resistividade. Isto é feito aplicando o DOF do tipo *volt* nestas regiões. A carga de alta impedância é simulada por considerar a resistividade do material em apenas uma direção. A Figura 6.8 apresenta o nosso modelo em elementos finitos e suas respectivas condições de contorno e de carga.

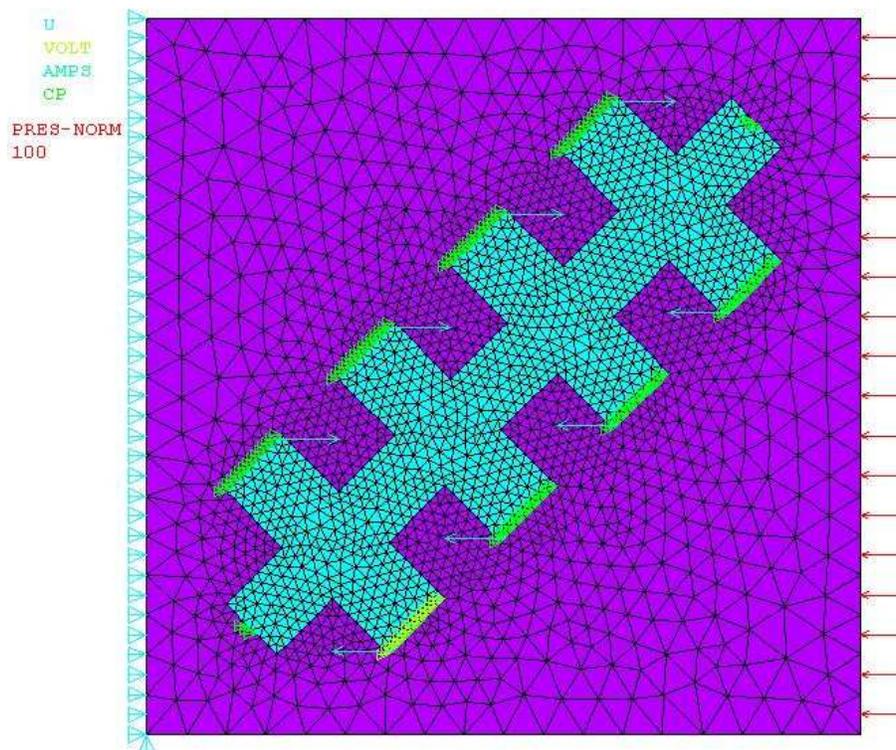


Figura 6.8 – Representação do piezoelemento, da membrana em elementos finitos e suas condições de contorno e de carga.

A aplicação das cargas ao nosso modelo é feita de maneira que maximizamos a tensão de saída dos piezoelementos. No capítulo 5, estudamos que para alcançar aquela maximização, os piezoelementos deveriam ser fabricados em silício tipo-p orientados na direção $\langle 100 \rangle$ e que suas RECs deveriam ser localizadas em uma região de máximo estresse uniforme, conforme Figura 6.6.

A análise superficial (2D) dos nossos piezoelementos foi feita considerando uma REC com resistividade de silício tipo-p de $7,8 \times 10^{-8} \text{ T}\Omega \mu\text{m}$ [15] e sob ação de um estresse mecânico uniforme de 100 MPa (obtido pela simulação da membrana).

6.4.3 – Resultados FEM para os Piezoelementos

No capítulo 4 e 5, ressaltamos que os contatos-sensor deveriam ser localizados na borda da REC e equidistantes dos contatos-corrente. Para validar esta informação, primeiro analisamos uma estrutura retangular simples, conforme Figura 6.5a, e, em seguida, analisamos as outras estruturas apresentadas na Figura 6.5. O Apêndice B apresenta o programa utilizado para a simulação dos piezoelementos.

6.4.3.1- Localização dos Contatos-sensor em um FTSP

Um FTSP sem terminais de contatos-sensor é considerado nesta análise. Variamos a localização dos contatos-sensor em relação ao comprimento da REC do FTSP. A Figura 6.9a apresenta o FTSP com seus parâmetros geométricos e a Figura 6.9b apresenta sua polarização. A fonte de corrente de polarização I_s é de $2 \mu\text{A}$.

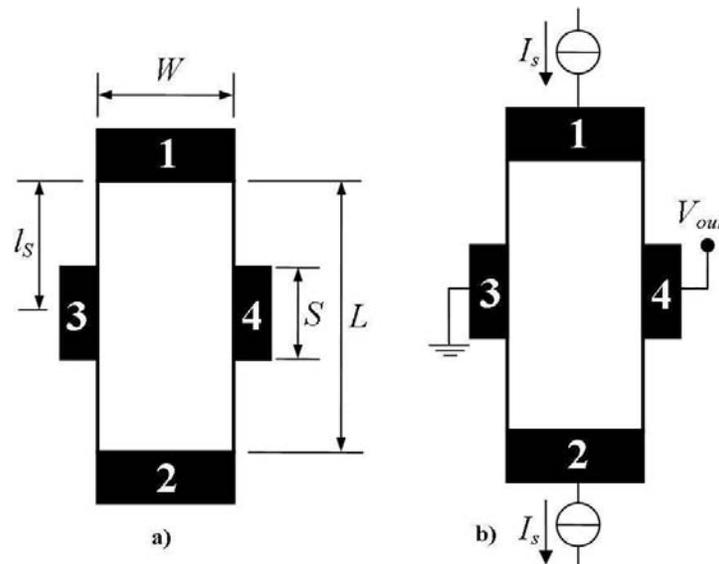


Figura 6.9 – Localização dos contatos-sensor no FTSP: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.

Na Figura 6.9a, W e L são a largura e comprimento do piezoelemento, respectivamente; S é a largura dos contatos-sensor e l_s é a distância de um dos contatos-corrente ao centro dos contatos-sensor. Na Figura 6.9b, V_{out} é o sinal de saída. Nas duas figuras, os números 1 e 2 numeram os contatos-corrente e 3 e 4 numeram os contatos-sensor.

A relação de $L/W = 2$ e $S/W = 0,10$ foram escolhidas para esta análise. Estas relações foram escolhidas arbitrariamente e estão de acordo com as relações mínimas exigidas pela fórmula do fator G deste tipo de geometria (ver equação 4.9). O valor de W foi de $20 \mu\text{m}$ e o valor de l_s foi obtido por variar a relação l_s/L de 5% a 95% em incrementos de 5%. A Figura 6.10 apresenta o resultado obtido.

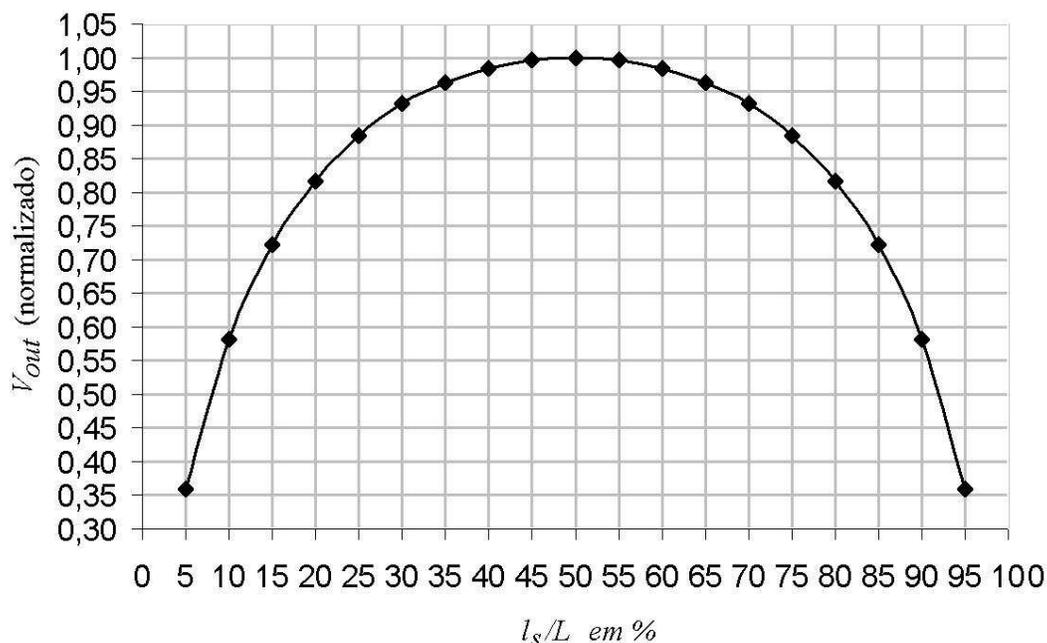


Figura 6.10 – Resultados da localização dos contatos-sensor em um FTPS sem terminais.

Como podemos observar pelo gráfico, a máxima tensão de saída do FTPS ($V_{out} \approx 10,7 \text{ mV}$) é obtida quando a relação l_s/L é 50%. Desta forma, os contatos-sensor devem estar localizados equidistantes dos contatos-corrente para maximização da tensão de saída. Este resultado era esperado desde que, o centro da REC é a região mais distante aos contatos-corrente e, portanto, a influência destes contatos nas linhas equipotenciais é minimizada.

Como a maximização da sensibilidade dos piezoelementos é um dos objetivos de nosso trabalho, para as análises seguintes, consideramos que os contatos-sensor estarão sempre localizados equidistantes dos contatos-corrente. Nas próximas etapas, analisaremos a influência das dimensões da REC e dos contatos-sensor nas topologias apresentadas na Figura 6.5.

6.4.3.2 - FTPS sem Terminais de Contatos-sensor

Nesta seção apresentamos o estudo da influência da relação L/W e S/W sobre um FTPS sem terminal de contatos-sensor. Este piezoelemento é mostrado na Figura 6.11. A Figura 6.11a apresenta o FPTPS com seus parâmetros geométricos e a Figura 6.11b apresenta a polarização do FTPS.

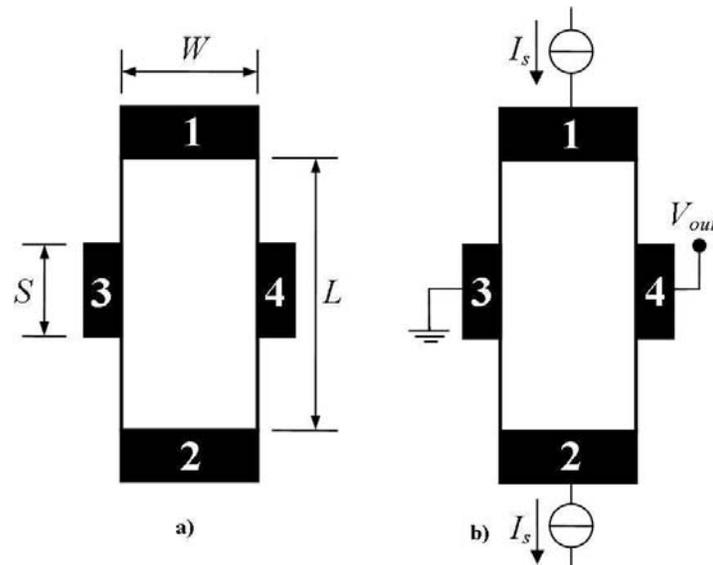


Figura 6.11 – FTPS sem terminais de contatos-sensor: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.

Primeiramente, analisamos a influência da relação L/W na tensão de saída do sensor. A relação S/W foi mantida tão pequena quanto possível, então que minimizamos a influência dos contatos-sensor na tensão de saída do FTPS. A relação L/W foi variada de 0,1 a 4 enquanto mantínhamos a relação de S/W igual a 0,01. O W foi escolhido arbitrariamente de 20 μm . A Figura 6.12 apresenta o resultado obtido.

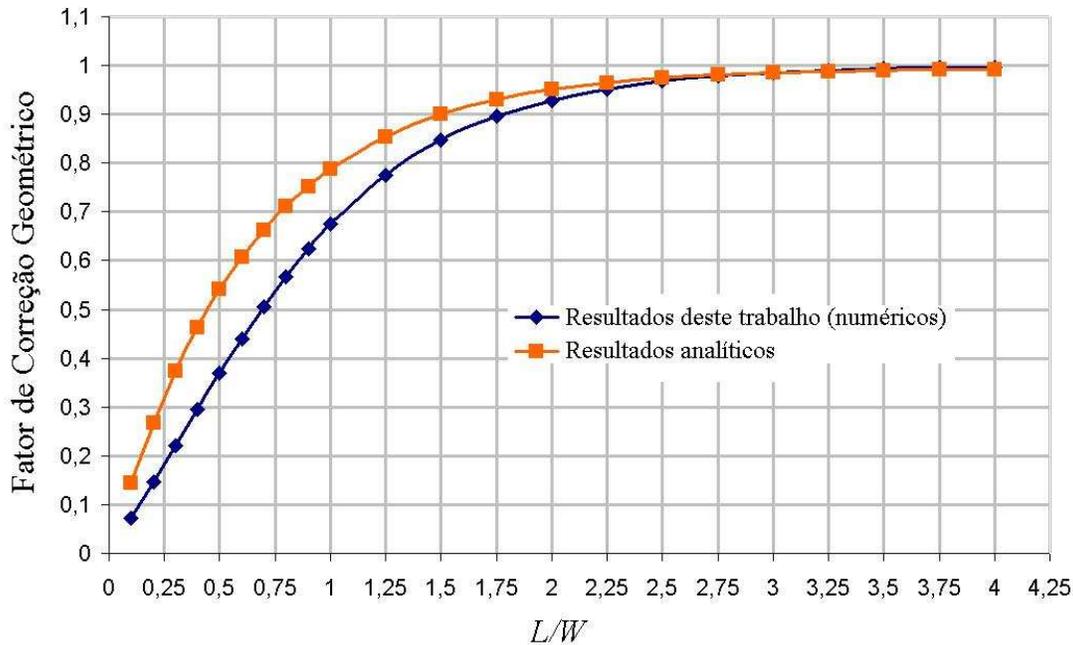


Figura 6.12 – Resultado da influência de L/W de um FTFS sem terminais de contatos-sensor.

Como podemos observar, à medida que encurtamos a REC (L se aproxima de W), a influência dos contatos-corrente aumenta. Isto porque as linhas equipotenciais perpendiculares às linhas de densidade de corrente se alinham com os contatos ôhmicos dos contatos-corrente. À medida que alongamos a REC, esta influência é minimizada e o fator G converge a um valor próximo a 1. Este resultado está de acordo com a literatura [17, 18, 34].

A Figura 6.12 também apresenta o resultado para o fator G através da equação 4.9 (método analítico). Quantitativamente, o fator G numérico apresentou uma diferença de até 5% em relação ao analítico. Esta diferença ocorreu enquanto considerávamos uma REC relativamente curta. Conforme aumentamos a REC, ambos os fatores G se aproximaram de 1.

Uma maximização da sensibilidade do piezoelemento é obtida se a relação de L/W é considerada tão longa quanto possível a fim de se obter um G próximo a 1 ($L \rightarrow \infty$). Pelo gráfico, uma relação de $L/W \geq 2$ mostra-se suficiente, resultando em um G de aproximadamente 0,95.

Na seqüência analisamos a influência dos contatos-sensor na tensão de saída do FTPS. Assim, consideramos $L/W = 2$ e variamos a relação S/W de 0,01 a 1 em incrementos aleatórios. Por conveniência, consideramos $W = 20 \mu\text{m}$. A Figura 6.13 apresenta este resultado.

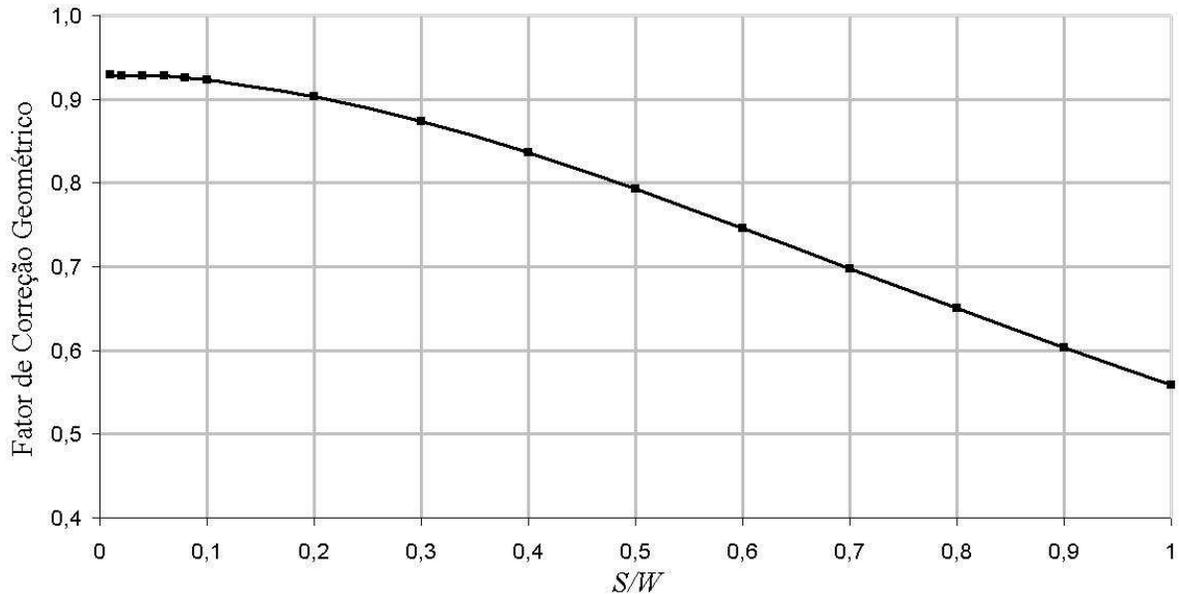


Figura 6.13 – Resultado da influência de S/W de um FTPS sem terminais de contatos-sensor.

Conforme aumentamos a relação S/W aumentamos a influência dos contatos-sensor na tensão de saída do piezoelemento. Com o aumento da largura dos contatos-sensor, o efeito de curto-circuito das linhas equipotenciais é aumentado. Para uma otimização deste parâmetro, devemos mantê-lo tão pequeno quanto possível a fim de minimizarmos este efeito. Idealmente, estes contatos deveriam ser pontuais ($S \rightarrow 0$).

Nossas análises mostram que o fator G do FTPS é dependente tanto das dimensões do piezoelemento quanto dos contatos-sensor. Para uma comparação direta dos resultados apresentados neste trabalho com os resultados de Gridchin *et al* [17], consideramos uma relação de W/L e S/L ao invés de L/W e S/W e utilizamos a mesma faixa de variação para W/L e S/L que as apresentadas por Gridchin *et al*. Assim, consideramos W/L variando de 0,2 a 1 com incrementos de 0,1 e S/W como segue: 0,01, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5. A Figura 6.14a apresenta os resultados para estas variações.

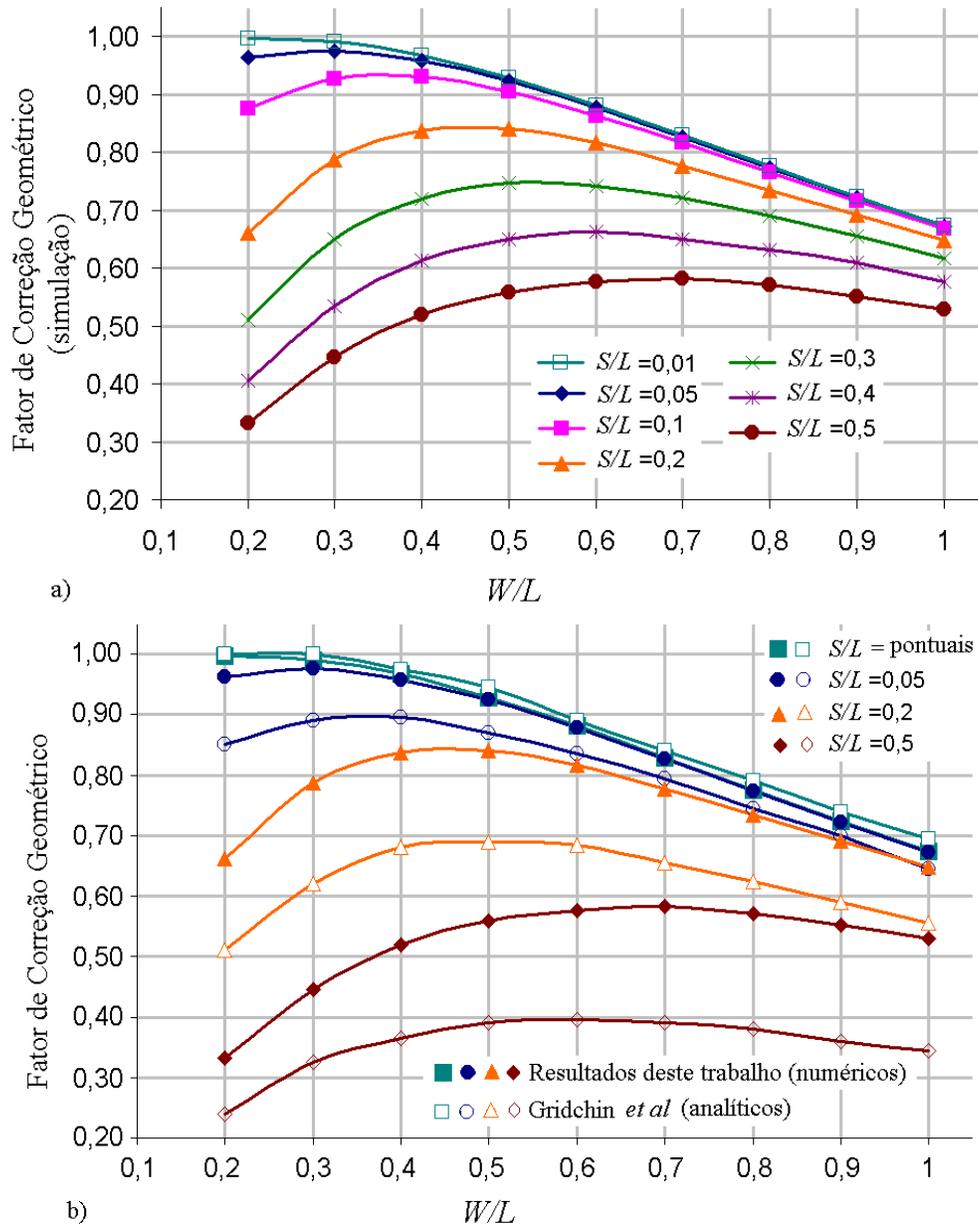


Figura 6.14 – Resultado da influência de W/L e S/L de um FTPS sem terminais de contatos-sensor: a) Resultados numéricos e b) Comparação entre resultados numéricos e analíticos.

Os resultados dos gráficos mostram que há uma relação ótima entre o comprimento dos contatos-sensor e as dimensões do piezoelemento, se uma tensão de saída máxima é desejada. À medida que os contatos-sensor tornam-se maiores, o fator de correção geométrica é minimizado mesmo que o comprimento do piezoelemento foi aumentado. O contrário ocorre se consideramos os contatos-sensor bem pequenos, conforme curva de $S/L = 0,01$. Neste caso, como já analisado na Figura 6.12, o fator G se aproxima de 1 a partir de uma determinada relação de W/L .

A Figura 6.14b mostra uma comparação entre nossos resultados numéricos com os analíticos de Gridchin *et al.* Embora nossos resultados sejam qualitativamente próximos, eles diferem em magnitude. Quantitativamente, a diferença é aumentada à medida que os contatos-sensor são aumentados.

A Figura 6.15 mostra o resultado FEM do FTPS. A Figura 6.14a mostra as linhas de densidade de corrente para um FTPS sem terminais de contatos-sensor com uma relação de $L/W = 4$ e $S/W = 0,2$. Note que devido aos contatos-sensor não serem pontuais, as linhas de densidade de corrente são curto-circuitadas por estes contatos. A Figura 6.15b apresenta o resultado da distribuição de potencial neste FTPS.

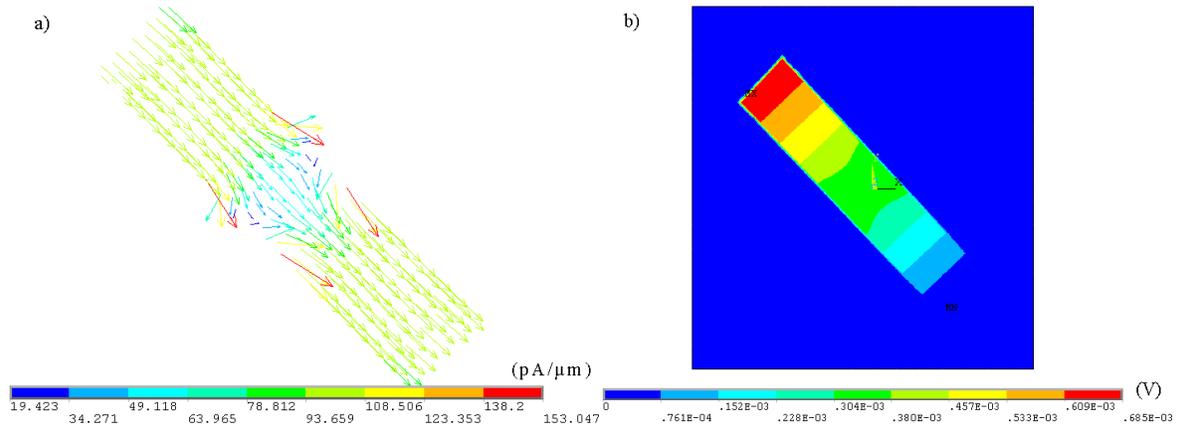


Figura 6.15 – Resultado FEM do FTPS sem terminais de contatos-sensor: a) Fluxo de densidade de corrente e b) Distribuição de potencial.

Concluimos através da análise do FTPS sem terminais que a influência dos contatos-sensor, na tensão de saída do piezoelemento, pode minimizar sua magnitude mesmo que um piezoelemento relativamente longo foi utilizado (ver resultados da Figura 6.14a). Portanto, a minimização da influência dos contatos-sensor no sinal de saída do FTPS é um dos principais parâmetros a serem otimizados. Nesta direção, analisamos, na seqüência, a topologia apresenta na Figura 6.5b.

6.4.3.3 - FTPS com terminais de contatos-sensor

A Figura 6.16 apresenta o FTPS com terminais de contatos-sensor. A Figura 6.16a apresenta os parâmetros geométricos e a Figura 6.16b mostra o esquema de polarização do

FTPS com terminais de contatos-sensor. Na Figura 6.16a, l é o comprimento dos terminais destes contatos.

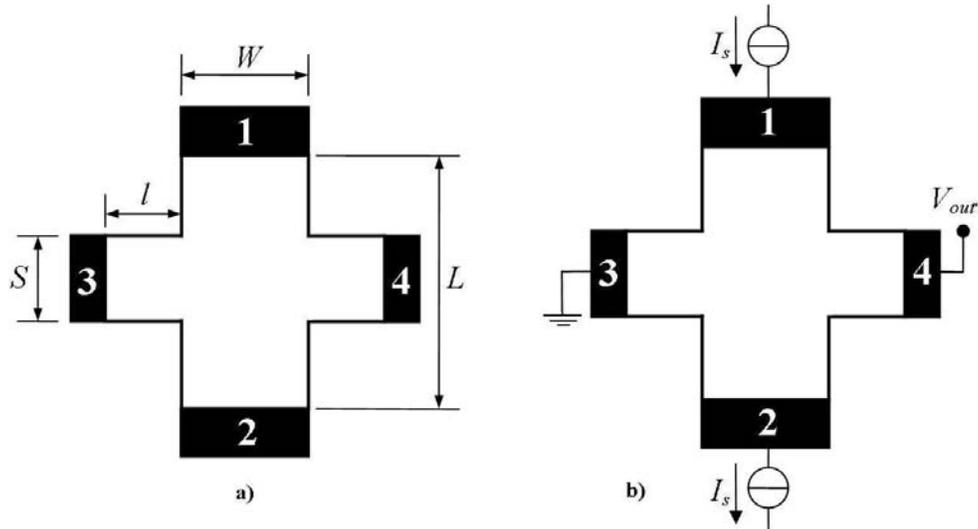


Figura 6.16 – FTPS com terminais de contatos-sensor: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.

Concluimos anteriormente através da análise do FTPS sem terminais de contatos-sensor que o fator geométrico destes piezoelementos é muito dependente dos contatos-sensor, mesmo que piezoelementos longos foram considerados. Portanto, é conveniente, para esta topologia com terminais de contatos-sensor, analisamos a influência destes contatos se agora terminais são considerados. Para isso, introduzimos o parâmetro l/S e o variamos de 0,01 a 3 em incrementos aleatórios. Consideramos também uma REC relativamente longa, com $L/W = 1,5$, e um contato-sensor relativamente curto, com $S/W = 0,15$ e $W = 20 \mu\text{m}$. A Figura 6.17 apresenta este resultado.

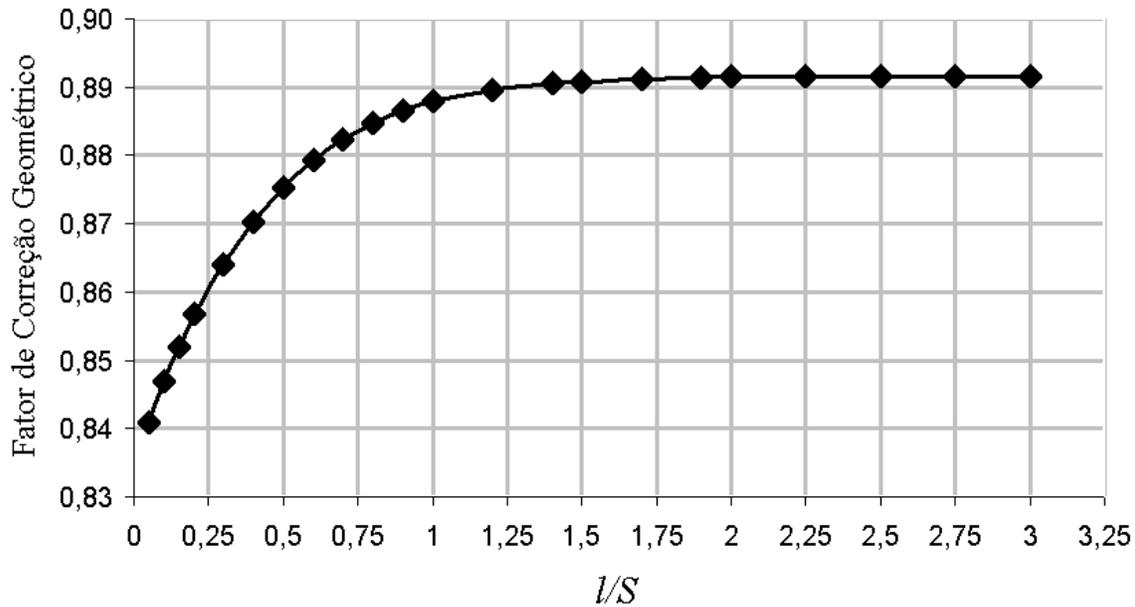


Figura 6.17 – Influência dos terminais de contatos-sensor no FTPS.

O resultado da Figura 6.17 mostra que existe uma relação ótima de l/S para a qual a influência dos contatos-sensor na tensão de saída do FTPS é minimizada. A relação $l/S = 1$ deveria ser suficiente para otimização do FTPS para um compromisso de sensibilidade e impedância de saída. A partir de $l/S = 1$, não há um aumento significativo da sensibilidade, mas a impedância de saída aumenta proporcionalmente a l/S . Este resultado está de acordo com o apresentado por Bao *et al* [18], embora haja uma diferença na magnitude de nossos resultados.

A Figura 6.18 apresenta o comportamento do FTPS com terminais de contatos-sensor para uma variação de suas dimensões (L/W) mantendo-se $l/S = 1$. Consideramos uma relação de $S/W = 0,15$ e $W = 20 \mu\text{m}$.

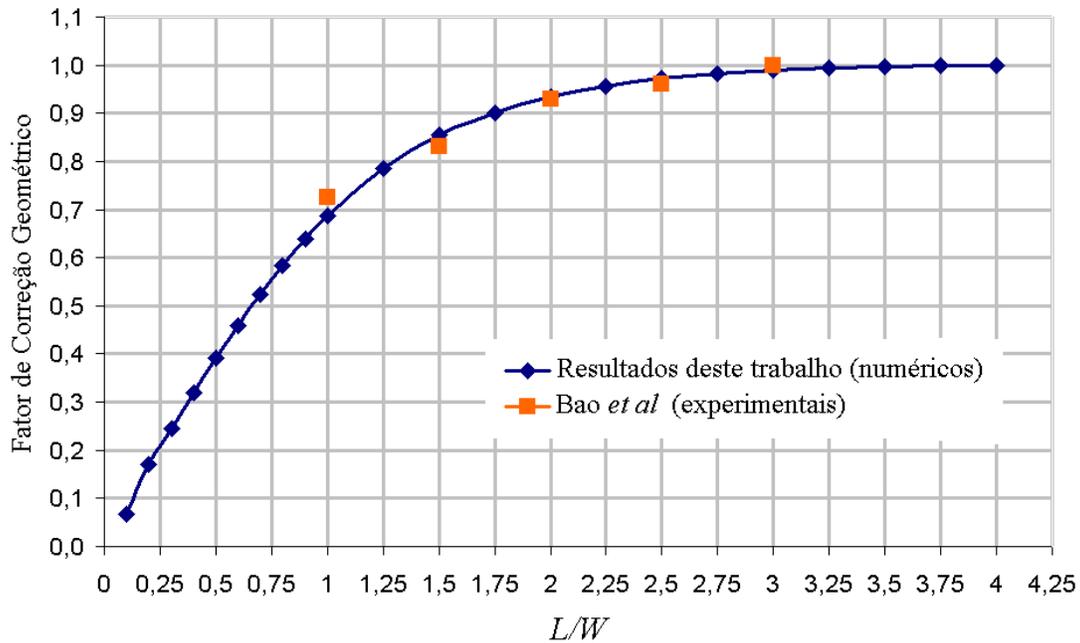


Figura 6.18 – Fator de correção geométrico do FTSP com terminais de contatos-sensor.

Note que mesmo que estamos considerando contatos-sensor não pontuais, o fator de correção geométrico para este dispositivo assemelha-se a um fator G de um FTSP sem terminais e com S/W pequeno (ver Figura 6.11). Este resultado era esperado desde que, para $l/S \geq 1$, o efeito de curto-circuito é minimizado. Na Figura 6.18, também comparamos nosso resultado com os resultados experimentais de Bao *et al.* Bao considerou uma relação de $l/S = 1,5$ e nós estamos considerando $l/S = 1$.

A Figura 6.19 apresenta o resultado da distribuição de potencial, através de elementos finitos, para um FTSP com terminais de contatos-sensor com uma relação de $L/W = 3$, $l/S = 1$ e $S/W = 0,15$.

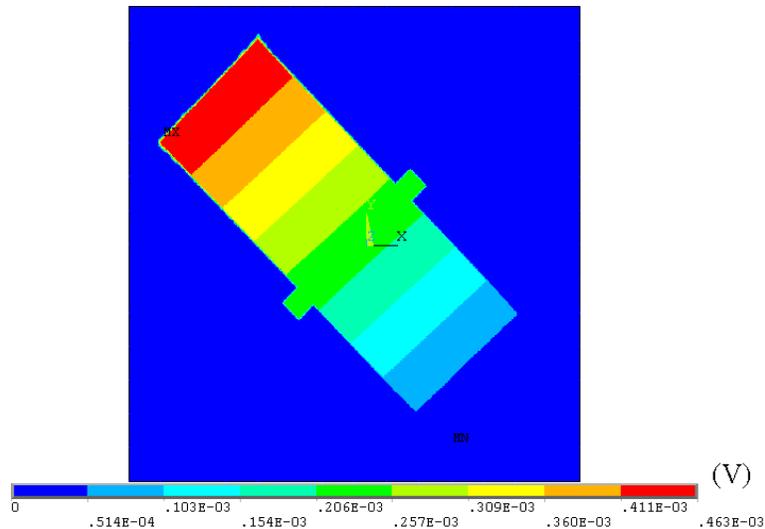


Figura 6.19 – Distribuição de potencial, através de elementos finitos, do FTSP com terminais de contatos-sensor.

O FTSP com terminais de contatos-sensor apresentou, para as relações de dimensões onde $G = 1$, uma tensão de saída de aproximadamente 10,7 mV.

6.4.3.4 - A Cruz Grega

Outra topologia de FTSP que pode minimizar o efeito de curto-circuito é a Cruz Grega. Esta topologia é um caso particular do FTSP com terminais de contatos-sensor onde o tamanho dos braços dos contatos-corrente é igual ao tamanho dos braços dos contatos-sensor. Devido a esta simetria, esta topologia apresenta algumas vantagens [48], tais como:

- Os terminais de contatos-sensor estão distantes do centro da REC e, portanto, tem baixa influência na distribuição de potencial próximo a este centro;
- A Cruz Grega é uma estrutura simétrica, então os seus terminais podem ser trocados entre si por comutar a tensão de saída;
- Erros de fotolitografia têm baixa influência na tensão de saída.

Além disso, técnicas de cancelamento de *offset* podem ser aplicadas [49] devido à possibilidade de comutação dos terminais. A Figura 6.20 apresenta os parâmetros geométricos e o esquema de polarização desta topologia.

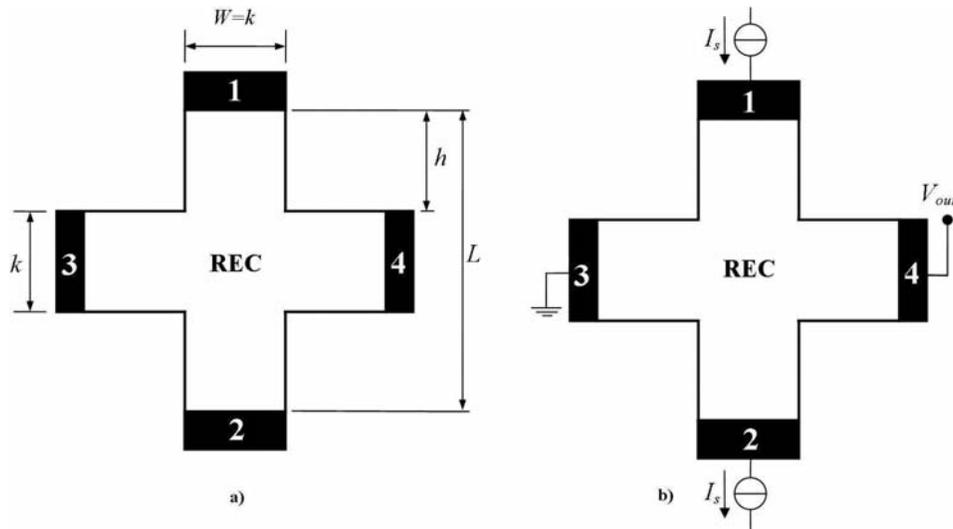


Figura 6.20 - FTFS em forma de Cruz Grega: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.

Na Figura 6.20a, k e h são a largura e o comprimento dos braços, respectivamente. Devido à simetria, $k = W$ e $L = 2h + W$.

A fim de analisarmos o fator de correção geométrico desta topologia, variamos h e mantivemos W constante. Fazendo isso, variamos L então que variamos L/W e h/k . L/W foi variado de 1,03 a 7 em incrementos de 0,25 e h/k foi variado de 0,015 a 3 em incrementos aleatórios. Em seguida, comparamos o fator de correção geométrico obtido da simulação com o fator G analítico proposto por Gridchin *et al* [48]. O valor de W foi de 20 μm . A Figura 6.21 apresenta os resultados.

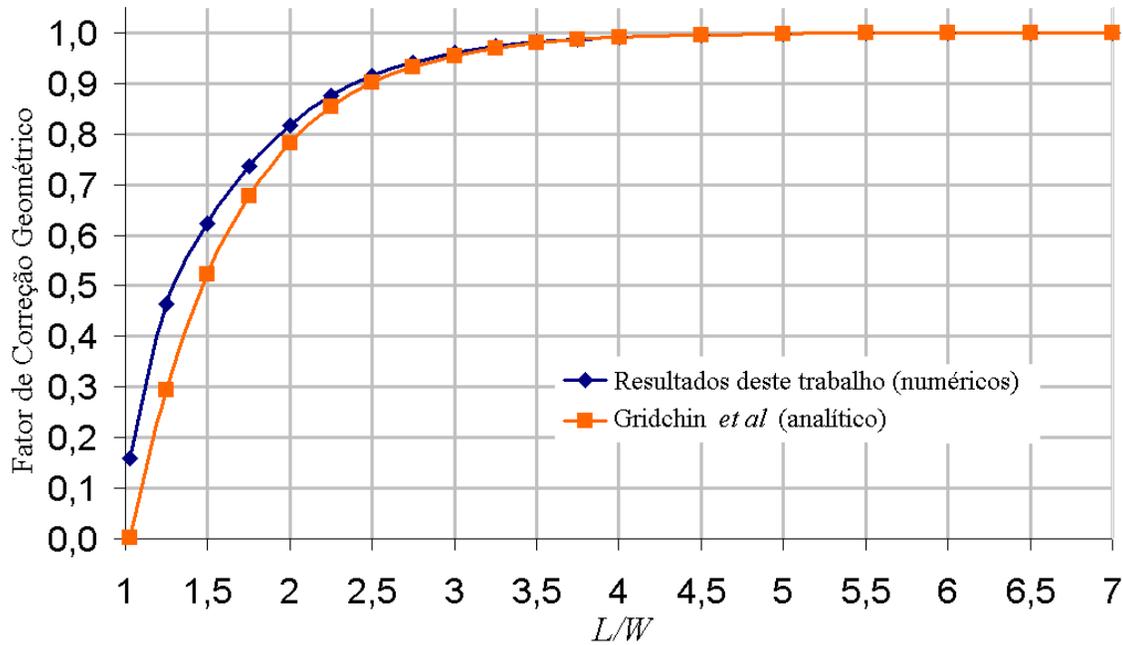


Figura 6.21 – Fator G do FTSP em forma de Cruz Grega.

Da mesma forma que para o FTSP com terminais de contatos-sensor, o fator de correção geométrico para a topologia de Cruz Grega é melhorado a partir de aproximadamente $L/W = 3$, onde h/k é igual 1 e $G \approx 0,95$. Se $\frac{L}{W} \geq 3$, então $0,95 \leq G \leq 1$. Se fizermos uma analogia entre os parâmetros h/k e l/S , do FTSP da análise anterior, observamos que ambos são análogos. Portanto, era esperado que a partir de h/k maior do que 1, o fator G estivesse próximo a unidade. A partir deste valor, os nossos resultados têm uma diferença de até 0,5% em relação aos de Gridchin *et al*. Contudo, abaixo deste valor, a diferença entre nossos resultados é aumentada, alcançando 4% quando $L/W = 2$ e até 100% quando $L/W \approx 1$. Qualitativamente, os resultados estão satisfatórios para toda a faixa de variação de L/W .

A Figura 6.22 apresenta o resultado da distribuição de potencial, através de elementos finitos, para um FTSP com terminais de contatos-sensor com uma relação de $L/W = 4$ e $h/k = 1,5$.

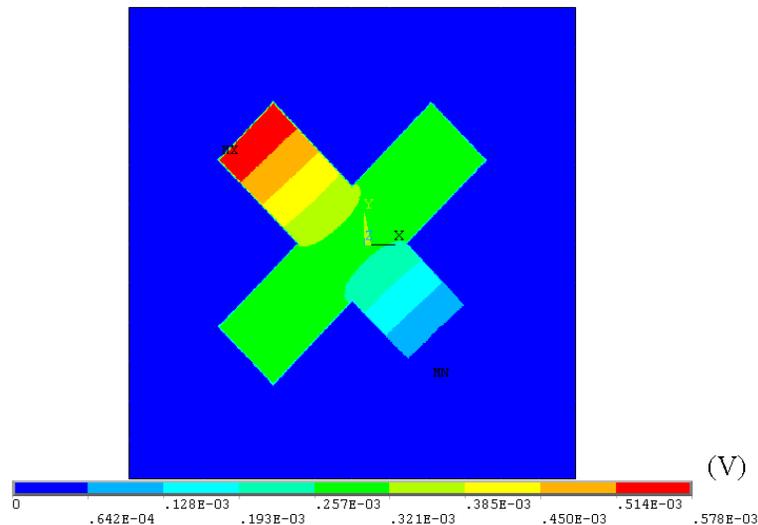


Figura 6.22 – Distribuição de potencial, através de elementos finitos, do FTPS em forma de Cruz Grega.

Sumarizando, a maximização da tensão de saída dos FTPSs (sem e com terminais de contatos-sensor e do tipo Cruz Grega) é obtida por projetar piezoelementos relativamente longos. No caso do FTPS sem terminais de contatos-sensor, os contatos-sensor deveriam ser pontuais. Caso contrário, FTPSs com terminais de contatos-sensor e do tipo Cruz Grega são preferíveis. Para uma eficiência maior que 90%, FTPSs com terminais devem ter $L/W \geq 2$ e $l/S \geq 1$ e a Cruz Grega deve ser projetada com $L/W \geq 3$ e $h/k \geq 1$.

A Cruz Grega apresentou, para as relações de dimensões onde $G = 1$, uma tensão de saída de aproximadamente 10,7 mV.

6.4.3.5 - FTPS Modificado

Apresentamos os fatores de correção geométrico de algumas estruturas a fim de maximizarmos suas tensões de saída. Contudo, nosso objetivo, além de maximizar a sensibilidade por maximizar G , é melhorar a sensibilidade dos FTPSs propondo uma nova topologia de piezoelemento.

A nova topologia de piezoelemento, que é proposta neste trabalho, possui multi-terminais de contatos-corrente, como mostrada da Figura 6.5e. Contudo, a fim de estudarmos esta topologia, devemos primeiro estudar a topologia apresentada na Figura

6.5d. A Figura 6.23 apresenta os parâmetros geométricos e o esquema de polarização desta topologia.

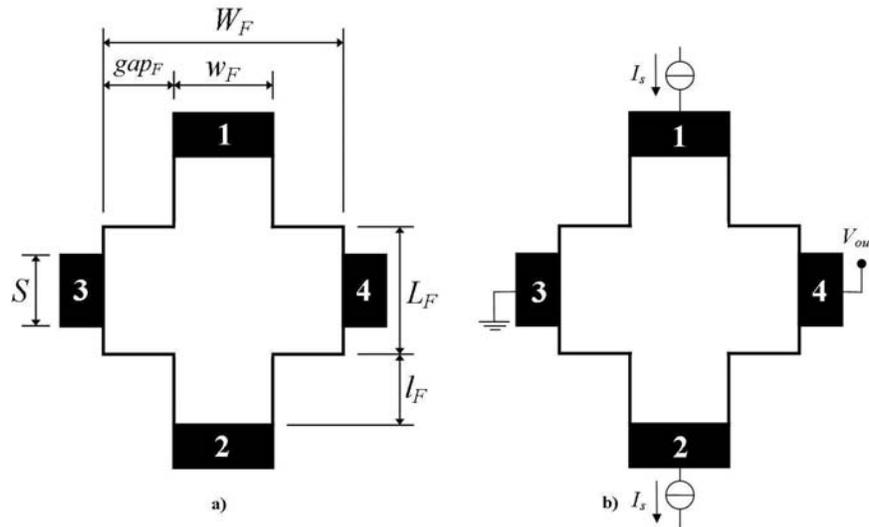


Figura 6.23 - FTFS Modificado: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.

Na Figura 6.23a, W_F e L_F são a largura e o comprimento do piezoelemento (sem terminais), respectivamente. l_F e w_F são o comprimento e a largura dos terminais de contatos-corrente, respectivamente; e gap_F é a distância entre a borda do piezoelemento e o terminal de contato-corrente.

Analisando a influência de L_F/W_F por variar a relação l_F/w_F , estudamos o fator de correção geométrico desta topologia. A relação de S/W foi considerada ser tão pequena quanto possível (variando de 0,01 a 0,02) e $W_F = w_F = gap_F = 20 \mu\text{m}$. L/W foi variado de 0,01 a 4 em incrementos aleatórios e l_F/w_F foi variado de 0,01 a 2, como segue: 0,01, 0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5, 1,75 e 2. A Figura 6.24 mostra os resultados.

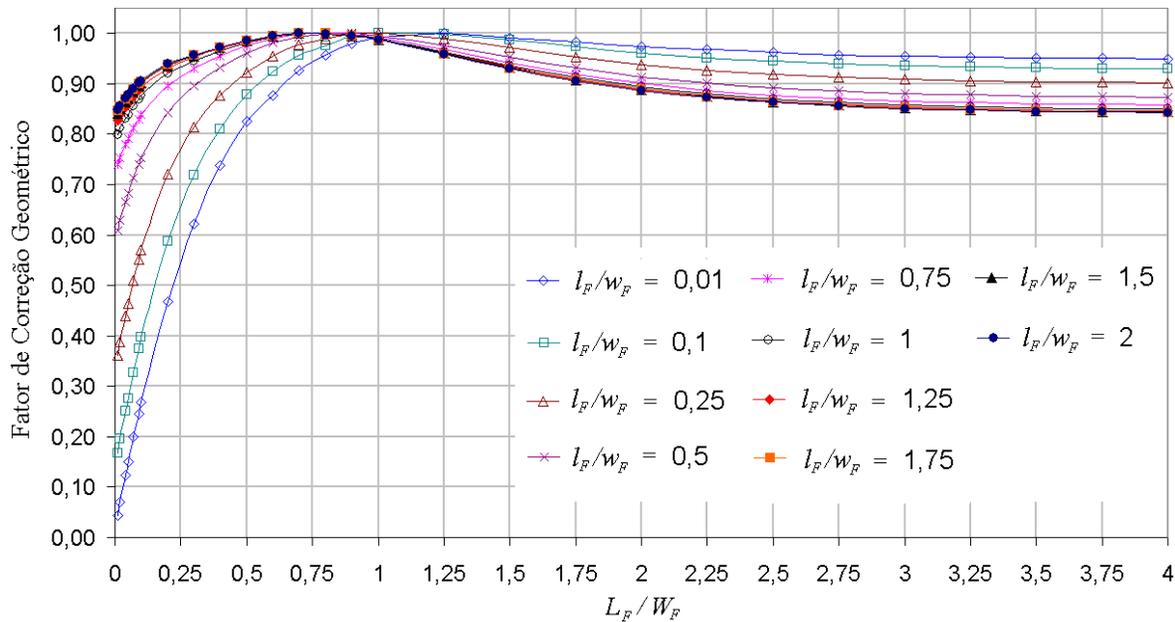


Figura 6.24 – Fator G numérico de um FTPS Modificado para uma variação de l_F/w_F de 0,01 a 2.

Os resultados mostram que há uma relação ótima entre as dimensões do piezoelemento (L_F/W_F) e as dimensões dos terminais de contatos-corrente (l_F/w_F). Notamos ainda que conforme o comprimento dos terminais de contatos-corrente torna-se maior, um menor L/W é necessário para maximizarmos o fator G . Para uma faixa de variação de L_F/W_F entre 0,7 e 1,25, o fator G é fortemente maximizado para toda variação de l_F/w_F . Para L_F/W_F menor que 0,7, observamos uma acentuada atenuação do fator G , conforme l_F/w_F é diminuído. Concluimos que esta atenuação é devido à influência dos contatos-corrente. Para L_F/W_F maior que 1,25, também notamos uma atenuação de G , porém com menor intensidade. Aqui, os contatos-corrente não mais influenciam G acentuadamente, desde que o piezoelemento começa a se tornar longo. Contudo, a influência dos contatos-sensor passa a prevalecer desde que mais linhas equipotenciais estão sendo curto-circuitadas. O perfil destas curvas se assemelha ao das curvas da Figura 6.14, porém com uma acentuada maximização do fator G para toda a variação de L_F/W_F : ambos os resultados possuem um ponto de máximo G , a partir do qual, há uma minimização deste fator. Nossa análise numérica mostra que $l_F/w_F \geq 1$ é suficiente para maximização de G para uma ampla variação de L_F/W_F .

A Figura 6.25 mostra os resultados para $l_F/w_F \geq 1$. Todas as curvas atingem um máximo em $L_F/W_F = 0,7$. O fator G também mostrou ser fortemente dependente da relação S/W . Portanto, este parâmetro deve ser mantido tão pequeno quanto possível.

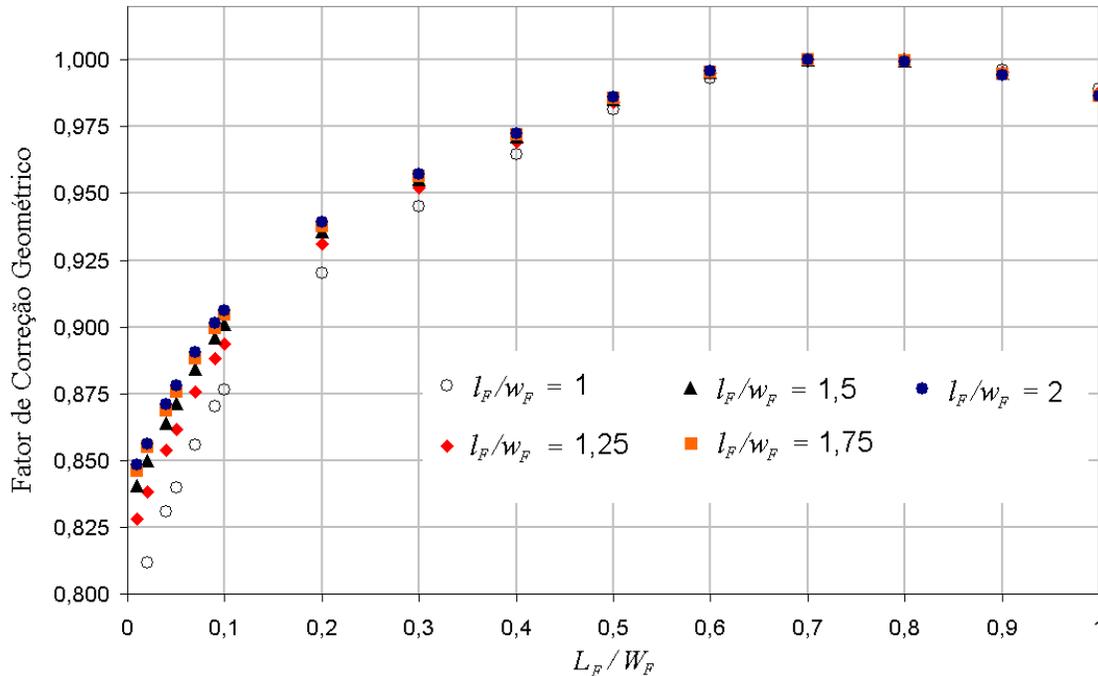


Figura 6.25 - Fator G numérico de um FTFS Modificado para $l_F/w_F \geq 1$.

Em comparação com outros perfis de curvas dos fatores de correção geométrico das topologias analisadas anteriormente, notamos que, de forma geral, o perfil da curva para um FTFS Modificado pode ser considerado próximo a 1 para toda uma variação de L_F/W_F , se longos terminais de contatos-corrente são utilizados. A escolha da dimensão do piezoelemento (L_F/W_F) e da dimensão dos terminais de contatos-corrente (l_F/w_F) deve ser feito de forma a maximizar G .

A Figura 6.26 apresenta o resultado da distribuição de potencial, através de elementos finitos, para um FTFS com terminais de contatos-sensor com uma relação de $L_F/W_F = 0,7$, $l_F/w_F = 1,25$ e $S/W = 0,01$.

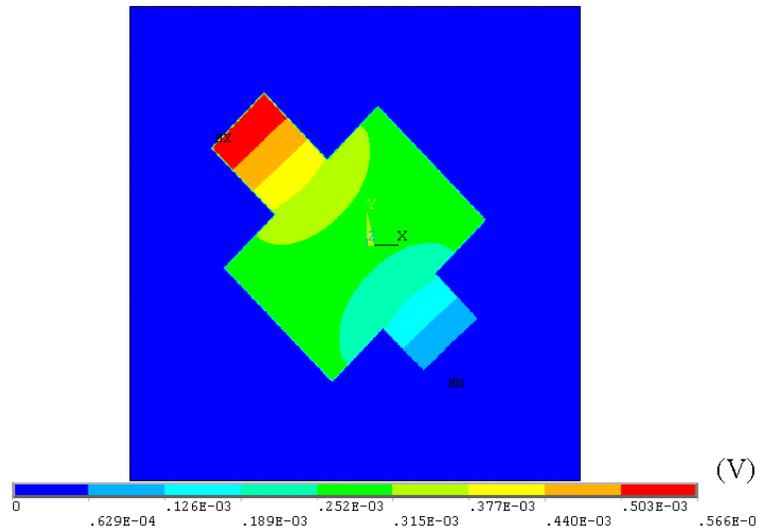


Figura 6.26 – Distribuição de potencial, através de elementos finitos, do FTPS Modificado.

O FTPS Modificado apresentou, para as relações de dimensões onde $G = 1$, uma tensão de saída de aproximadamente 10,7 mV.

6.4.3.6 - MTPS com 4 Terminais de Contatos-corrente de Entrada

Extrapolando o FTPS modificado da análise anterior formamos um MTPS. Esta nova topologia maximiza a sensibilidade do piezoelemento através do aumento de terminais de contatos-corrente de entrada (ver capítulo 5). Apresentamos a seguir, a análise numérica desta nova topologia.

A Figura 6.27 mostra um 4-MTPS (extrapolação de 4 FTPS Modificado). A Figura 6.27a mostra os parâmetros geométricos e a Figura 6.27b mostra o esquema de polarização.

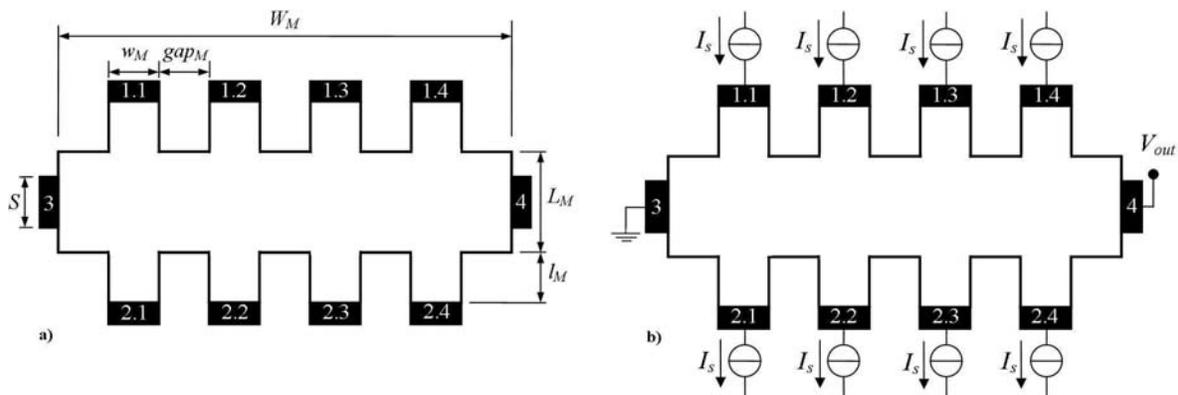


Figura 6.27 – MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada: a) Parâmetros geométricos e b) Esquema de polarização.

Na Figura 6.27a, W_M e L_M são a largura e o comprimento do piezoelemento (sem terminais), respectivamente; l_M e w_M são o comprimento e a largura dos terminais de contatos-corrente, respectivamente; S é a largura dos contatos-sensor e gap_M é a distância entre 2 terminais de contatos-corrente e entre estes e a borda do piezoelemento. W_M é dado por $W_M = 4 w_M + 5 gap_M$. Em ambas as figuras, os números 1.i e 2.i identificam os contatos-corrente.

Analisando a influência de L_M/W_M por variar a relação l_M/w_M , estudamos o fator de correção geométrico desta topologia. Para uma comparação com os resultados do FTPS Modificado, variamos estes parâmetros no mesmo intervalo. Desta forma, consideramos S/W tão pequeno quanto possível (variando de 0,01 a 0,03) e $w_M = gap_M = 20 \mu\text{m}$. W_M foi de $W_M = 180 \mu\text{m}$ e L_M/W_M foi variado de 0,01 a 4 em incrementos aleatórios. l_M/w_M foi variado de 0,01 a 2, como segue: 0,01, 0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5, 1,75 e 2. A Figura 6.28 mostra os resultados.

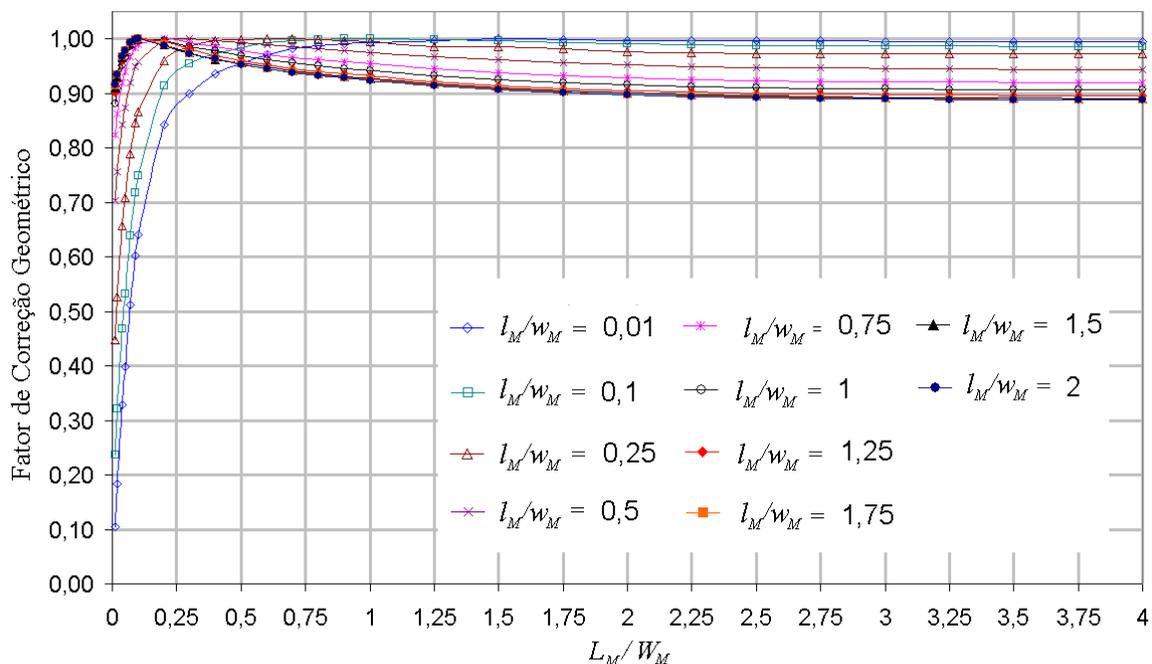


Figura 6.28 - Fator G numérico do MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada para uma variação de l_M/w_M de 0,01 a 2.

Da mesma forma que para o FTPS Modificado, o fator G do 4-MTPS apresenta um ponto ótimo para sua maximização em relação às dimensões do piezoelemento e dos

terminais de contatos-corrente. Os resultados mostram que conforme aumentamos a relação l_M/w_M , o fator G é maximizado e tende a uma estabilidade próximo a unidade para toda uma variação de L_M/W_M . Nossas simulações mostraram que, igualmente ao FTPS Modificado, a relação de $l_M/w_M \geq 1$ deve ser considerada em detalhe para a otimização de G . A Figura 6.29 mostra as curvas para $l_M/w_M \geq 1$.

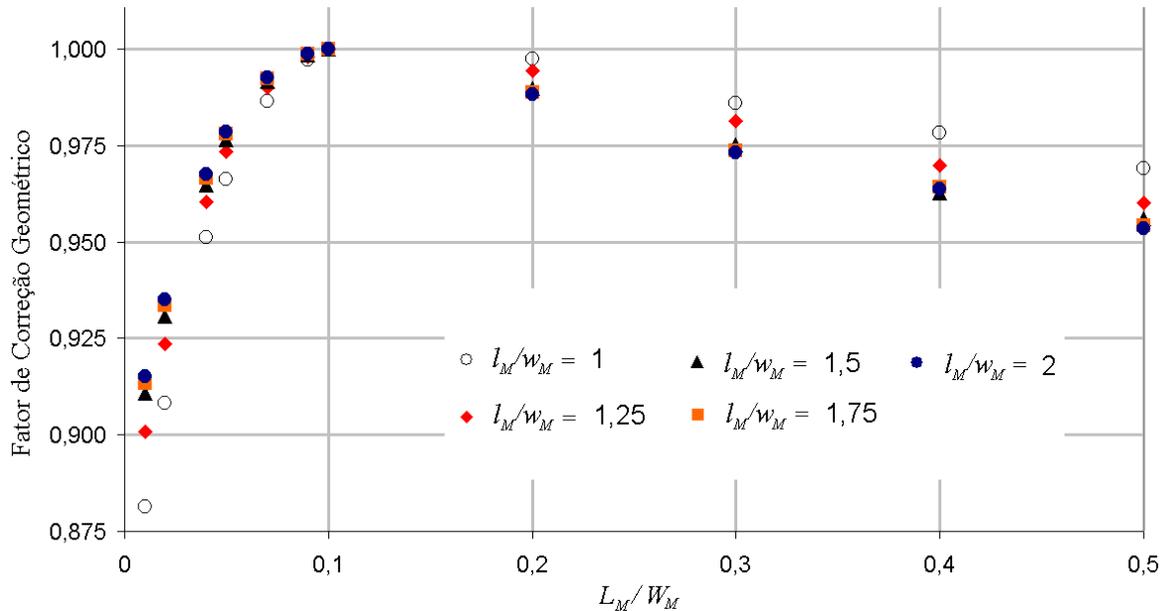


Figura 6.29 - Fator G numérico do MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada para $l_M/w_M \geq 1$.

Todas estas curvas atingem um máximo quando $L_M/W_M = 0,1$. Antes deste ponto, a influência dos contatos-corrente na tensão de saída do MTPS prevalece em relação aos contatos-sensor e causa uma minimização de G . Esta minimização é acentuada se terminais curtos de contatos-corrente são considerados. Contudo, à medida que aumentamos L_M/W_M , a influência destes contatos é minimizada e a influência dos contatos-sensor predomina, minimizando G . Contudo, esta minimização é suave mesmo para contatos-corrente pequenos.

A Figura 6.30 mostra a comparação entre o fator G numérico e analítico de um 4-MTPS. Para o fator G analítico, extrapolamos a fórmula do dispositivo Hall (FTPS sem terminais) para um MTPS, ver equação (5.27). Consideramos para esta análise um 4-MTPS de $l_M/w_M = 1$ e S/W variando de 0,01 a 0,03.

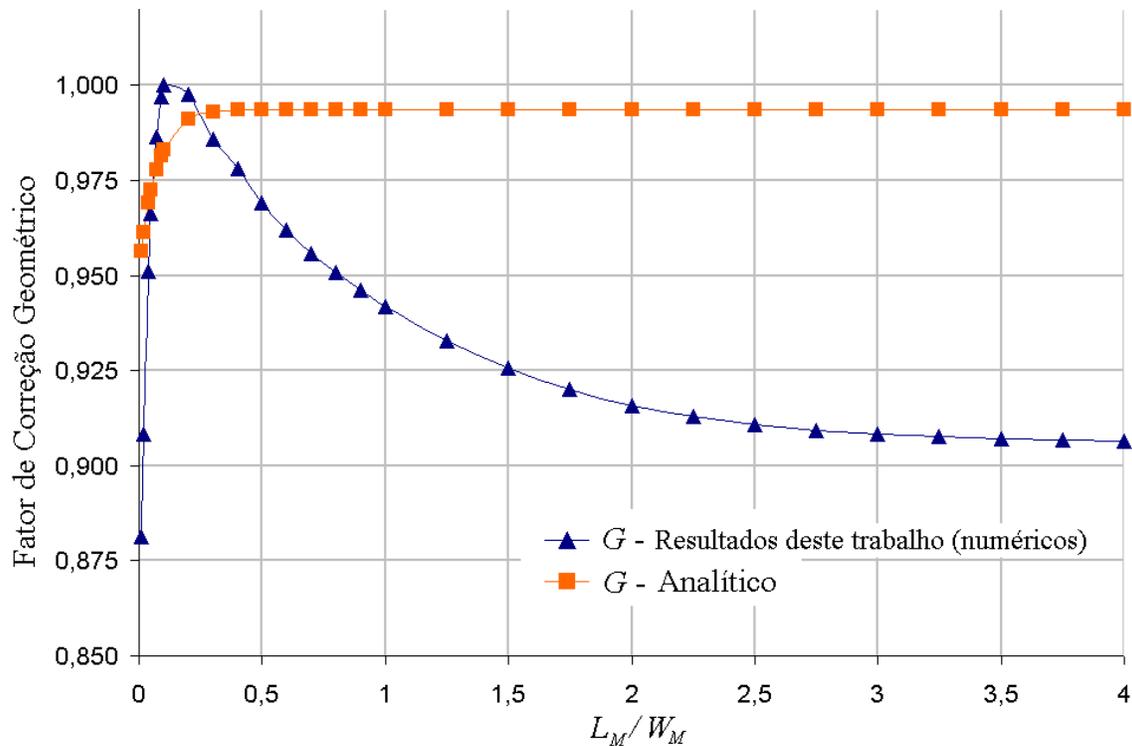


Figura 6.30 – Comparação entre o fator de G numérico e analítico do MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada.

A comparação entre os resultados deste trabalho, obtido pelo método numérico, e o analítico do fator G de um MTPS mostra uma diferença de até 8% entre os resultados. Esta diferença é minimizada na região onde G é maximizado. Fora desta região, a diferença entre o resultado numérico e o analítico é aumentada. De certa forma, este resultado é esperado desde que o resultado analítico é apenas uma extrapolação de um FTPS sem terminais. A topologia de multi-terminais mostra-se mais complexa e, possivelmente, nem todos os parâmetros podem estar sendo levados em consideração. Contudo, há uma semelhança nos perfis das curvas destes resultados: ambos os resultados apresentam uma tendência de alta para L_M/W_M menor que o ponto onde G é maximizado e então, tendem a permanecerem estáveis após este ponto.

Com a adição de novos terminais de contatos-corrente (união de um ou mais FTPS Modificado), deslocamos o ponto de otimização para uma relação L_M/W_M cada vez menor. Isto é importante se queremos aumentar a sensibilidade destes piezoelementos, mantendo uma resistência de entrada baixa entre os terminais de contatos-corrente.

A Figura 6.31 mostra o resultado da distribuição do potencial através de elementos finitos para um MTPS com 4 terminais de contatos-corrente de entrada com $L_M/W_M = 0,1$, $l_M/w_M = 1$ e $S/W = 0,01$.

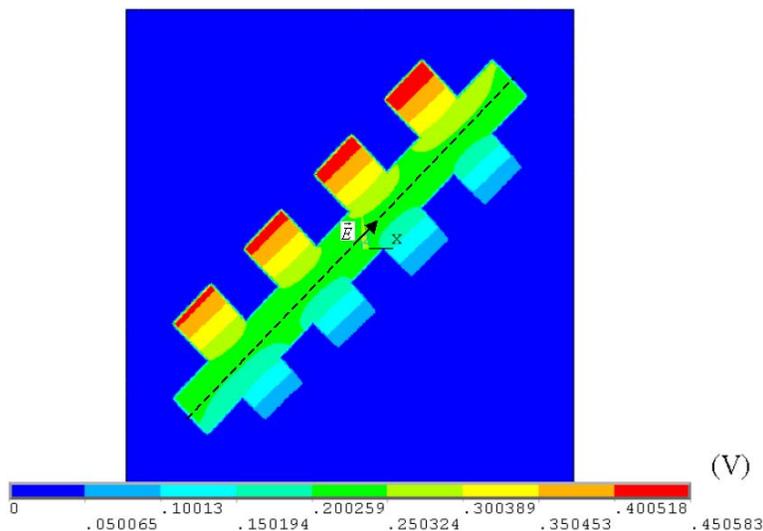


Figura 6.31 – Distribuição de potencial, através de elementos finitos, do 4-MTPS.

A compreensão do comportamento da tensão de saída do piezoelemento pode ser estudada analisando a distribuição do campo elétrico ao longo da distância entre os contatos-sensor. A Figura 6.32 mostra esta distribuição do campo elétrico no centro do piezoelemento (ver linha tracejada na Figura 6.31).

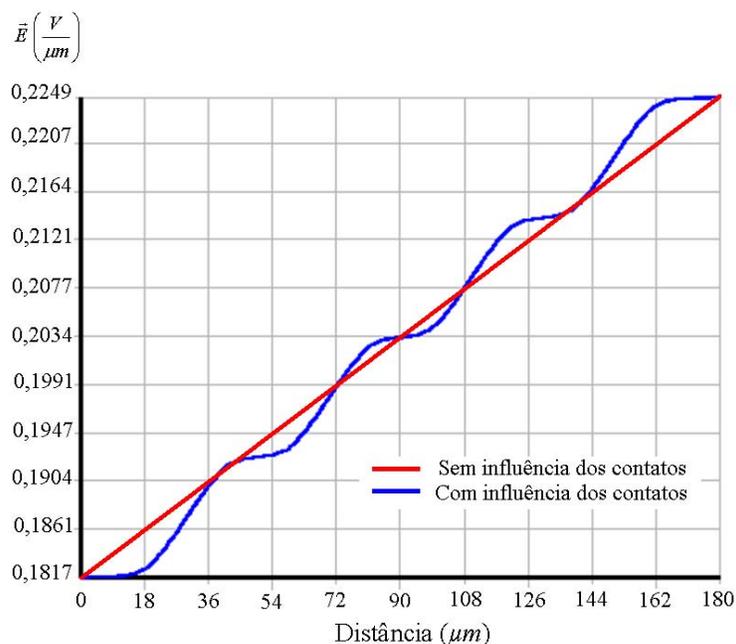


Figura 6.32 – Distribuição do campo elétrico ao longo da distância entre os contatos-sensor no centro do piezoelemento.

A curva linear representa um caso ideal onde os eletrodos do piezoelemento não influenciam a sua tensão de saída. Por outro lado, a curva distorcida representa o caso real onde há a influência dos contatos. Neste caso em particular, a distorção foi, principalmente, devido aos contatos-sensores. Os extremos da curva azul representam o efeito de alinhamento das equipotenciais com os contatos-sensor. O 4-MTPS apresentou, para relações de dimensão onde $G = 1$, uma tensão de saída de aproximadamente 43,1 mV. Ou seja, aproximadamente 4 vezes mais do que os FTPS e a Cruz Grega.

6.4.4 - Análise da Resistência de Entrada das Topologias em Estudo

Os resultados numéricos dos piezoelementos mostraram que cada topologia apresenta um fator de correção geométrico diferente que depende de suas dimensões. A relação entre as dimensões dos piezoelementos, dos contatos-sensor e dos contatos-corrente é de fundamental importância para maximização de sua tensão de saída dos piezoelementos por maximizar seus fatores G . Contudo, estas dimensões têm uma influência direta na resistência de entrada de cada uma destas topologias.

As topologias convencionais (sem e com terminais de contatos-sensor e Cruz Grega) alcançam a maximização de seus fatores G 's para piezoelementos relativamente longos ($L/W \geq 3$ para FTPS com e sem terminais e $L/W \geq 4$ para a Cruz Grega). No caso da topologia sem terminais de contatos-sensor, estamos considerando um caso ideal onde o contato-sensor é pontual. Caso contrário, G não alcançaria 1 (ver Gráfico 6.4). Para o FTPS Modificado e o 4-MTPS, os fatores G 's alcançam um máximo para piezoelementos pequenos ($L_F/W_F = 0,7$ para o FTPS Modificado e $L_M/W_M = 0,1$ para o 4-MTPS). Contudo, estes piezoelementos ainda dependem da relação dos terminais de contatos-corrente. Assim, cada piezoelemento, do tipo 4 terminais, é capaz de ter a mesma magnitude de suas tensão de saída por maximizar G . Desta forma, cada piezoelemento apresentará uma resistência de entrada diferente dependendo do seu tamanho e da dimensão dos seus terminais de contatos-corrente (para o caso do FTPS Modificado). A Tabela 6.1 apresenta os parâmetros geométricos destas topologias e do 4-MTPS para o caso de $G \geq 0,99$ e suas tensões de saída.

Tabela 6.1 – Parâmetros geométricos (P_G) das topologias em estudo para G maximizado.

P_G Topologia	L/W	S/W	l/w^1	l/S^2	G	V_{out} (mV)
FTPS sem terminais de contatos-sensor	3,75	0,01	-	-	$\approx 0,99$	$\approx 10,7$
FTPS com terminais de contatos-sensor	3,25	0,15	-	1	$\approx 0,99$	$\approx 10,7$
Cruz Grega	4	1	-	1,5	$\approx 0,99$	$\approx 10,7$
FTPS Modificado	0,7	0,01	1	-	≈ 1	$\approx 10,7$
4-MTPS	0,1	0,01	1	-	≈ 1	$\approx 43,0$

¹Relação das dimensões de terminais de contatos-corrente

²Relação das dimensões de terminais de contatos-sensor

Uma análise da resistência de entrada de cada um destes piezoelementos mostra-se conveniente. Esta análise é feita utilizando o parâmetro D apresentados no capítulo 5. Usando os parâmetros geométricos apresentados na Tabela 6.1, o parâmetro D de cada topologia é apresentado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetro D das topologias em estudo para G maximizado.

D Topologia	D_T	D_{REC}
FTPS sem terminais de contatos-sensor	-	3,75
FTPS com terminais de contatos-sensor	-	3,25
Cruz Grega	-	4
FTPS Modificado	2	2,1
4-MTPS	2	0,9

Pelas equações (5.35) e (5.38), a resistência de entrada destes piezoelementos é dada como apresentada na Tabela 6.3. Consideramos r_s a resistência de folha da REC dos piezoelementos.

Tabela 6.3 – Resistência de entrada das topologias em estudo para G maximizado.

	Resistência de Entrada
FTPS sem terminais de contatos-sensor	$3,75 r_s$
FTPS com terminais de contatos-sensor	$3,25 r_s$
Cruz Grega	$4 r_s$
FTPS Modificado	$4,1 r_s$
4-MTPS ¹	$2,9 r_s$

¹Resistência de entrada de um terminal de contatos-corrente

Embora sejamos capazes de aumentar a sensibilidade dos sensores proporcionalmente ao número de terminais de contatos-corrente de entrada (Tabela 6.1), para a topologia de multi-terminais, sua resistência de entrada por terminal de corrente de entrada é também aumentada. Contudo, os parâmetros geométricos podem ser modificados para uma minimização da resistência de entrada, mas com um comprometimento de se diminuir G .

CAPÍTULO 7

Resultados Experimentais

Neste capítulo apresentamos os resultados experimentais dos sensores de pressão. Os sensores foram fabricados na AMS (Austrian Microsystems) e no Centro de Componentes Semicondutores – CCS/Unicamp. A caracterização destes sensores foi feita usando um aparato de testes, disponível no Laboratório de Sensores Microeletrônicos da Unicamp - LSM/Unicamp - (ver apêndice D para maiores detalhes), que fornece uma pressão diferencial bem controlada. As características de sensibilidade, *offset*, não-linearidade e consumo de potência foram obtidas.

7.1 – Fabricação dos Sensores de Pressão

Apresentamos nesta seção o circuito de condicionamento e o *layout* dos sensores fabricados. Dependendo da tecnologia adotada, a integração do circuito de condicionamento, juntamente com o sensor de pressão, é inviável. No sensor fabricado no CCS/Unicamp com tecnologia 5 μm , integramos o piezoelemento e realizamos o circuito de condicionamento externamente (*off-chip*). Já na AMS, com tecnologia de 0,35 μm , o circuito de polarização foi integrado junto com os piezoelementos. O diagrama de blocos dos circuitos periféricos dos sensores de pressão, fabricados na AMS e no CCS, é mostrado na Figura 7.1.

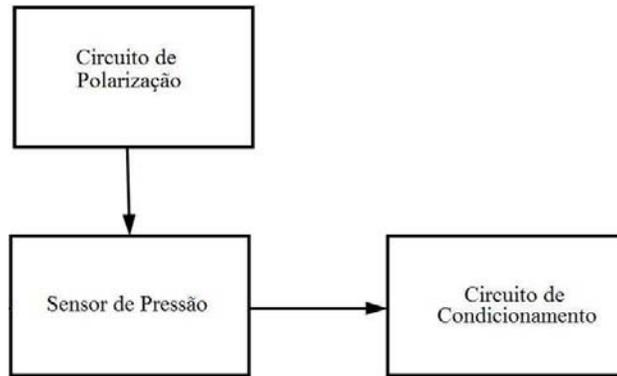


Figura 7.1 – Diagrama de blocos dos circuitos periféricos aos sensores de pressão.

O bloco Circuito de Polarização representa os espelhos de corrente convencionais utilizados para polarização dos sensores de pressão e as cargas ativas para drenagem das correntes de polarização. O bloco Circuito de Condicionamento representa o circuito utilizado nos contatos de saída (contatos-sensor) dos piezoelementos a fim de obter suas tensões de saída. Este circuito é também projetado para fornecer um caminho de alta impedância para as correntes de polarização. No projeto da AMS, nenhum circuito foi projetado para a aquisição da tensão de saída dos sensores, sendo que uma das extremidades do contato-sensor é conectada diretamente ao *pad* do CI (circuito integrado), e o caminho de alta impedância é conseguido utilizando um multímetro externamente. Já na outra extremidade, um circuito do tipo par diferencial foi projetado para fornecer aquela alta impedância para o contato-sensor do piezoelemento. Nos sensores fabricados no CCS/Unicamp, amplificadores discretos do tipo instrumentação foram utilizados para ambas as finalidades. O bloco Sensor de Pressão representa todas as diferentes topologias fabricadas de piezoelementos. Para ambos os processos, as topologias de Cruz Grega, de FTSP Modificado e de 4-MTPS são consideradas.

Em ambos os processos, a direção da corrente de polarização dos piezoelementos foi alinhada com a direção $\langle 100 \rangle$. A Figura 7.2 mostra as direções $\langle 100 \rangle$ e $\langle 110 \rangle$ para uma lâmina de silício (100) tipo-n e tipo-p. Lâminas do tipo-n foram utilizadas no processo de fabricação do CCS/Unicamp e lâminas do tipo-p no processo da AMS.

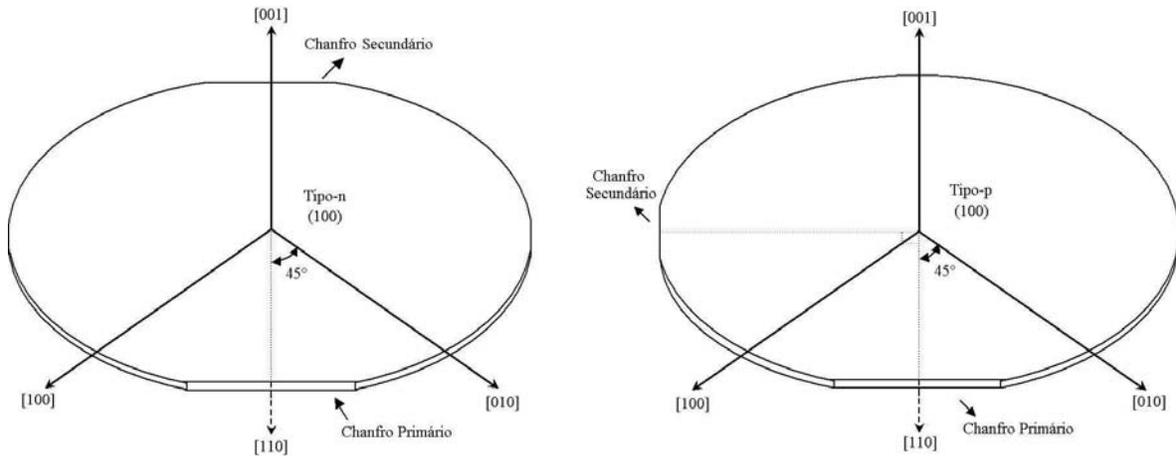


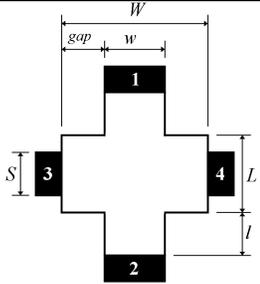
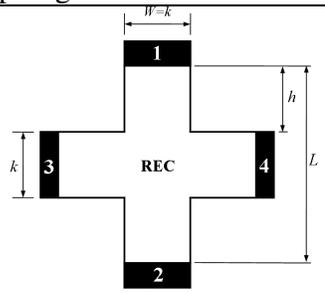
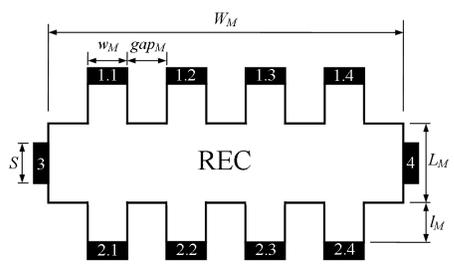
Figura 7.2 – Lâminas de silício (100) tipo-n e tipo-p e seus eixos cristalográficos.

Nas seções seguintes, apresentamos detalhadamente o projeto dos sensores de pressão. As dimensões dos piezoelementos e os circuitos de condicionamento (de polarização e de aquisição) são apresentados e comentados.

7.1.1 – Tecnologia AMS

Os sensores fabricados na AMS utilizam a tecnologia CMOS de 0,35 μm 5V com 4 níveis de metais. Para o projeto e simulação do circuito de condicionamento dos piezoelementos e para a confecção dos *layouts* utilizamos a ferramenta EAD (*Electronic Design Automation*) para circuitos integrados da Mentor Graphics®. As topologias e as dimensões dos piezoelementos fabricados estão apresentadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – As topologias e as dimensões dos piezoelementos fabricados na AMS.

Topologias	$L/W ; L_M/W_M$	$l/S ; h/k ; l_M/w_M ; gap$	$S/W ; S/W_M$	FatorG*
 <p>Topologia 1: FTSP Modificado</p>	$L = 6,75 \mu\text{m}$ $W = 4,5 \mu\text{m}$ $L/W = 1,5$	$l = 0,75 \mu\text{m}$ $w = 1,5 \mu\text{m}$ $l/w = 0,5$ $gap = 1,5 \mu\text{m}$	$S = 1,5 \mu\text{m}$ $S/W = 0,33$	$\approx 0,95$
 <p>Topologia 2: Cruz Grega</p>	$L = 2h + k$ $L = 6,9 \mu\text{m}$ $W = k = 2,3 \mu\text{m}$ $L/W = 3$	$k = h = 2,3 \mu\text{m}$ $h/k = 1$	-	$\approx 0,95$
 <p>Topologia 3a e 3b: MTSP Menor e Maior, respectivamente.</p>	$L_M = 6,75 \mu\text{m}$ $W_M = 13,5 \mu\text{m}$ $L_M/W_M = 0,5$	$l_M = 0,75 \mu\text{m}$ $w_M = 1,5 \mu\text{m}$ $l_M/w_M = 0,5$ $gap = 1,5 \mu\text{m}$	$S = 1,5 \mu\text{m}$ $S/W_M = 0,11$	$\approx 0,99$
	$L_M = 13,5 \mu\text{m}$ $W_M = 13,5 \mu\text{m}$ $L_M/W_M = 1$	$l_M = 0,75 \mu\text{m}$ $w_M = 1,5 \mu\text{m}$ $l_M/w_M = 0,5$ $gap_M = 1,5 \mu\text{m}$	$S = 1,5 \mu\text{m}$ $S/W_M = 0,11$	$\approx 0,97$

* Valor obtido através dos resultados numéricos

7.1.1.1 – Circuito de Condicionamento

A Figura 7.3 apresenta os circuitos de condicionamentos para as topologias de 4 e multi-terminais.

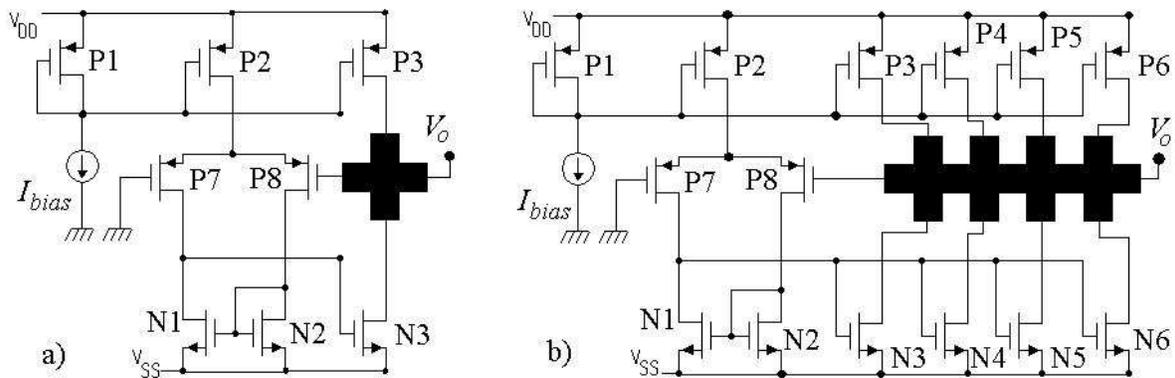


Figura 7.3 – Circuitos de condicionamento e polarização para os piezoelementos fabricados na AMS: a) para piezoelementos de 4 terminais e b) para piezoelementos de multi-terminais.

Na Figura 7.3b, os transistores P1 a P9 são transistores PMOS e os transistores N1 a N6 são transistores NMOS, I_{bias} é a corrente de polarização dos piezoelementos, V_{DD} e V_{SS} são as tensões de polarização do circuito e V_o é a tensão de saída do piezoelemento. As conexões de corpo dos transistores PMOS e NMOS não são mostradas, mas estão conectadas em V_{DD} e V_{SS} , respectivamente. Os transistores P1 e P6 formam o espelho de corrente PMOS. P2 é usado para polarização do par diferencial e P3 a P6 são usados para polarizar o piezoelemento com I_{bias} . P7 e P8 formam um par diferencial, usado para fornecer um caminho de alta impedância e também um curto-circuito virtual (forçar o mesmo potencial do *gate* de P7 em P8) para o contato-sensor do piezoelemento. Neste caso em particular, o *gate* de P7 está aterrado, e, portanto, o contato-sensor do piezoelemento e o *gate* de P8 também é forçado ao terra (terra virtual). Contudo, este terminal é conectado a um *pad*. Isto nos possibilita o cancelamento do *offset* do circuito por aplicar uma tensão oposta a tensão de *offset* presente no *gate* de P8. Os transistores N1 e N2 são cargas ativas do par diferencial. Os transistores N3 a N6 são cargas ativas que drenam as correntes de saída do piezoelemento.

A primeira etapa para projetar este circuito de condicionamento foi definir a intensidade da corrente I_{bias} desejada, o tipo de tecnologia a ser utilizada e o tipo da região ativa dos piezoelementos. Os parâmetros da tecnologia 0,35 μm e 5 V de 4 camadas de metais da AMS foi adequada. A intensidade de I_{bias} é definida usando a equação (5.26) para o piezoelemento de multi-terminais. Para uma maior sensibilidade dos sensores, a região

ativa dos piezoelementos foi escolhida ser do tipo-p cuja resistência de folha é um parâmetro do processo e é de $140 \Omega/\square$ [50]. Definimos que uma corrente de, no mínimo, $100 \mu\text{A}$ era adequada, fornecendo uma tensão de saída da ordem de 3 mV . A etapa seguinte foi dimensionar o espelho de corrente formado pelos transistores P1 e P2, para fornecer o nível de corrente desejado. Contudo, por conveniência, o espelho foi projetado para fornecer uma corrente de até 10 vezes a mínima desejada, mas, neste caso, afetando o nível de *offset* na entrada do par diferencial. Em seguida, levantamos as curvas dos transistores PMOS variando suas dimensões (L e W), a fim de acharmos uma relação de dimensão adequada para a faixa de I_{bias} desejada. Por simulação, a relação de $W/L = 10$ ($W = 10 \mu\text{m}$ e $L = 1 \mu\text{m}$) mostrou-se adequada, fornecendo um corrente de saturação de até 1 mA para uma tensão de polarização diferencial de $\pm 2,5 \text{ volts}$. Portanto, os transistores P1 a P6, com exceção de P2, tiveram estas dimensões. Uma intensidade de corrente que é metade de I_{bias} foi suficiente para polarizar o par diferencial. Então, P2 foi projetado com uma relação $W/L = 5$ ($W = 10 \mu\text{m}$ e $L = 2 \mu\text{m}$). Os transistores do par diferencial, P7 e P8, poderiam ser projetados com a mesma dimensão de P2, mas, por razões de minimização de ruídos comentadas posteriormente, esta relação foi escolhida ser $W/L = 20$.

A próxima etapa foi projetar os transistores NMOS. Primeiramente, levantamos as curvas dos transistores para dimensionarmos uma relação de W/L capaz de drenar as correntes do par diferencial. Por simulação, a relação de $W/L = 6$ ($W = 6 \mu\text{m}$ e $L = 1 \mu\text{m}$) mostrou-se adequada. Contudo, modificamos esta relação, para os transistores N1 e N2, analisando o nível de ruído no *gate* do transistor P8. Para minimização deste ruído, a largura W do P7 e o comprimento L do N1 devem ser aumentados. Esta alteração também diminui o nível de ruído no par diferencial [51]. Desta forma, aumentamos W de P7 para $20 \mu\text{m}$ e L de N1 para $4 \mu\text{m}$. Assim, projetamos P7 e P8 com uma relação de $W/L = 20$ ($W = 20 \mu\text{m}$ e $L = 1 \mu\text{m}$) e N1 e N2 com uma relação de $W/L = 1,5$ ($W = 6 \mu\text{m}$ e $L = 4 \mu\text{m}$). Como as dimensões de N3 a N6 não tem grande influência no ruído do par diferencial suas dimensões foram mantidas com $W/L = 6$ ($W = 6 \mu\text{m}$ e $L = 1 \mu\text{m}$). As larguras dos transistores, PMOS e NMOS, foram escolhidas de forma a suportar uma I_{DS} (corrente de saturação fonte-dreno) máxima destes transistores bem acima da intensidade de I_{bias} . A

Figura 7.4 mostra as correntes de polarização (I_{bias} , I_1 , I_2 , I_3 e I_4) e o ruído gerado no *gate* do transistor P8 (V_{gate}).

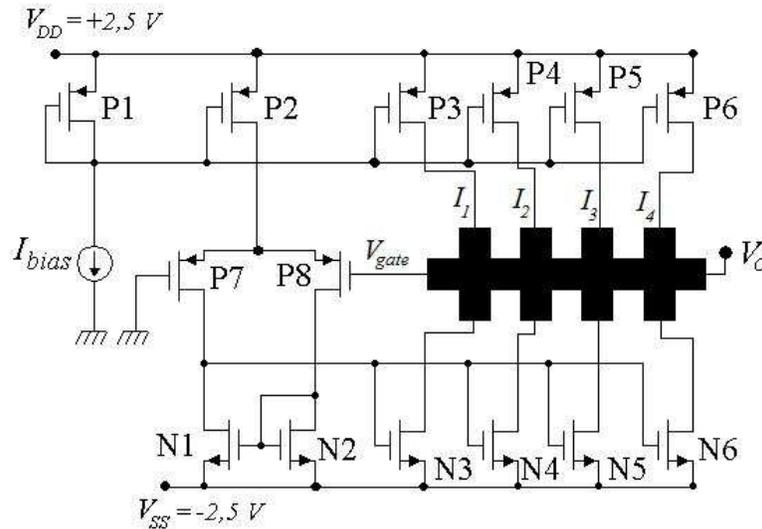


Figura 7.4 – Níveis de corrente e tensão nos principais pontos do circuito de condicionamento dos sensores fabricados na tecnologia AMS.

Na Figura 7.4, ambos os circuitos estão polarizados com uma tensão diferencial de $\pm 2,5$ V ($V_{DD} = +2,5$ V e $V_{SS} = -2,5$ V), V_{gate} é a tensão no *gate* do transistor P8 e I 's são as correntes de polarização espelhadas de I_{bias} . Um circuito equivalente elétrico em forma Pontes de Wheatstone (PW) foi usado para esta simulação (ver capítulo 5 para detalhes dos circuitos equivalentes elétricos dos piezoelementos). Consideramos PWs balanceadas com $R = 420 \Omega$. Para $I_{bias} = 100 \mu\text{A}$, $I_1 \approx I_2 \approx I_3 \approx I_4 \approx 102 \mu\text{A}$ e $V_{gate} \approx 45 \mu\text{V}$. Para $I_{bias} = 1 \text{ mA}$, $I_1 \approx I_2 \approx I_3 \approx I_4 \approx 890 \mu\text{A}$ e $V_{gate} \approx 18 \text{ mV}$. Notamos que V_{gate} é aumentado conforme aumentamos a intensidade de I_{bias} . Com o aumento de I_{bias} , o transistor P2 deixa de fornecer uma intensidade de corrente que seja suficiente para polarizar o par diferencial (transistores P7 e P8). Em conseqüência, o curto-circuito virtual entre os *gates* de P7 e P8 é comprometido, ocasionando um aumento da tensão no *gate* de P8. Contudo, para o ponto de polarização desejado ($I_{bias} = 100 \mu\text{A}$), este valor é bem minimizado. A intensidade de corrente espelhada pelos transistores P3 a P7 também é comprometida, mas mantendo variação em torno de 10% de I_{bias} . O consumo de potência simulado do circuito apresentado na Figura 7.4 polarizado com $100 \mu\text{A}$ é de 2,5 mW e polarizado com 1 mA é de 23,5 mW.

Como já mencionado, os piezoelementos podem ser eletricamente modelados através de PWs. A fim de estudar a resposta do circuito de condicionamento, simulamos

este circuito utilizando resistores do tipo-p da tecnologia AMS (PDIFFp) [50] em forma de PW representando um piezoelemento da topologia 3a na Tabela 7.1. Os valores das resistências foram escolhidos arbitrariamente e foram de 420Ω . Em seguida, estes resistores foram variados de ΔR de forma que em dois resistores de lados opostos da PW a variação foi positiva e nos outros dois a variação foi negativa. A Figura 7.5 apresenta o esquemático deste circuito.

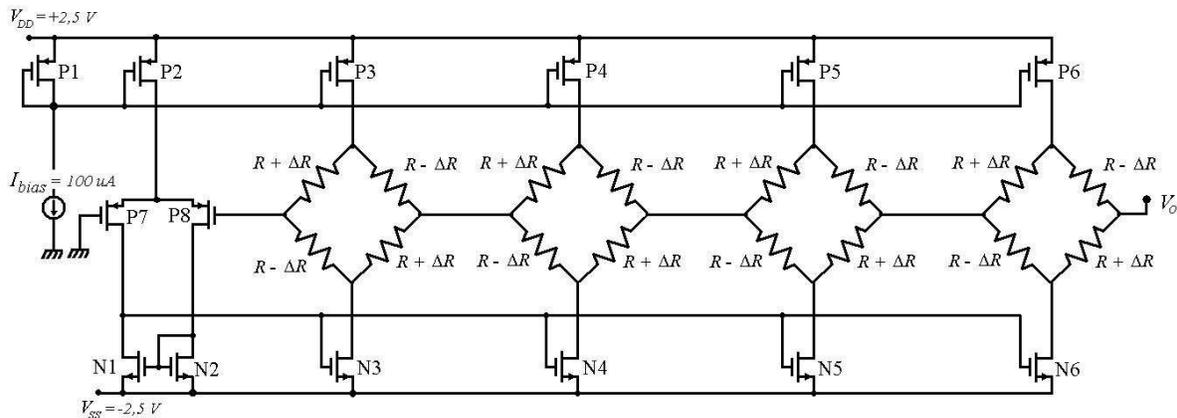


Figura 7.5 – Circuito para teste da linearidade do circuito de condicionamento dos piezoelementos fabricados na tecnologia AMS com Pontes de Wheatstone representando um 4-MTPS.

Na Figura 7.5, R é o valor da resistência equivalente de cada terminal de contato-corrente de entrada do 4-MTPS, ΔR representa a variação em porcentagem da resistência R e V_o é a tensão de saída da PW. Para o teste do circuito, variamos ΔR de 20% a 80% de R . A Tabela 7.2 apresenta os valores das resistências utilizadas na simulação.

Tabela 7.2 – Valores das resistências usados para simulação e teste do circuito de condicionamento dos sensores fabricados na tecnologia AMS.

$R = 420 \Omega$	
$\Delta R / R [\%]$	$\Delta R [\Omega]$
20%	84 Ω
40%	168 Ω
60%	252 Ω
80%	336 Ω

A Figura 7.6 apresenta a saída V_o em função da variação de ΔR . A saída esperada para V_o é linear e dada pela equação 5.23.

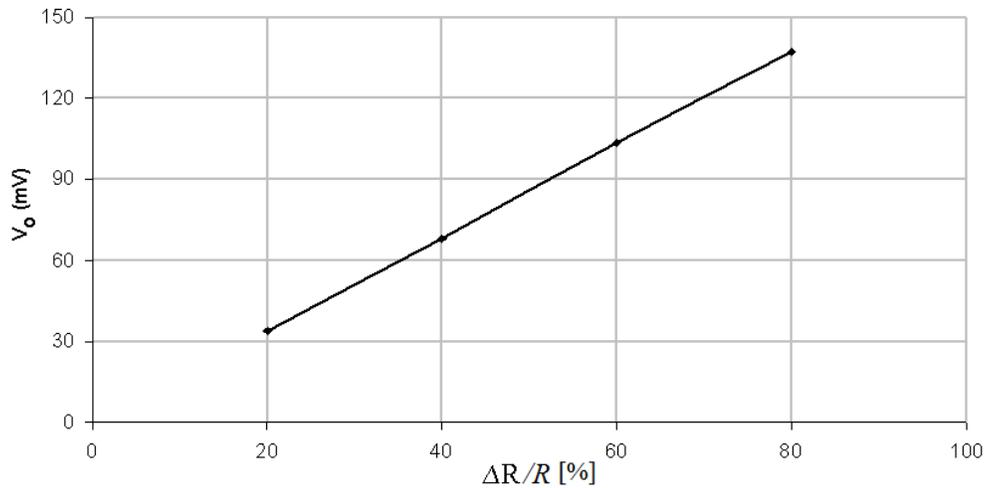


Figura 7.6 – Resultado da simulação do circuito de condicionamento dos piezoelementos fabricados na AMS com Pontes de Wheatstone representando os piezoelementos.

Com os níveis de correntes determinados pela simulação do circuito, o *layout* do piezoelemento foi projetado e desenvolvido.

7.1.1.2 – Projeto e Confeção do *Layout* dos Piezoelementos e de seus Circuitos de Condicionamento

Nosso projeto partiu de uma área total de 4 mm x 4 mm face às necessidades para realizações da membrana e do encapsulamento. Os piezoelementos são posicionados sobre regiões de máximo estresse mecânico obtidas através da microfabricação de membranas de 2 mm x 2 mm ou 1 mm x 1 mm. As regiões de máximo estresse foram determinadas através de simulações estruturais com Ansys®, já discutidas no capítulo 6. O *layout* dos piezoelementos foi alinhado com a direção <100> do eixo do cristal. Os circuitos de polarização foram localizados fora da área da membrana. A Figura 7.7 mostra a localização dos piezoelementos e do circuito de condicionamento.

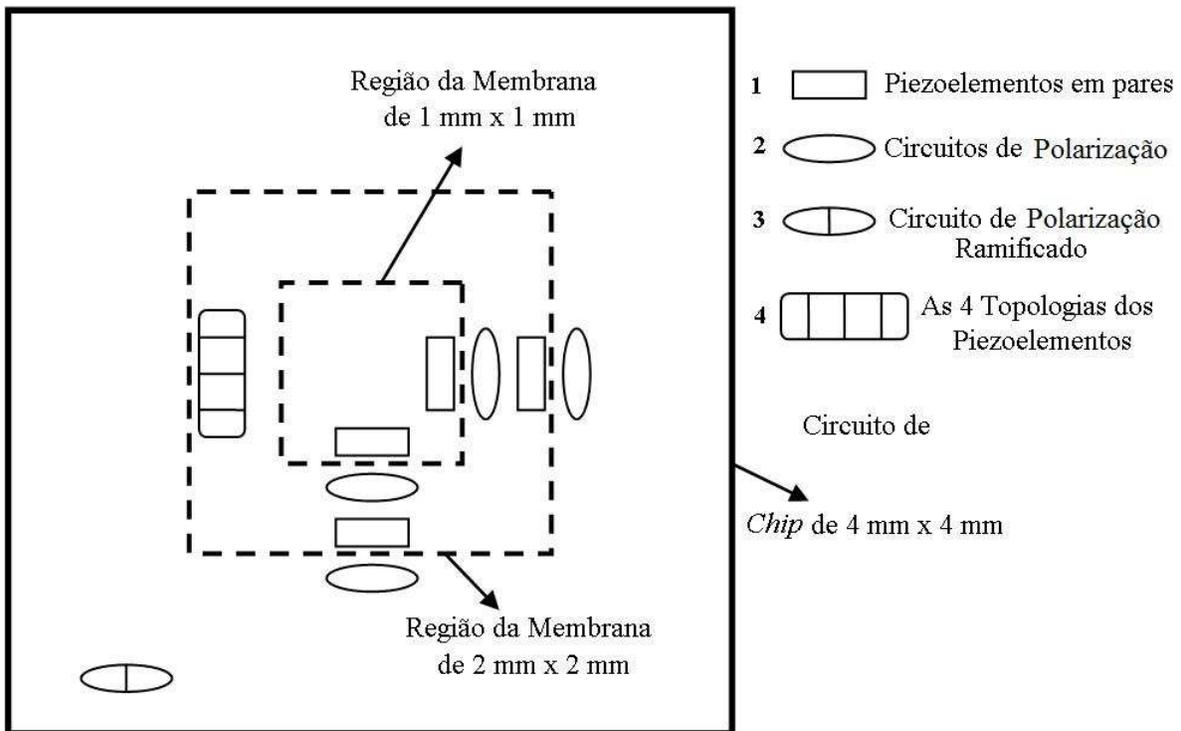


Figura 7.7 – Disposição dos piezoelementos e dos circuitos de condicionamento no processo da AMS.

Na Figura 7.7, as geometrias indicadas por 1 representam pares de piezoelementos dispostos lado a lado, sendo: um de 4 terminais (uma Cruz Grega ou um FTPS Modificado) e um de multi-terminais, conforme mostrado na Figura 7.9. As duas geometrias indicadas por 1, uma em cada lado da mesma membrana, representam os 4 tipos de piezoelementos apresentados na Tabela 7.1. As geometrias indicadas por 2 representam os circuitos de polarização para os pares de piezoelementos. A geometria indicada por 3 representa o circuito de polarização de um piezoelemento de multi-terminais ramificado nas seguintes partes: espelho de corrente PMOS e par diferencial com espelho de corrente e cargas ativas NMOS. A geometria indicada por 4 representa todos os piezoelementos em estudo, mas sem circuito de condicionamento. Todos os terminais da geometria 3 e 4 estão ligados diretamente aos *pads* do CI. A Figura 7.8 apresenta o *layout* do circuito de polarização ramificado.

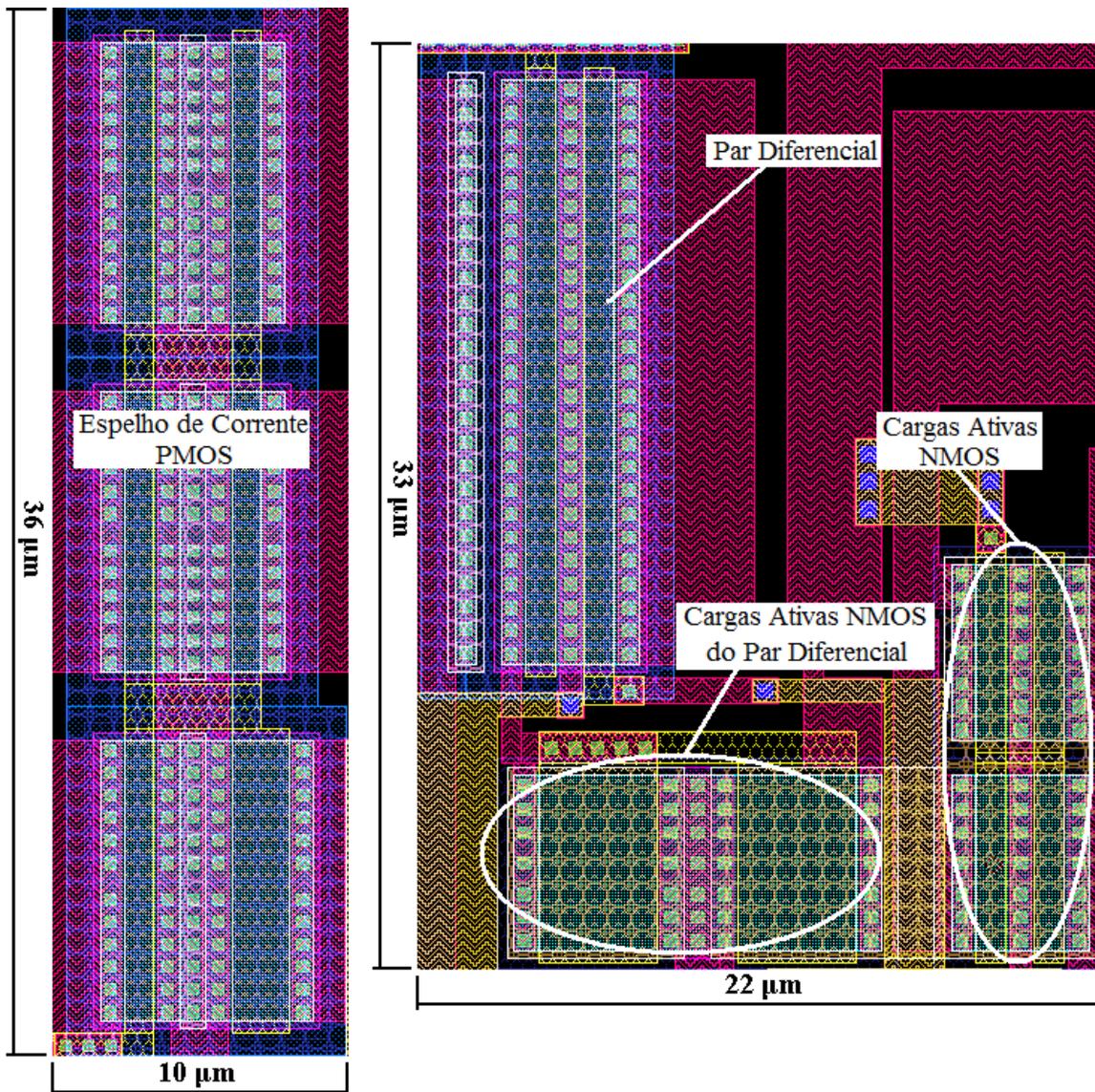


Figura 7.8 – *Layout* do circuito de polarização ramificado utilizando a tecnologia de 0,35 µm 5V da AMS.

O *layout* dos piezoelementos consiste de quatro camadas: um substrato tipo-p, um poço tipo-n, uma REC tipo-p+ e um *gate*, conforme mostrado na Figura 7.10. A fim de se fazer uma região ativa do tipo-p+, um poço tipo-n foi definido no substrato tipo-p e, em seguida, uma região ativa tipo-p+ foi definida sobre este poço. O anel de guarda implantado no poço tipo-n, ao redor dos piezoelementos, foi utilizado para atenuar a ação de correntes parasitas no piezoelemento. Na região ativa, contatos de metal foram posicionados sobre os terminais dos piezoelementos e do anel de guarda. Por fim, para o modelamento da sensibilidade do sensor, utilizamos um *gate*, feito de polisilício, sobre a região ativa do

piezoelemento. A função deste *gate* é aumentar ou diminuir o número de portadores majoritários na região ativa do piezoelemento por aplicar um potencial no *gate*, fazendo com que a resistência de folha seja variada. A Figura 7.9 mostra o *layout* dos piezoelementos apresentados na Tabela 7.1

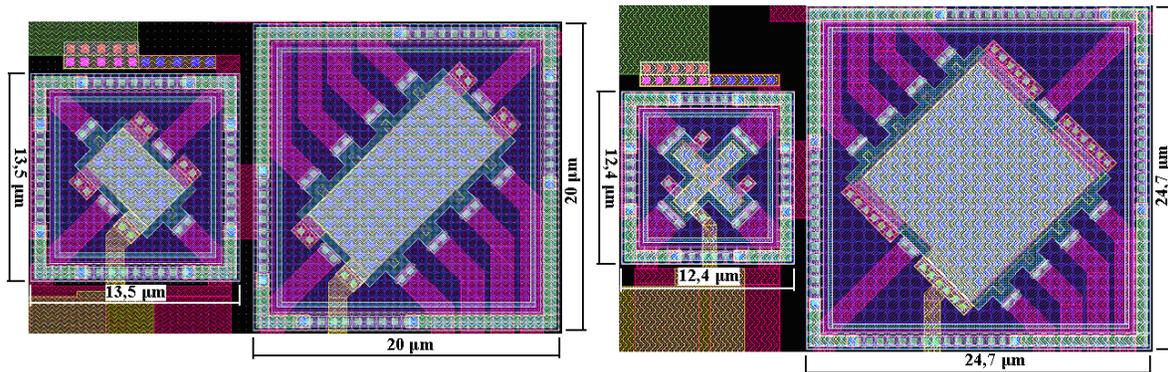


Figura 7.9 – *Layout* dos piezoelementos no processo de fabricação da AMS.

Na Figura 7.9, os piezoelementos estão apresentados em pares. Estes pares são os mesmos representados pelas geometrias 1 na Figura 7.7. A seção transversal destes piezoelementos é mostrada na Figura 7.10.

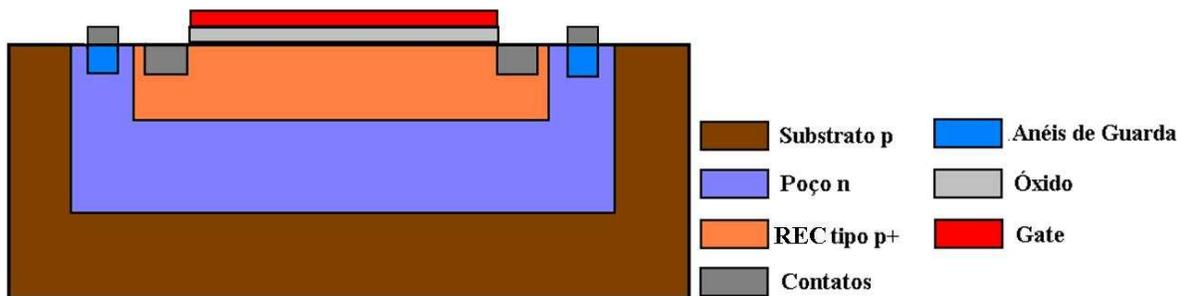


Figura 7.10 – Seção transversal dos piezoelementos fabricados na AMS.

A Figura 7.11 mostra o *layout* do *chip* fabricado e os detalhes de cada parte do circuito, tais como: o circuito de polarização e os piezoelementos.

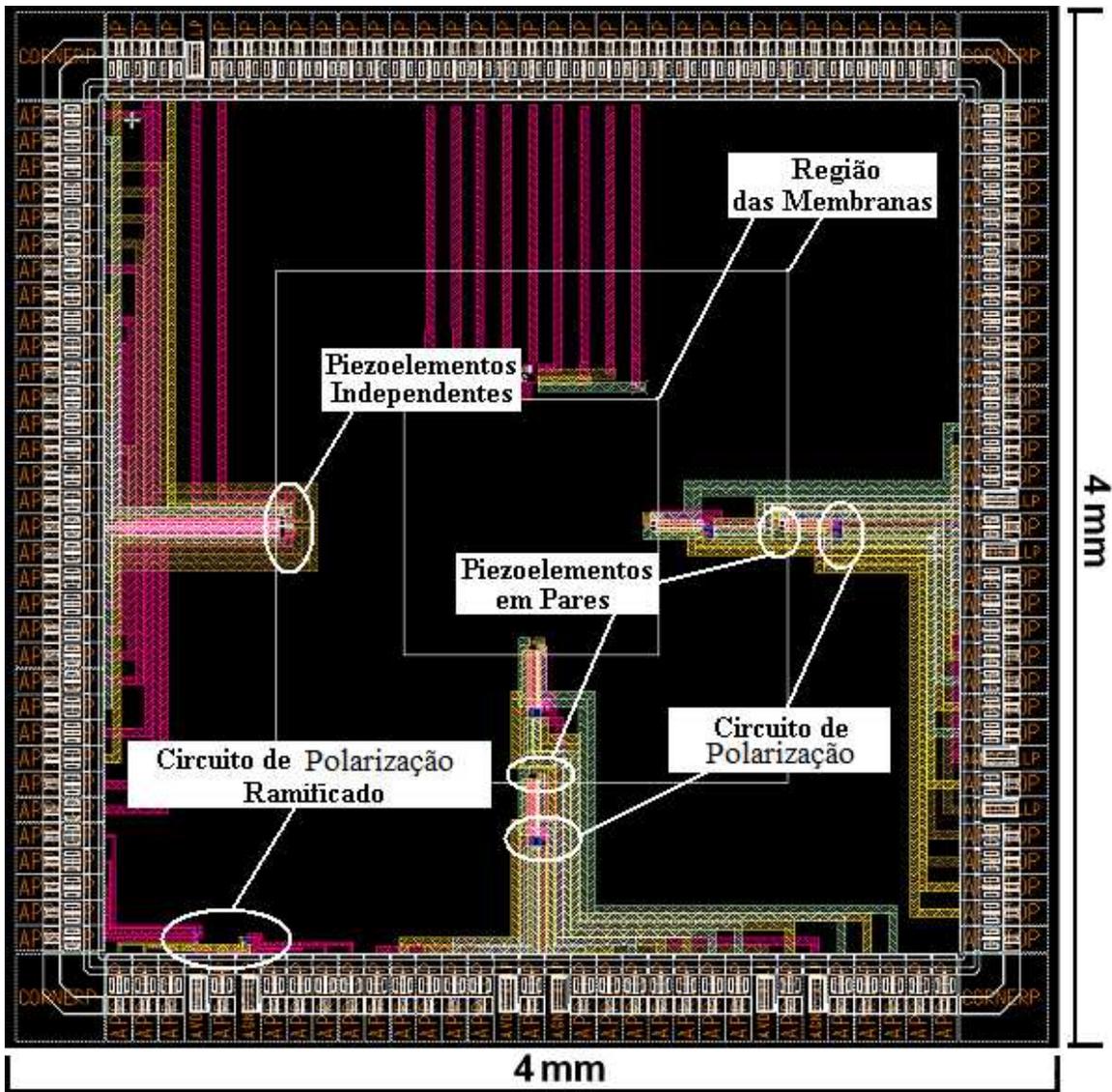
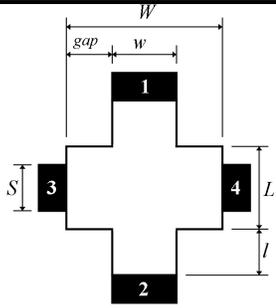
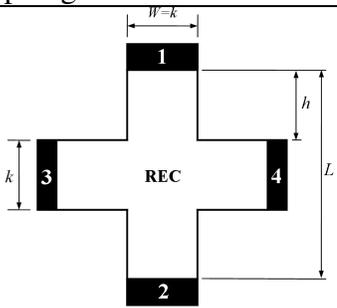
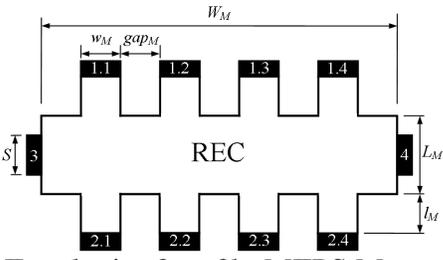


Figura 7.11 – Layout do chip fabricado na tecnologia AMS.

7.1.2 – Tecnologia CCS/Unicamp

No layout do sensor de pressão fabricado no CCS, usamos 6 níveis de máscara. Este processo foi realizado usando uma fotorepetidora com campo de projeção de 4 mm x 4 mm e resolução de 5 μm . O Apêndice D apresenta os 6 níveis de máscaras em ordem de fabricação e suas respectivas funções. Todas as etapas do processo de fabricação do sensor também são apresentadas e discutidas neste apêndice. A Tabela 7.3 mostra um resumo das topologias dos piezoelementos com suas dimensões.

Tabela 7.3 – As topologias e as dimensões dos piezoelementos fabricados no CCS/Unicamp.

Topologias	$L/W ; L_M/W_M$	$l/S ; h/k ; l_M/w_M ; gap$	$S/W ; S/W_M$	Fator G^*
 <p>Topologia 1: FTPS Modificado</p>	$L = 30 \mu\text{m}$ $W = 60 \mu\text{m}$ $L/W = 0,5$	$l = 30 \mu\text{m}$ $w = 20 \mu\text{m}$ $l/w = 1,5$ $gap = 20 \mu\text{m}$	$S = 20 \mu\text{m}$ $S/W \approx 0,33$	$\approx 0,98$
 <p>Topologia 2: Cruz Grega</p>	$L = 2h + k$ $L = 80 \mu\text{m}$ $W = 20 \mu\text{m}$ $L/W = 4$	$h = 30 \mu\text{m}$ $k = 20 \mu\text{m}$ $h/k = 1,5$	-	$\approx 0,99$
 <p>Topologias 3a e 3b: MTPS Menor e Maior, respectivamente.</p>	$L_M = 20 \mu\text{m}$ $W_M = 180 \mu\text{m}$ $L_M/W_M = 0,11$ $L_M = 90 \mu\text{m}$ $W_M = 180 \mu\text{m}$ $L_M/W_M = 0,5$	$l_M = 20 \mu\text{m}$ $w_M = 20 \mu\text{m}$ $l_M/w_M = 1$ $gap_M = 20 \mu\text{m}$ $l_M = 20 \mu\text{m}$ $w_M = 20 \mu\text{m}$ $l_M/w_M = 1$ $gap_M = 20 \mu\text{m}$	$S = 20 \mu\text{m}$ $S/W \approx 0,11$ $S = 20 \mu\text{m}$ $S/W \approx 0,11$	≈ 1 $\approx 0,97$

* Valor obtido através dos resultados numéricos

7.1.2.1 - Circuito de condicionamento

A Figura 7.12 mostra os circuitos de condicionamentos para piezoelementos de 4 e multi terminais com componentes eletrônicos discretos.

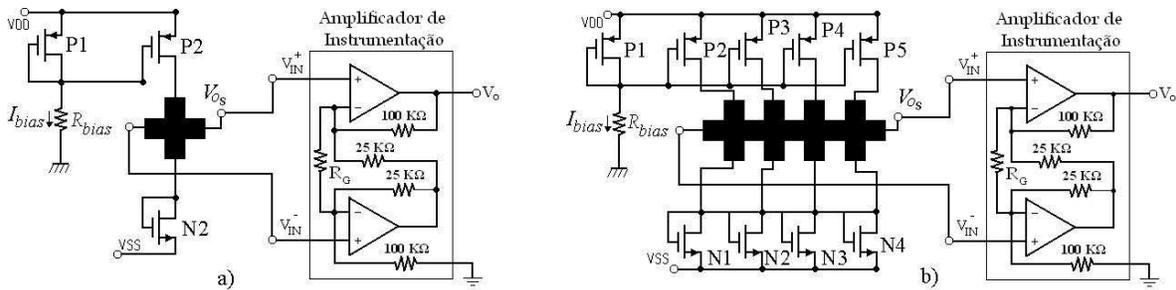


Figura 7.12 – Circuito de condicionamento discreto para o sensor de pressão fabricado no CCS/Unicamp: a) Para piezoelementos do tipo 4-terminais e b) Para piezoelementos do tipo multi-terminais.

Nos circuitos mostrados na Figura 7.12, os espelhos de corrente e as cargas ativas foram realizados utilizando o CI CD4007 que dispõe de transistores MOS complementares. Para o condicionamento do sinal de saída dos sensores utilizamos um Amplificador de Instrumentação (AI) por apresentar as seguintes características: ajuste do ganho de tensão através de um resistor externo (R_G), alta impedância de entrada (da ordem de $10^{10} \Omega$) mesmo se o ganho é variado e alta rejeição de modo comum (da ordem de 90 dB). O AI que utilizamos foi o CI INA122 sendo que sua tensão de saída é dada por:

$$V_O = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) A, \quad \text{sendo} \quad A = 5 + \frac{200K}{R_G}, \quad (7.1)$$

sendo A o ganho do AI. Em nossos testes, o ganho mínimo ($A = 5$) fornecido pelo AI foi suficiente e, portanto, a R_G não foi utilizada. V_{DD} e V_{SS} foram de 3 V e -3 V, respectivamente. Para determinação de R_{bias} e, conseqüentemente, de I_{bias} , analisamos a tensão de saída de um piezoelemento. Para um FTSP ideal (com $G = 1$) com região ativa tipo-p e polarizado com uma fonte de corrente constante, a tensão de saída é dada pela seguinte equação (conforme equação 5.22 no capítulo 5):

$$V_{out_{FTSP-p}} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_1 - \sigma_2) r_s I_s, \quad (7.2)$$

sendo que $\pi_{44} = 138,1 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$. r_s foi obtido através do método de Van Der Pauw e r_s é de aproximadamente 1,5 K Ω [seção 7.4.2.1]. Assumindo que o piezoelemento está sob ação de um estresse mecânico uniaxial e uniforme de 100 MPa (intensidade de estresse para uma membrana de 30 μm , ver Figura 6.4 no capítulo 6), I_{bias} é dado por:

$$I_{bias} = \frac{V_{out_{FTPS-p}}}{103,575} \left[\frac{V}{\Omega} \right]. \quad (7.3)$$

Se desejarmos uma tensão de saída da ordem de 10 mV, $I_{bias} \approx 100 \mu\text{A}$ é suficiente. Para este valor de corrente, um $R_{bias} \approx 9 \text{ K}\Omega$ foi necessário.

7.1.2.2 - Projeto e Confeção do *Layout* dos Piezoelementos e de seus Circuitos de Condicionamento

Nos sensores fabricados no CCS/Unicamp não dispomos de eletrônica de condicionamento *on-chip*. Entretanto, temos maior flexibilidade no processo de fabricação. Os *chips* possuem 4 mm x 4 mm e os piezoelementos estão posicionados em regiões de máximo estresse mecânico. As regiões de concentração de estresse são definidas pela microfabricação de membranas de 2 mm x 2 mm. A Figura 7.13 mostra a localização dos piezoelementos no *chip*, a região da membrana quadrada e a seção transversal dos piezoelementos.

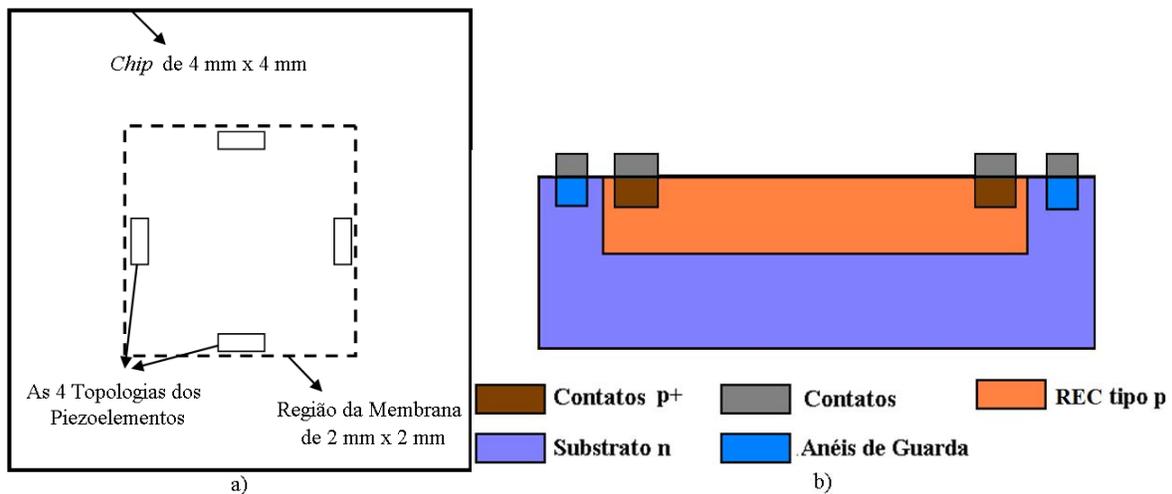


Figura 7.13 – Esquemático do *chip* fabricado no CCS/Unicamp: a) Localização dos piezoelementos e da região da membrana quadrada no chip do processo de fabricação do CCS/Unicamp e b) Seção transversal dos piezoelementos.

Na Figura 7.13a, os retângulos representam cada topologia apresentada na Tabela 7.2. Todos os terminais dos piezoelementos estão ligados diretamente aos *pads* que se encontram na borda do *chip*. Na Figura 7.13b apresentamos a seção transversal do

piezoelemento. Utilizamos lâminas de tipo-n com orientação cristalográfica (100). A região ativa foi implantada sobre esta lâmina utilizando boro em uma concentração de $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Os terminais dos piezoelementos foram feitos implantando-se boro em uma concentração de $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ na região ativa para formação de uma região p+. Posteriormente, anéis de guarda foram feitos por implantar fósforo em uma concentração de $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ em uma área ao redor dos piezoelementos para formação das regiões n+. Por fim, foi depositado alumínio sobre a lâmina para formação dos contatos, das trilhas e dos *pads*. Veja o Apêndice C para uma referência completa do processo de microfabricação deste sensor.

A Figura 7.14 apresenta o *layout* do último nível de máscara do *front-side* (nível 5) do *chip* fabricado. Neste *layout* estão mostrados os quatro piezoelementos apresentados na Tabela 7.3, as trilhas de alumínio, os *pads* e as marcas de alinhamento em cada canto do *chip*.

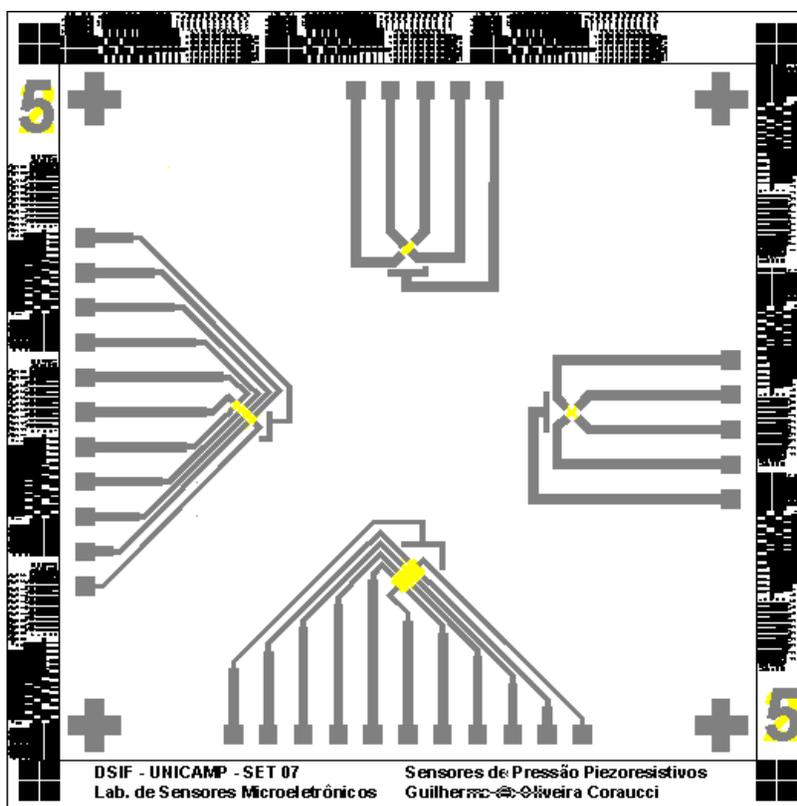


Figura 7.14 – *Layout* do último nível de máscara do *front-side* do *chip* fabricado no CCS/Unicamp.

A Figura 7.15 apresenta uma lâmina do processo de fabricação com um conjunto de 25 *chips* em forma de uma matriz 5 x 5.



Figura 7.15 – Lâmina com 25 *chips* fabricados no CCS/Unicamp.

A estrutura da membrana quadrada utilizada neste processo foi feita utilizando um Reator de KOH automatizado disponível no CCS/Unicamp (ver seção 7.2.1.2). A técnica de *etching-stop* por tempo foi utilizada para se obter uma membrana de 20 μm de espessura.

7.2 – Aparatos para Fabricação de MEMS e para Teste Mecânico dos Sensores de Pressão

7.2.1 – Aparatos para Fabricação de MEMS

A fabricação da membrana foi feita através de 2 métodos: desbaste mecânico e corrosão química. O método de desbaste mecânico é feito utilizando um aparato disponível no LSM/Unicamp (Laboratório de Sensores Microeletrônicos). O método de corrosão química é feito por um Reator de KOH disponível no CCS/Unicamp que usa uma solução de hidróxido de potássio (KOH) como agente corrosivo. Estes aparatos são detalhados a seguir.

7.2.1.1 – Aparato de Desbaste Mecânico

O aparato de desbaste mecânico foi projetado com a finalidade de diminuir a espessura da lâmina de silício sem a necessidade de uma solução química e para casos em que os *chips* são muito pequenos e sua fixação e proteção no aparato por corrosão química seriam impraticáveis.

O aparato é composto por uma pedra polida de granito montada sobre uma base (superior) de alumínio que é sustentada por suportes presos a uma segunda base (inferior). Tanto a pedra quanto a base superior possuem um orifício central para acoplamento de um cilindro de alumínio. Este cilindro é fixado neste orifício através de um rolamento montado em um mancal. Para evitar movimentos de translação indesejados do cilindro de alumínio, um segundo rolamento é usado na sua extremidade inferior e acoplado em um suporte preso a base inferior. Na extremidade superior do cilindro, próxima a sua borda, há um segundo orifício de diâmetro pequeno que é utilizado para acoplar um cilindro de Aço Inox usado para fixar a amostra de silício. A Figura 7.16 mostra este aparato.

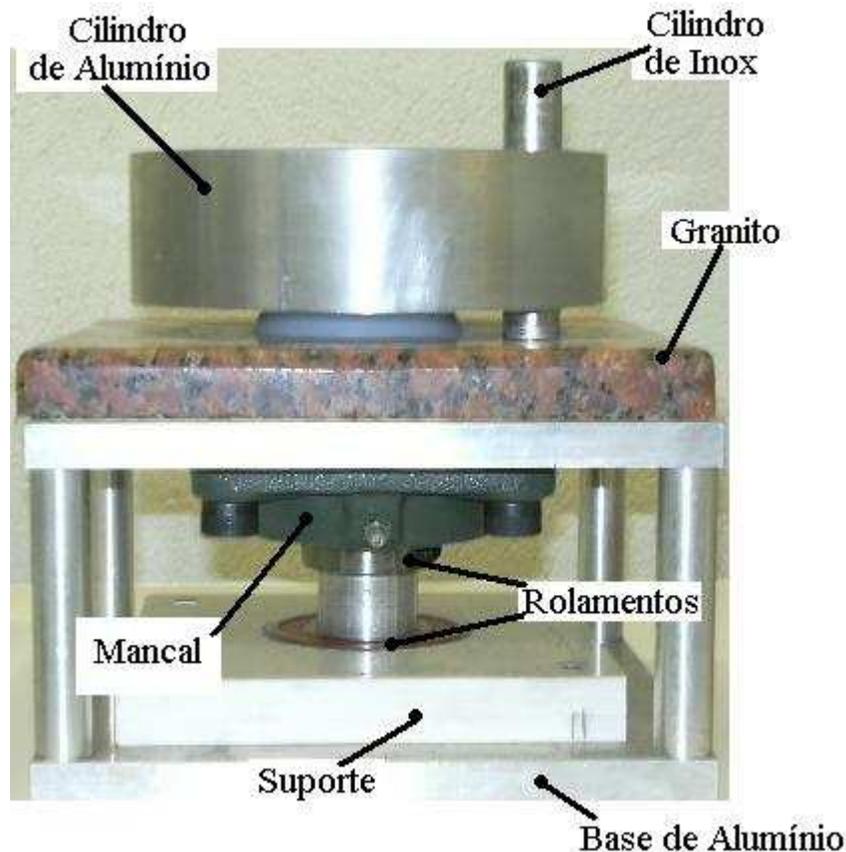


Figura 7.16 – Aparato de desbaste mecânico.

O desbaste é feito fixando a amostra de silício no cilindro de Inox e girando o cilindro de alumínio. A fixação do *chip* no cilindro de Inox é feita usando cera de abelha derretida. Para melhorar a ação de desbaste e a rugosidade da amostra, usamos uma solução contendo Al_2O_3 (alumina) sobre a pedra.

7.2.1.2 – Aparato de Corrosão Química

Embora a corrosão anisotrópica de silício com KOH seja um método simples, econômico e bem conhecido, este processo de corrosão depende criticamente de parâmetros como: temperatura, forma de agitação, circulação, composição, pureza e concentração da solução. A variação destes parâmetros, isoladamente ou em conjunto, contribui para que a taxa de corrosão e a rugosidade das amostras sejam afetadas. As variações da taxa de corrosão e rugosidade afetam negativamente a repetibilidade da fabricação de sensores microeletromecânicos. O aparato de corrosão química que desenvolvemos é totalmente automatizado (exceto pelo controle de fluxo da solução que é feito manualmente através de uma válvula mecânica) o que permite o controle apurado destes parâmetros.

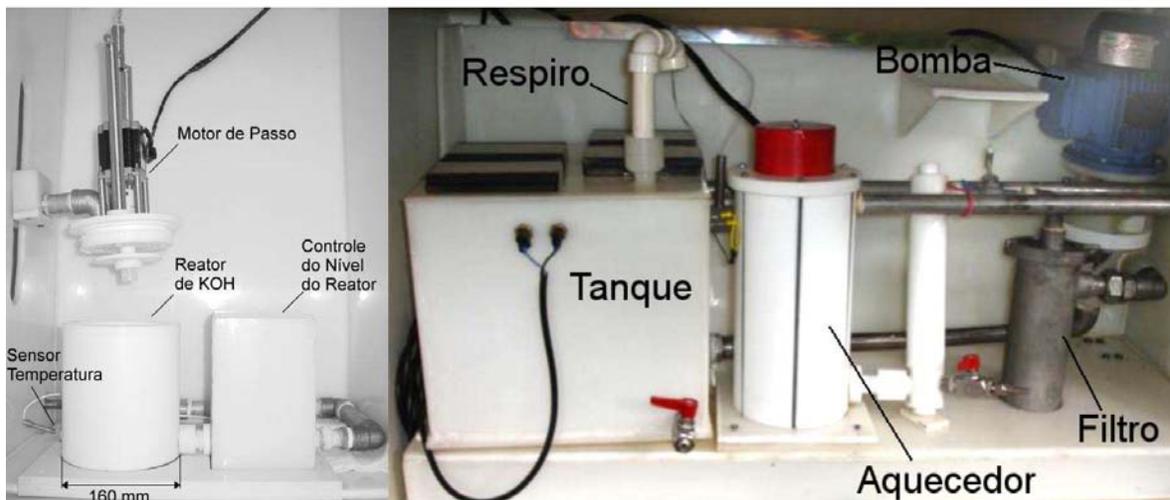
A Figura 7.17 mostra o Reator de KOH, seu programa de controle implementado em Labview® e seus circuitos de condicionamento e controle (painel elétrico). Ver apêndice D para maiores detalhes.



a) Programa de Controle



b) Painel Elétrico (Hardwares de Controle)



c) Reator de KOH, Sensor de Temperatura, Controle de Nível e Motor de Passo

d) Tanque, Respiro, Aquecedor, Filtro e Bomba

Figura 7.17 – Aparato de Corrosão Química – Reator de KOH.

Testes usando este aparato mostraram que finas membranas (espessura na ordem de algumas dezenas de microns) e com baixa rugosidade (média de 60 nm) podem ser realizadas. Estas membranas são obtidas através da técnica de *Etching-Stop* por tempo devido à boa repetibilidade na taxa de corrosão do reator.

Como as lâminas já tinham eletrônica ativa no *front-side*, foi necessário protegê-las antes de colocá-las em contato com a solução. Esta proteção foi feita utilizando a resina Sylgard®. Testes mostraram que esta resina é capaz de suportar a solução de KOH durante o processo de formação da membrana. No *back-side* da lâmina, um filme de óxinitreto ($S_iO_xN_y$) feito no LME/USP foi depositado para se fazer a fotogração da membrana e

posterior corrosão. Este filme mostrou-se adequado para suportar a corrosão química. A 90°C, o reator apresentou uma taxa de corrosão de aproximadamente 1,80 $\mu\text{m}/\text{min}$. Veja apêndice C para detalhes do processo de fabricação da membrana.

7.2.2 – Aparato de Teste Mecânico

A Figura 7.18 apresenta o esquemático do aparato de teste mecânico desenvolvido para aplicação de pressão diferencial no sensor de pressão. Este aparato fornece uma pressão estável e bem controlada no interior de uma câmara de pressão. Ele é composto por um gerador de pressão, instrumentos de aquisição e controle de dados, uma referência de pressão e um programa de controle. O programa, desenvolvido em Labview®, utiliza instrumentos virtuais (VI's) para controlar, através de um computador, todos os equipamentos de aquisição e controle de dados via interface GPIB. Os dados adquiridos são armazenados em forma de arquivos texto.

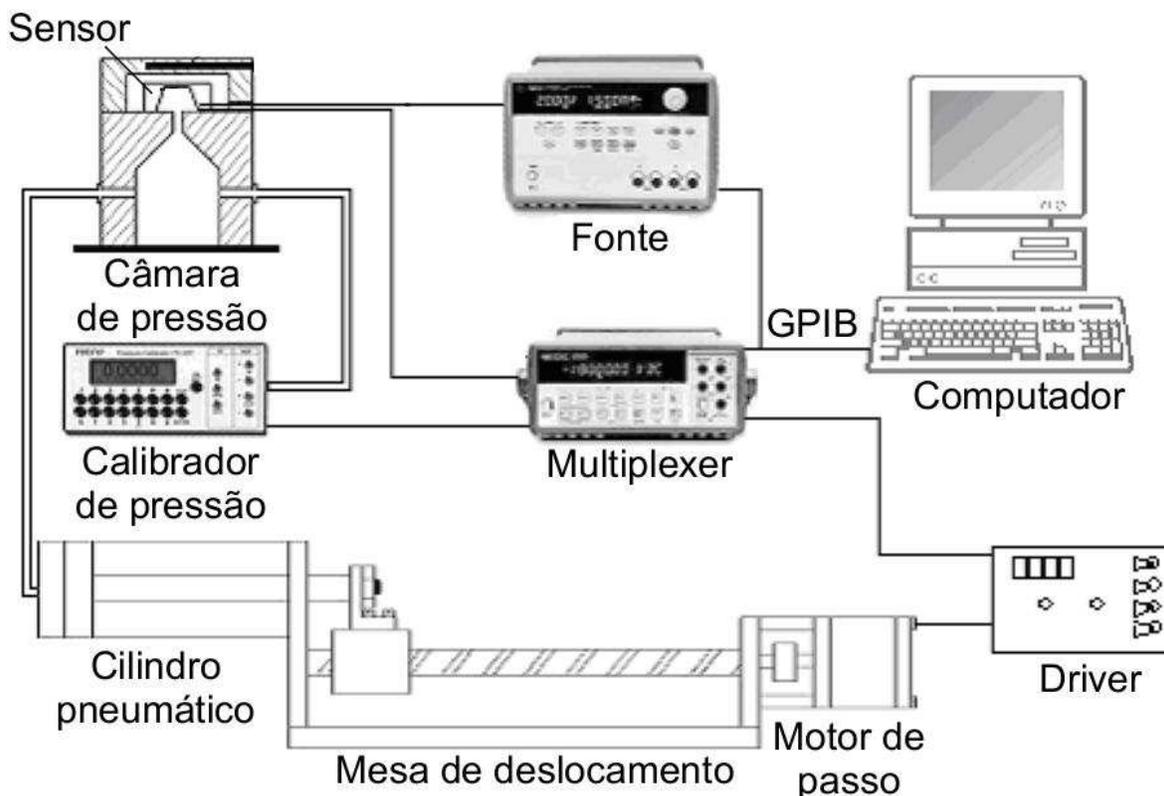


Figura 7.18 – Esquemático do aparato de teste mecânico.

A Figura 7.19 apresenta o aparato de teste mecânico (para maiores detalhes sobre este aparato ver Apêndice D).

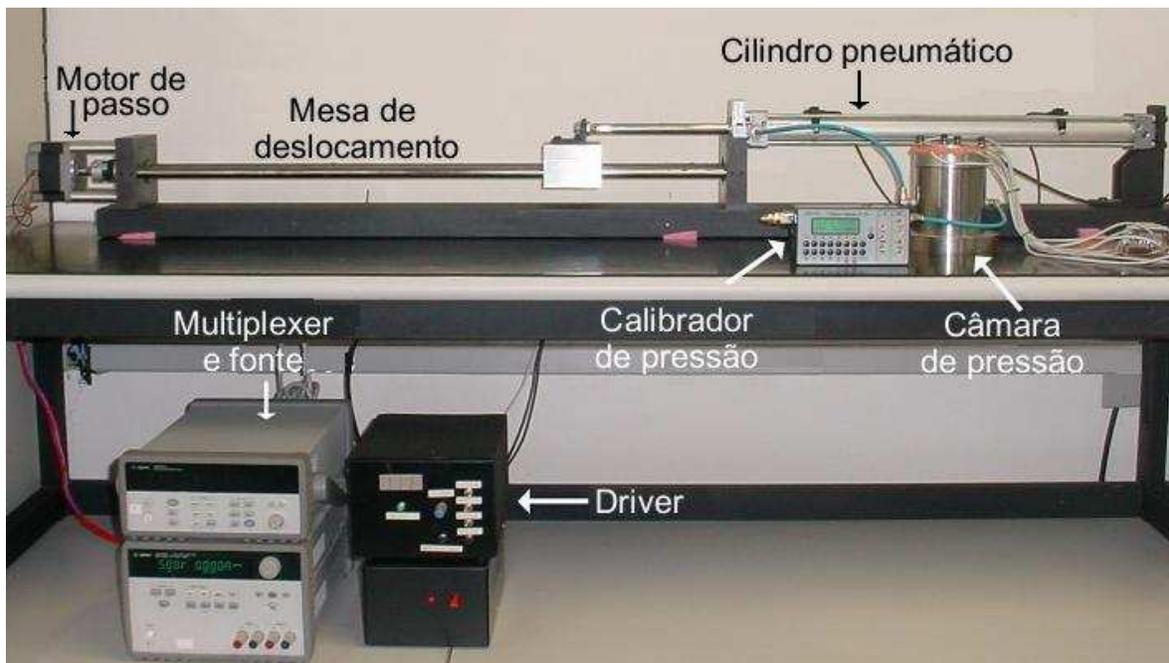


Figura 7.19 – Aparato de teste mecânico.

7.3 - Encapsulamento

Após a fabricação dos sensores, incluindo a microfabricação da membrana, fizemos o encapsulamento dos *chips*. O encapsulamento foi feito colando-se o *chip* em um substrato de alumina. O substrato de alumina tem boas propriedades mecânicas o que minimiza sua influência na medida da sensibilidade do sensor quando uma pressão externa é aplicada. A Figura 7.20 apresenta uma seção transversal do encapsulamento feito em substrato de alumina.

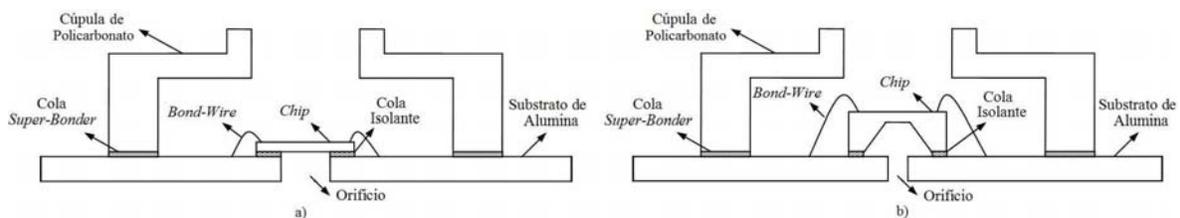


Figura 7.20 – Corte transversal do encapsulamento feito em substrato de alumina: a) Sensor da AMS e b) Sensor do CCS/Unicamp.

Para o sensor de pressão fabricado na AMS, a dimensão da membrana é obtida por fazer um furo circular de 2 mm de diâmetro no substrato de alumina e colando o *chip*, já desbastado com a espessura desejada, sobre este orifício. A geometria e o diâmetro deste

orifício definem uma membrana. Após a colagem dos *chips* no substrato de alumina, fizemos os *bond-wires*. Para proteção dos *bond-wires* foi usado uma cúpula circular de policarbonato colada ao redor dos fios. A Figura 7.21a mostra o *layout* do substrato de alumina e a Figura 7.21b mostra o encapsulamento final do *chip* no substrato de alumina.

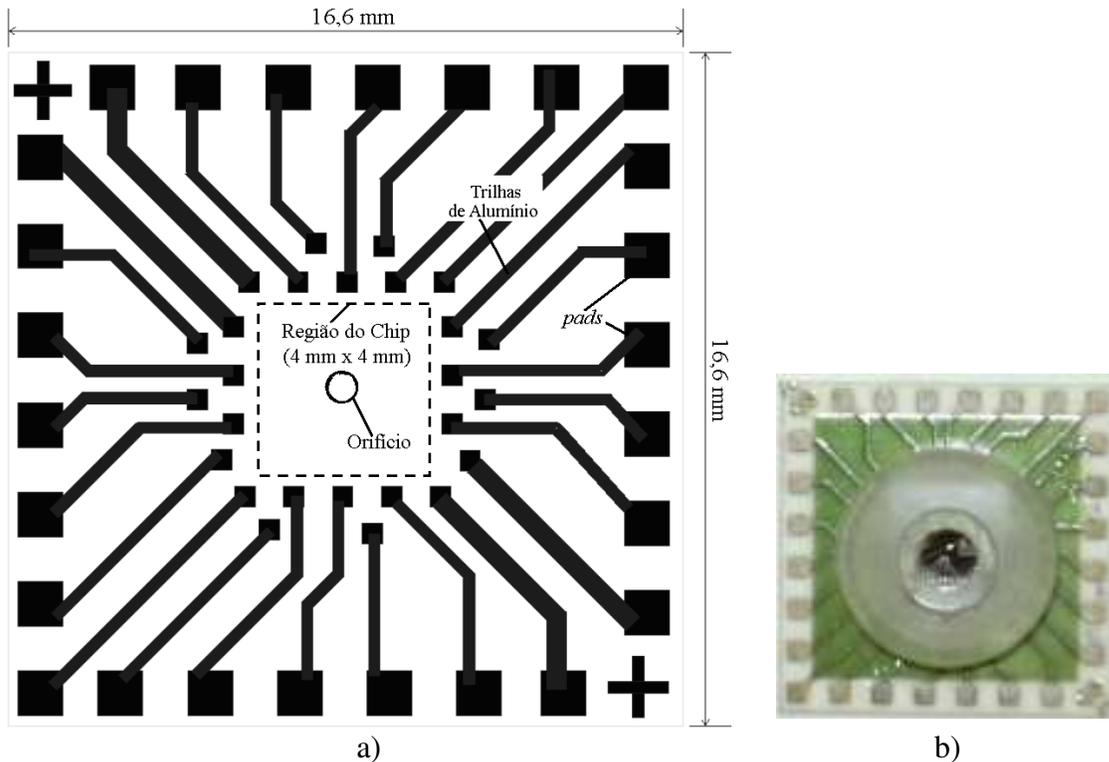


Figura 7.21 – Encapsulamento do *chip*: a) *layout* do substrato de alumina e b) encapsulamento do *chip* no substrato.

O encapsulamento do sensor de pressão fabricado no CCS/Unicamp também foi realizado em um substrato de alumina. No entanto, o diâmetro do orifício nesta placa não é crítico, pois a geometria da membrana é definida pelo processo de corrosão anisotrópica.

7.4 – Resultados

A seguir são apresentados os resultados dos sensores fabricados na AMS e no CCS/Unicamp. Características tais como: função de transferência, histerese e não-linearidade são apresentadas e discutidas. Resultados AFM e de microscopia da membrana fabricada no CCS/Unicamp são também apresentados.

7.4.1 – Fabricação da Membrana do Sensor de Pressão

7.4.1.1 – *Chip* Fabricado na AMS

Utilizamos o aparato de desbaste mecânico, descrito na seção 7.2.1.1, para desbastar o *chip* da AMS. Partimos de uma espessura de 550 μm e chegamos a aproximadamente 80 μm . Este *chip* desbastado foi então alinhado e colado no substrato de alumina com furo circular. Realizamos os *bond-wires* e, por fim, colamos a mini-cúpula para a proteção do sensor. O corte transversal deste encapsulamento é mostrado na Figura 7.20a.

7.4.1.2 – *Chip* Fabricado no CCS/Unicamp

Utilizamos o aparato de corrosão química, descrito na seção 7.2.1.2, para fabricação da membrana. Contudo, antes das amostras serem colocadas no processo de corrosão, colocamos amostras de teste para checar a taxa de corrosão. A taxa medida foi de aproximadamente 1,8 $\mu\text{m}/\text{min}$. Após a corrosão, obtemos uma membrana quadrada de aproximadamente 1,8 mm x 1,8 mm com espessura de aproximadamente 20 μm . A Figura 7.22 mostra a microscopia da membrana quadrada.

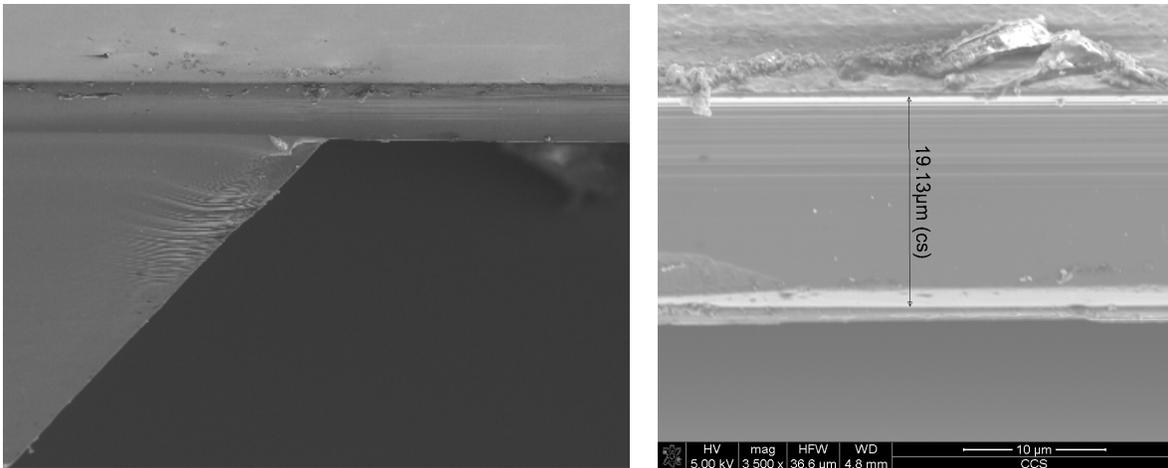


Figura 7.22 - Microscopia da membrana quadrada dos sensores de pressão fabricados no CCS/Unicamp.

Em seguida, fizemos a medida da rugosidade através de uma análise AFM. A análise foi realizada em uma área de 50 μm x 50 μm e apresentou uma rugosidade (rms) de aproximadamente 61 nm. A Figura 7.23 apresenta a análise AFM da rugosidade da membrana fabricada.

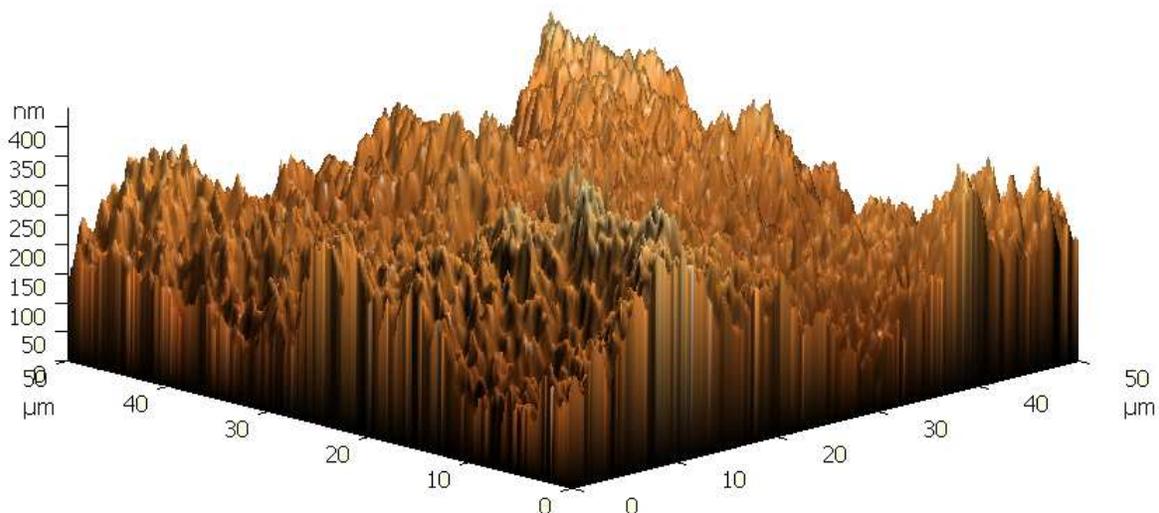


Figura 7.23 – Análise AFM da membrana quadrada dos sensores de pressão fabricados no CCS/Unicamp.

Realizamos uma nova análise mecânico estrutural através do Método de Elementos Finitos (FEM) a partir das medidas da espessura e da área da membrana fabricada. Nesta análise, aplicamos uma pressão diferencial de até 11 psi em lados opostos desta membrana e obtivemos nesta simulação o estresse ($\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$) na região ativa do piezoelemento. Na sequência, realizamos outra análise FEM observando o comportamento da tensão de saída em função da pressão aplicada para os piezoelementos Cruz Grega e 4-MTPS. Os resultados são mostrados na Tabela 7.5.

Nesta simulação, a região de máximo estresse na membrana está localizada a aproximadamente 100 μm de sua borda.

7.4.2 – Caracterização dos Sensores de Pressão

A seguir, apresentamos os resultados do cálculo da resistência de folha e da caracterização dos sensores. Para os sensores da AMS, consideramos as topologias 2 e 3a da Tabela 7.1. Para os sensores do CCS/Unicamp, consideramos as topologias 2 e 3a da Tabela 7.3.

7.4.2.1 – Resistência de Folha usando o Método de Van Der Pauw

A resistência de folha das estruturas de Cruz Grega e do FTPS Modificado foi medida através do método de Van Der Pauw [52,53]. O Apêndice E detalha como este

método foi aplicado. A Figura 7.24 apresenta uma topologia de Cruz Grega com os contatos sendo 1, 3, 2 e 4. O procedimento para o FTSP Modificado foi feito de forma similar.

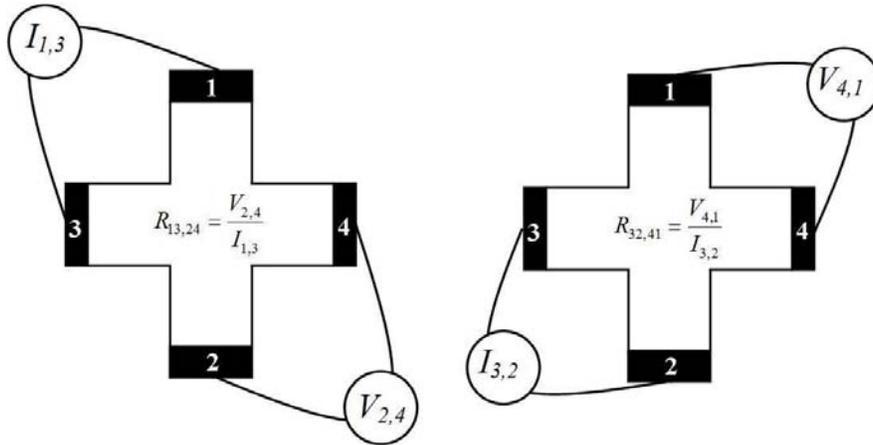


Figura 7.24 – Topologia de Cruz Grega usada para medição da resistência de folha através do método de Van Der Pauw dos sensores fabricados no CCS/Unicamp.

Considerando o sentido anti-horário dos terminais, a resistência de folha é então calculada pela fórmula E.5 dada por:

$$\exp\left(\frac{-\pi R_{13,24}}{R_s}\right) + \exp\left(\frac{-\pi R_{32,41}}{R_s}\right) = 1, \quad (7.4)$$

sendo que R_s a resistência de folha, e $R_{13,24}$ e $R_{32,41}$ são dadas pelas equações (E.1) e (E.2), respectivamente. A Tabela 7.4 apresenta os valores de R_s , $R_{13,24}$ e $R_{32,41}$ para uma corrente de polarização de aproximadamente 117 μA para cada topologia.

Tabela 7.4 – Valores experimentais das tensões e correntes do método de Van Der Pauw e da resistência de folha obtida numericamente para a topologia de Cruz Grega e FTSP Modificado do processo CCS/Unicamp

	Cruz Grega				FTSP Modificado			
	$V_{2,4}$ (mV)	$I_{1,3}$ (μA)	$V_{4,3}$ (mV)	$I_{3,2}$ (μA)	$V_{2,4}$ (mV)	$I_{1,3}$ (μA)	$V_{4,3}$ (mV)	$I_{3,2}$ (μA)
	$\approx 38,4$	117	$\approx 40,1$	≈ 117	$\approx 38,5$	≈ 117	$\approx 39,7$	≈ 117
$R_{13,24}$	$\approx 327,09 \Omega$				$\approx 327,94 \Omega$			
$R_{32,41}$			$\approx 341,57 \Omega$				$\approx 338,16 \Omega$	
R_s^*	$\approx 1515 \Omega/\square$				$\approx 1510 \Omega/\square$			

* Os valores de R_s foram obtidos numericamente através da equação 7.4.

A Tabela 7.5 mostra a sensibilidade da Cruz Grega e do 4-MTPS considerando $R_S = 1515 \Omega/\square$.

Tabela 7.5 - Intensidade de estresse ($\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$) na região de máximo estresse de uma membrana quadrada, e tensão de saída de uma Cruz Grega e de um 4-MTPS para uma variação de pressão de 0 – 11 psi.

Pressão P_d (psi)	$\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ (MPa)	$V_{o\text{Cruz_Grega}}^*$ (mV)	$V_{o4\text{-MTPS}}^*$ (mV)	Sensibilidade da Cruz Grega (mV/psi)	Sensibilidade do 4-MTPS (mV/psi)
0	0	0	0		
1	12,1	1,5	5,9		
2	24,2	2,9	11,7		
3	36,7	4,4	17,6		
5	60,4	7,3	29,3		
6	72,5	8,8	35,2	$\approx 1,5 P_d$	$\approx 5,9 P_d$
7	84,6	10,3	41,0		
8	96,7	11,7	46,9		
9	108,8	13,2	52,7		
10	120,9	14,7	58,6		
11	132,9	16,1	64,4		

* Cálculo feito considerando uma resistência de folha de 1,515 k Ω , uma I_{bias} de 117 μA , uma região ativa do tipo-p e o fator $G = 1$.

7.4.2.2 – Caracterização do Sensor Fabricado na AMS

A caracterização dos sensores da AMS foi realizada de duas formas: primeiro, caracterizamos os sensores que já tinham o circuito de polarização integrado e, segundo, caracterizamos dois dos piezoelementos independentes. Para o primeiro caso, consideramos o piezoelemento de Cruz Grega, topologia 2 da Tabela 7.1. O circuito foi polarizado com uma tensão de polarização de $\pm 2,5$ V. Um resistor de 1 K Ω foi conectado no *gate* de P1 para obtermos uma I_{bias} de aproximadamente 100 μA . A Figura 7.25 mostra o resultado da sensibilidade da Cruz Grega com circuito de polarização integrado.

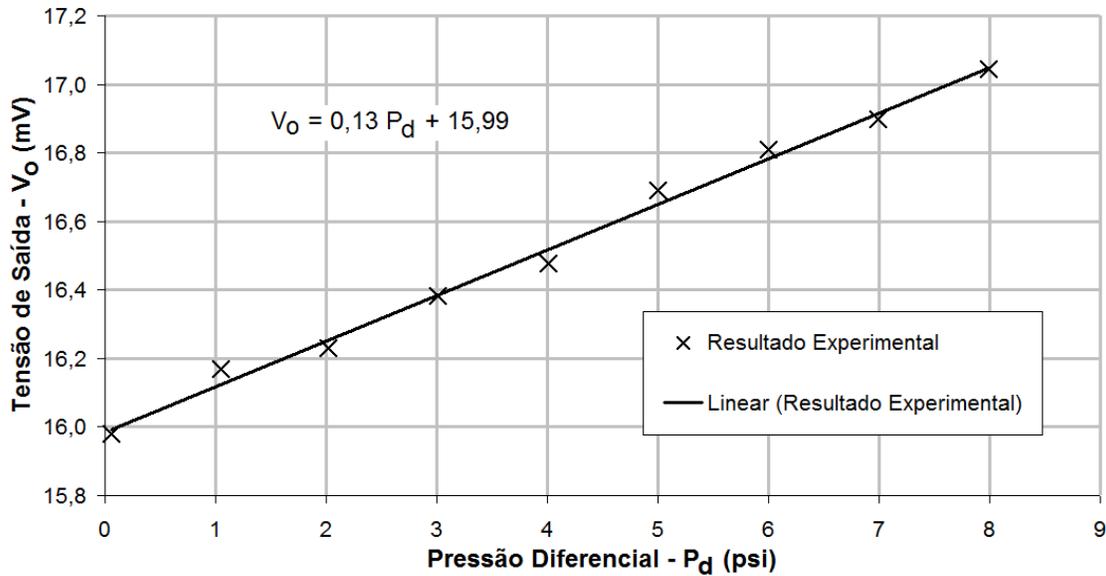


Figura 7.25 - Função de transferência da Cruz Grega com circuito de polarização integrado fabricada na AMS.

A caracterização dos piezoelementos independentes foi realizada utilizando o mesmo circuito de condicionamento discreto projetado para o sensor de pressão do CCS/Unicamp. Então, o circuito da Figura 7.12 foi usado com as mesmas condições de polarização como já discutidas (ver seção 7.1.2.1). Como já visto, os piezoelementos possuem um *gate* sobre sua região ativa. Este *gate* foi mantido no menor potencial do circuito (V_{SS}) a fim de minimizarmos sua influência na resposta do sensor. A Figura 7.26 mostra o resultado da sensibilidade de uma Cruz Grega (topologia 2 da Tabela 7.1).

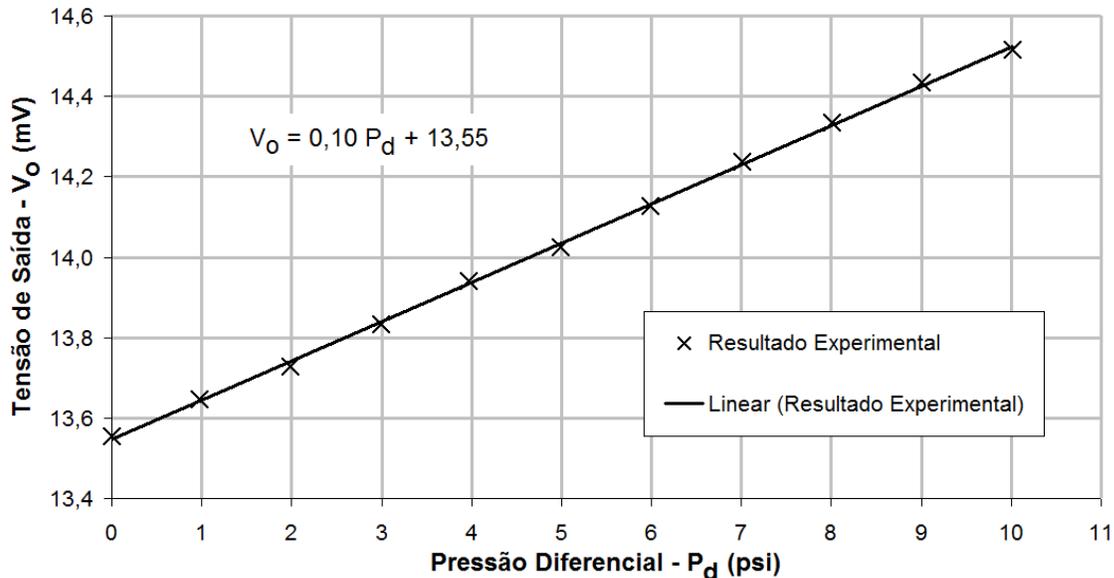


Figura 7.26 – Função de transferência de uma Cruz Grega fabricada na AMS para uma faixa de pressão de 0 a 10 psi.

A Figura 7.27 apresenta o resultado de um 4-MTPS (topologia 3a da Tabela 7.1).

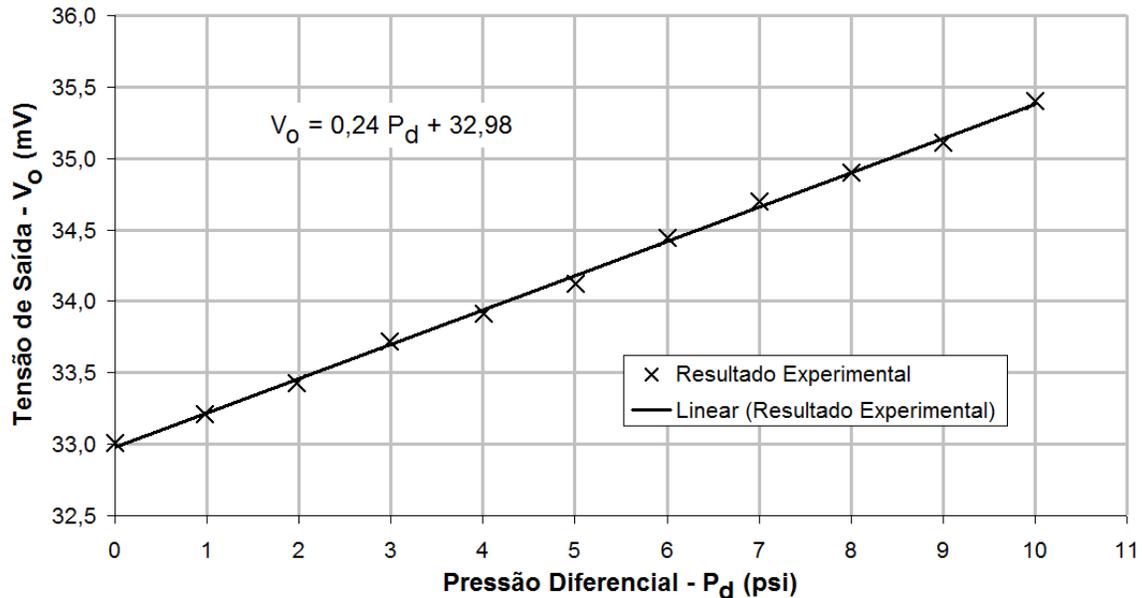
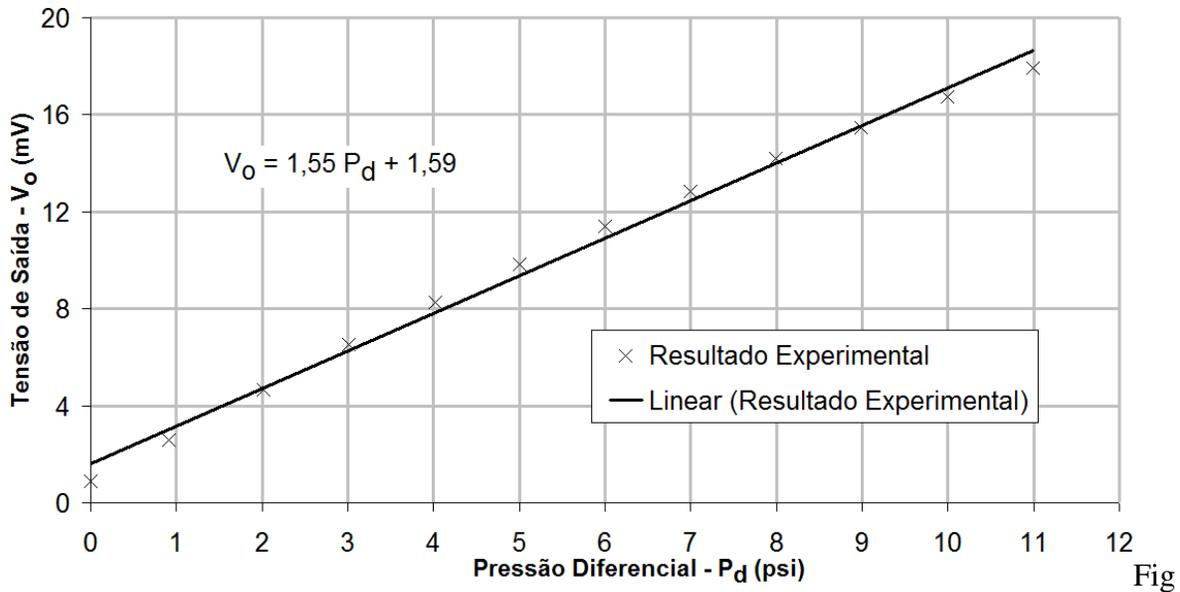


Figura 7.27 – Função de transferência de um 4-MTPS fabricado na AMS para uma faixa de pressão de 0 a 10 psi.

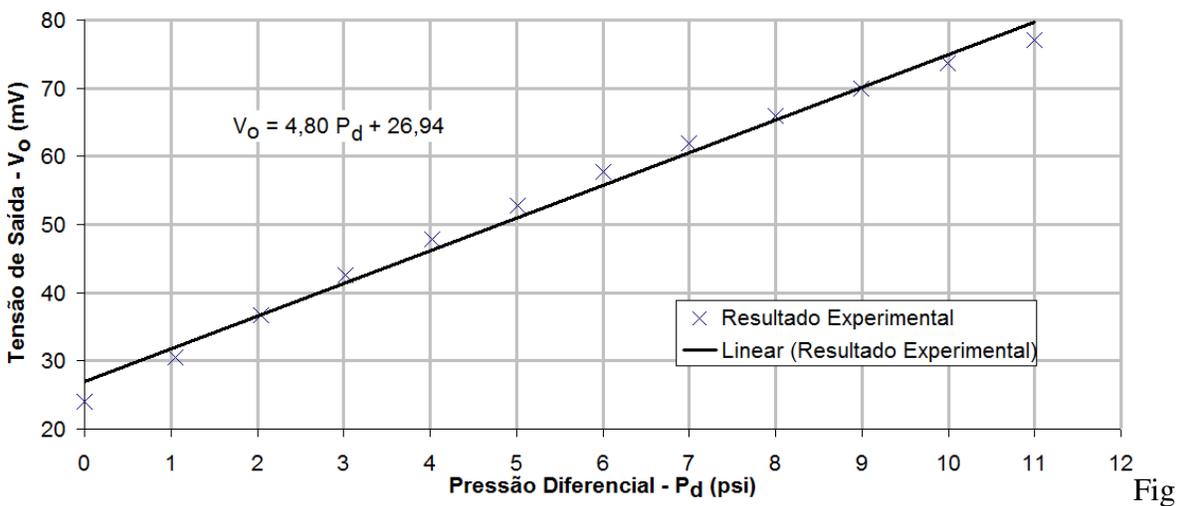
Nas figuras 7.26 e 7.27 estão apresentadas as funções de transferência dos sensores em análise. A sensibilidade da Cruz Grega e do 4-MTPS foi de aproximadamente 0,1 mV/psi e 0,24 mV/psi, respectivamente. Portanto, o MTPS apresentou uma sensibilidade 2,4 vezes maior que a Cruz Grega. Contudo, o valor teórico esperado era de 4 vezes maior. Esta diferença deve-se principalmente ao fato de que a membrana formada através do encapsulamento do *chip* não fornece um alinhamento perfeito para os piezoelementos. Desta maneira, não podemos considerar que todos os piezoelementos estão numa mesma região e intensidade de estresse mecânico. Devido a este mesmo fato, não obtivemos a mesma sensibilidade para as Cruzes Grega, mas um valor aproximado.

7.4.2.3 – Caracterização do Sensor Fabricado no CCS/Unicamp

Caracterizamos os sensores de pressão fabricados no CCS/Unicamp utilizando o mesmo circuito de condicionamento discreto apresentado na Figura 7.12. Estes sensores são os de topologia de Cruz Grega e 4-MTPS (topologias 2 e 3a da Tabela 7.3, respectivamente). As Figuras 7.28 e 7.29 apresentam a tensão de saída dos sensores em função de uma pressão diferencial externa.



ura 7.28 – Função de transferência de uma Cruz Grega fabricada no CCS/Unicamp.



ura 7.29 – Função de transferência de um MTPS fabricado no CCS/Unicamp.

Como observado pelas curvas de transferências, a Cruz Grega apresentou uma sensibilidade de aproximadamente 1,55 mV/psi e o 4-MTPS de 4,8 mV/psi. Portanto, o 4-MTPS apresentou uma sensibilidade aproximadamente 3,1 vezes maior. Este resultado difere tanto da sensibilidade esperada entre um FTPS e um 4-MTPS, que seria de 4 vezes, como para seus valores teóricos, conforme apresentados na Tabela 7.5. Concluímos que uma das razões para este fato é que os piezoelementos foram fabricados com dimensões relativamente grandes (resolução de 20 μm). Como estudado na seção 6.3.3 (ver capítulo 6), a região de máximo estresse mecânico em uma membrana quadrada é concentrada em

uma pequena região da membrana. Uma vez que os piezoelementos são relativamente grandes, sua região ativa pode estar sob ação de um estresse não-uniforme. Ainda, erro de alinhamento pode ter ocorrido contribuindo para que os piezoelementos não estejam localizados nesta região. Estes fatores contribuem não somente para uma diferença entre a sensibilidade teórica e experimental, mas também para uma não-linearidade da tensão de saída dos sensores. As Figuras 7.30 e 7.31 apresentam a não-linearidade para ambos os sensores.

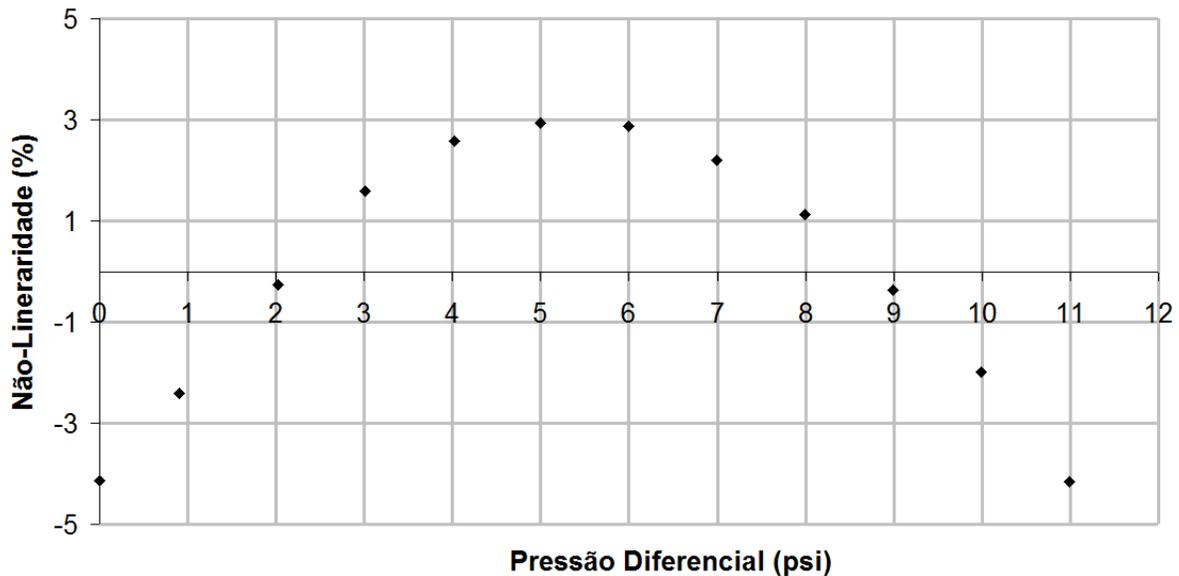


Figura 7.30 – Gráfico da não-linearidade da Cruz Grega fabricada na CCS/Unicamp.

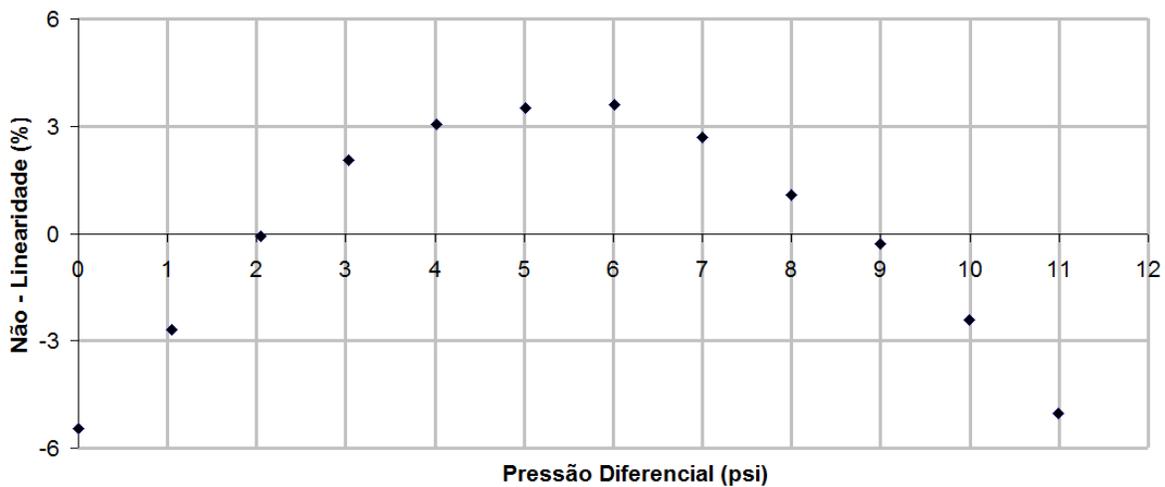


Figura 7.31 – Gráfico da não-linearidade de um 4-MTPS fabricado na CCS/Unicamp.

Pelos resultados, a não-linearidade dos sensores foi de, no máximo, 4,1 e 5,6 % FSO para a Cruz Grega e o 4-MTPS, respectivamente. Em seguida, fizemos análise de histerese do sensor de pressão de multiterminais. Esta análise foi feita para uma faixa de pressão de 0 a 11 psi. A Figura 7.32 apresenta o resultado.

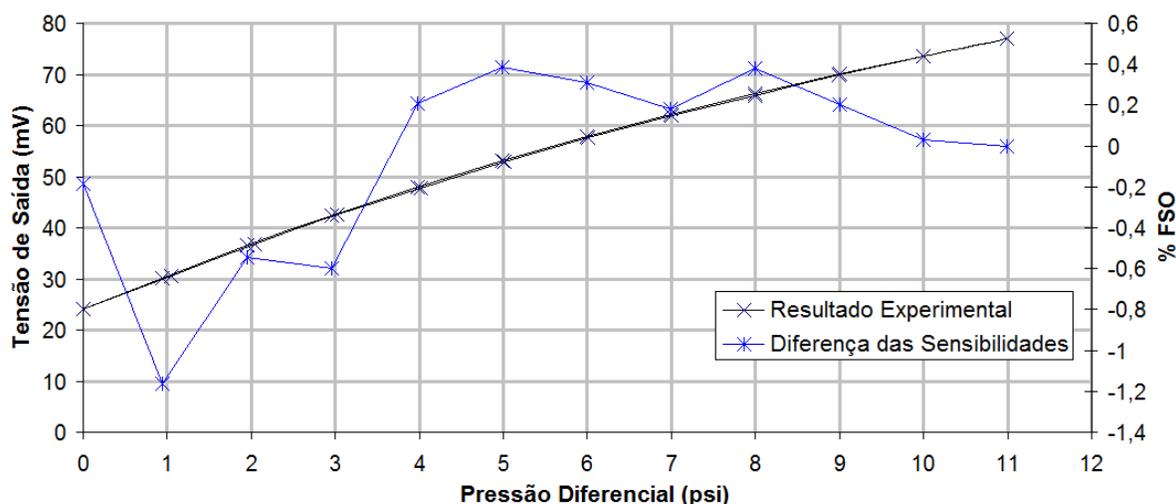


Figura 7.32 – Gráfico de histerese de um 4-MTPS fabricado no CCS/Unicamp.

Este resultado apresenta não somente a histerese do sensor, mas também a repetibilidade de sua tensão de saída. Isto é devido principalmente à acomodação do encapsulamento no substrato de alumina, pois o silício não apresenta histerese. A composição da histerese mais a repetibilidade do 4-MTPS foi de aproximadamente 1,15 %FSO.

A Tabela 7.6 apresenta um resumo das características dos sensores de pressão fabricados na AMS e no CCS/Unicamp.

Tabela 7.6 – Resumo das características experimentais dos sensores de pressão

	Características Experimentais dos Sensores de Pressão			
	Cruz Grega		4-MTPS	
	AMS	CCS/Unicamp	AMS	CCS/Unicamp
Sensibilidade (mV/psi)	≈ 0,1	≈ 1,55	≈ 0,24	≈ 4,8
Offset (mV)	≈ 13,6	≈ 1,6	≈ 33	≈ 26,9
Não-Linearidade (%FSO)	-	≈ 4,1	-	≈ 5,6
Histerese + Repetibilidade (%FSO)	-	-	-	≈ 1,15

Os resultados mostram que a sensibilidade dos sensores é proporcional ao número de terminais de contatos-corrente de entrada dos piezoelementos, conforme esperado pelo estudo teórico realizado. A discrepância encontrada entre as sensibilidades de um mesmo tipo de sensor, mas fabricado em tecnologias distintas, é principalmente devido à diferença entre as resistências de folha das duas tecnologias (a resistência de folha da tecnologia CCS foi aproximadamente 10 vezes maior do que aquela da AMS), à intensidade de estresse mecânico obtido nos diferentes tipos de membrana e ao tamanho dos piezoelementos.

Na Tabela 7.7, apresentamos as características de um sensor de pressão comercial. Este sensor é da série MPX50 da Motorola® que é um sensor do tipo 4 terminais com nenhuma técnica de compensação [59]. As características apresentadas na tabela levam em consideração as seguintes condições de operação: tensão de polarização de 3 volts, temperatura de operação de 25 °C e uma pressão máxima de 7,25 psi (50 KPa). No entanto, uma comparação direta com nossos resultados é inadequada, uma vez que alguns parâmetros de processo e condições de testes são desconhecidos ou considerados diferentes dos que foram feitos neste trabalho. Não é possível determinarmos, por exemplo, a geometria da membrana do sensor comercial e nem sua espessura, a resistência de folha da região ativa do piezoelemento, as relações de dimensão dos parâmetros geométricos do piezoelemento, etc. Além disso, a condição de polarização do sensor comercial (por fonte de tensão) difere da usada em nosso trabalho (por fonte de corrente),

Tabela 7.7 – Característica do sensor de pressão da Motorola® da série MPX50

	Características do MPX50 da Motorola®
Sensibilidade (mV/psi)	≈ 8,3
Offset típico (mV)	20
Não-Linearidade (% FSO)	0,25
Histerese (% FSO)	±0,1

CAPÍTULO 8

Conclusão

Este trabalho apresentou uma nova topologia de piezoelemento, baseado no efeito piezorresistivo transverso, que permite maximizar sua sensibilidade através da inclusão de contatos-corrente de entrada e da otimização do fator de correção geométrico (G).

As principais realizações deste trabalho foram:

- Projeto e realização de um sensor de pressão baseado no efeito piezorresistivo transverso;
- Estudo e otimização do piezoelemento microeletrônico e da membrana micromecânica, através do Método de Elementos Finitos (FEM);
- Estudo para a maximização da sensibilidade e minimização do offset do sensor;
- Desenvolvimento e caracterização dos aparatos de corrosão química e de desgaste mecânico para microfabricação da membrana deste sensor.

As análises numéricas através do Método de Elementos Finitos (FEM) foram realizadas para estudo do comportamento do efeito piezorresistivo transverso de uma nova topologia de piezoelemento. A análise FEM foi também utilizada para o estudo da distribuição do estresse mecânico em uma membrana quadrada. Através destas análises otimizamos a geometria dos piezoelementos e da membrana e ainda definimos a localização destes piezoelementos sobre esta membrana.

Os aparatos de desgaste mecânico e de corrosão química foram utilizados para a realização das membranas dos sensores. O aparato de desgaste mecânico permitiu o pós-

processamento de *chips*, onde estavam microfabricados os sensores de pressão na tecnologia CMOS 0,35 μm da AMS, reduzindo a espessura do substrato como um todo até 80 μm . Já o aparato de corrosão química, com KOH, permitiu o pós-processamento de *chips*, onde estavam os piezoelementos microfabricados no CCS/Unicamp, realizando membranas quadradas com espessura de 20 μm e rugosidade da ordem de 61 nm (rms). Estas estruturas apresentaram excelente controle e repetibilidade das suas geometrias quando comparadas às estruturas obtidas pelo método do desbaste mecânico.

Nossos estudos indicam que a topologia de piezoelemento proposta possui a sensibilidade maximizada pela inclusão de contatos de corrente de entrada e também pela melhoria do fator de correção geométrico (G). Neste trabalho, consideramos um piezoelemento de multi-terminais com 4 pares de terminais de contatos-corrente de entrada e, portanto, uma sensibilidade esperada 4 vezes maior do que a de um piezoelemento convencional (com 1 contato-corrente de entrada). Entretanto, os resultados obtidos experimentalmente indicaram que a sensibilidade foi melhorada, mas ficou aquém do valor previsto teoricamente. Esta discordância deve-se principalmente a não uniformidade da distribuição do estresse mecânico sobre o piezoelemento, causada provavelmente por um erro de alinhamento entre as estruturas microeletrônica e micromecânica e ao tamanho dos piezoelementos principalmente para os sensores fabricados no CCS/Unicamp.

Também concluímos que, para maximização do efeito piezorresistivo transversal, os piezoelementos devem estar localizados próximos à borda da membrana, sua região ativa deve ser do tipo-p e os contatos-corrente devem estar alinhados com as direções $\langle 100 \rangle$ em lâminas com plano cristalográfico (100).

Este tipo de sensor usando piezoelementos de multi-terminais destaca-se como uma alternativa aos sensores convencionais do tipo 4-terminais e aos baseados em Pontes de Wheatstone.

A Tabela 8.1 apresenta as principais características dos sensores fabricados em diferentes tecnologias.

Tabela 8.1 – Resumo das características experimentais dos sensores de pressão

	Características Experimentais dos Sensores de Pressão			
	Cruz Grega		4-MTPS	
	AMS	CCS/Unicamp	AMS	CCS/Unicamp
Sensibilidade (mV/psi)	≈ 0,1	≈ 1,55	≈ 0,24	≈ 4,8
Offset (mV)	≈ 13,6	≈ 1,6	≈ 33	≈ 26,9
Não-Linearidade (% FSO)	-	≈ 4,1	-	≈ 5,6

A principal vantagem do sensor de multi-terminais é que podemos maximizar sua sensibilidade através da inclusão de contatos-corrente de entrada. Além disto, podemos fabricar os piezoelementos para L/W variados e ao mesmo tempo manter o fator G próximo da unidade. Por outro lado, com o aumento do número de terminais de contatos corrente de entrada, a resistência de saída e o consumo de potência são aumentados proporcionalmente. O aumento da área de metalização e dos contatos pode refletir negativamente sobre o ruído térmico, eletromagnético e no *offset* através do efeito Seebeck. Entretanto, estas desvantagens podem ser minimizadas através de um projeto cuidadoso.

Apêndice A

Transformação de Coordenadas

O cálculo da componente de um vetor em um sistema de coordenada arbitrária, que não é paralelo ao sistema de coordenada dos eixos principais, é feito usando a transformação do sistema de coordenada. Através de uma transformação linear, temos que um vetor x , relacionado aos eixos principais de um sistema de coordenada, é transformado em um vetor \bar{x} , de um sistema de coordenada arbitrária, usando [A1]:

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3; \\ \bar{x} = Ax \quad \text{ou} \quad \bar{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3; \\ \bar{x}_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3;\end{aligned}\tag{A.1}$$

sendo que os números 1, 2 e 3 representam os eixos x , y e z , respectivamente e a_{ij} é uma matriz rotação dada por:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix},\tag{A.2}$$

sendo que l , m e n são os cossenos das direções do sistema de coordenada principal (x, y, z) para o sistema de coordenada arbitrária $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$. Usando os ângulos de Euler, definidos na Figura A1 [A2], a matriz a_{ij} é representada como:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} (c\phi c\theta c\psi - s\phi s\psi) & (s\phi c\theta c\psi + c\phi s\psi) & (-s\theta c\psi) \\ (-c\phi c\theta s\psi - s\phi c\psi) & (-s\phi c\theta s\psi + c\phi c\psi) & (s\theta s\psi) \\ (c\phi c\theta) & (s\phi s\theta) & c\theta \end{bmatrix},\tag{A.3}$$

sendo que $c\phi = \cos(\phi)$, $s\phi = \text{sen}(\phi)$, e assim por diante.

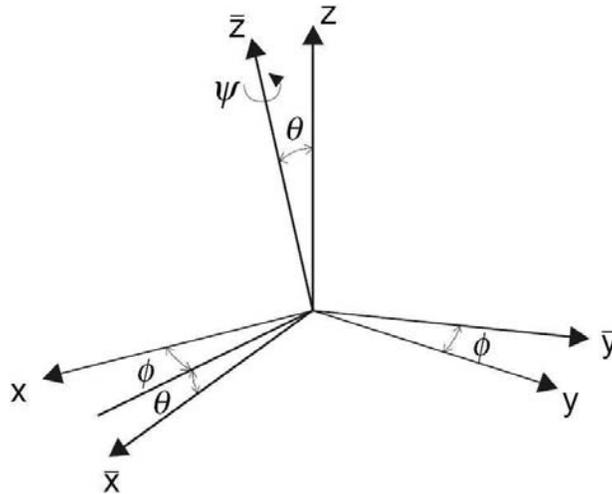


Figura A1 – Definição dos ângulos de Euler ϕ, θ e ψ .

A rotação é dada pelos ângulos de Euler (ϕ, θ, ψ) sendo que a primeira rotação é feita por um ângulo ϕ em torno do eixo z , a segunda é feita por um ângulo $\theta \in [0, \pi]$ no eixo x e a terceira rotação é feita novamente no eixo z por um ângulo ψ . A Tabela A1 apresenta as equações de transformação, em notação de Somatória de Einstein, de tensores de até quarta ordem em um sistema de coordenada arbitrária.

Tabela A1 – Equações de transformação de tensores em um sistema de coordenada arbitrária

Ordem do Tensor	Equação	
0	-	
1	$\bar{T}_i = a_{ij} T_j$	[A.4]
2	$\bar{T}_{ij} = a_{ik} a_{jl} T_{kl}$	[A.5]
3	$\bar{T}_{ijk} = a_{il} a_{jm} a_{kn} T_{lmn}$	[A.6]
4	$\bar{T}_{ijkl} = a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} T_{mnop}$	[A.7]

Referências

[A1] BRONSHTEIN, I. N.; SEMENDYAYEV, K. A.; MUSIOL, G.; MUEHLIG, H.; Handbook of Mathematics, 5 ed., Springer, Berlin, 2007.

[A2] FRUETT, F.; The Piezojunction Effect in Silicon, its Consequences and Applications for Integrated Circuits and Sensors, DPU Science, The Netherlands, 2001.

Apêndice B

Programa de Simulação em Ansys®

Programa Ansys® usado para estudar o comportamento (distribuição de potencial e tensão de saída) dos piezoelementos sob influência de um estresse mecânico uniaxial e uniforme.

O programa Ansys, em linha de comando, usado para estudar o comportamento dos piezoelementos sob influência de um estresse mecânico uniaxial e uniforme é mostrado para um piezoelemento de multi-terminais com 4 terminais de contatos-corrente de entrada. Para outros tipos de piezoelementos, este programa pode ser facilmente modificado. O programa é descrito como segue:

```

fini
/clear,
/batch,list
!Título a aparecer no Ansys após simulação
/title, Piezoelemento de Silício de Multi-Terminais, Unidade de Mediada: uMKSV
/com,
/com, Parâmetros Geométricos:
/com,
/com,
gap=20           !Distância entre os braços dos contatos-corrente
lcc=20          !Largura dos terminais de Contatos-corrente
W=4*lcc+5*gap  !Largura da Região de Espalhamento de Corrente
L=W*0.1        !Comprimento da REC
ccc=lcc*1      !Comprimento dos terminais de contatos-corrente
S=W*0.01       !Largura dos Contatos-Sensor
M=10*L        !Tamanho da Membrana
/com,
/com,
!Definição das propriedades do material (variáveis), no caso Silício, tais como:
!coeficientes de elasticidades, coeficientes de piezoresistência e resistividade.
/com, Propriedades do Material(Si):

```

```

/com,
/com, Stiffness, MN/m^2
/com, [c11 c12 c12 0 ]
/com, [c12 c11 c12 0 ]
/com, [c12 c12 c11 0 ]
/com, [ 0 0 0 c44]
/com,
c11= 16.57e4
c12= 6.39e4
c44= 7.96e4
/com,
/com, Resistividade (Si tipo-p), em TOhm*um
rho= 7.8e-8
/com,
/com, Coeficientes Piezorresistivos (Si tipo-p), (MPa)^(-1)
/com, [p11 p12 p12 0 ]
/com, [p12 p11 p12 0 ]
/com, [p12 p12 p11 0 ]
/com, [ 0 0 0 p44]
/com,
p11=6.5e-5
p12=-1.1e-5
p44=138.1e-5
/com,
!Aplicação de cargas. Valor da pressão a que o piezoelemento está sob influência e
!intensidade da corrente de polarização.
/com, Aplicação de Cargas
/com, Pressão, MPa
p=100
/com,
/com, Fonte de Corrente, pA
Is = 2e6      !2uA
/nopr
/com,
!Definição dos tipos de elementos para cada material que está sendo utilizado. Em nosso
!caso, utilizamos 2 tipos de materiais: um para o piezoelemento (elemento piezorresistivo)
!e outro para a membrana (elemento estrutural).
/com, Definição dos Materiais
/prep7
et,1,PLANE223,101      ! Definindo material para elemento do tipo piezorresistivo
                       !em plano-estresse
et,2,PLANE183         ! Definindo material para elemento do tipo estrutural em
                       !plano-estresse

/com,
!Definição da orientação de cada material
/com, Orientação de Cada Material
/com,

```

```

local,11          !Orientado no plano (x,y) – direção [110] – Define-se um sistema !de
                  coordenada. Neste caso, sendo o 11.
local,12,,,,,45  ! Orientado a 45° do plano (x,y) – direção [010] – Define-se um
                  !sistema de coordenada arbitrário. Neste caso, sendo o 12

/com,
!Aplicação das propriedades dos materiais
/com,Seleção e aplicação das propriedades dos materiais
/com,
/com, Aplicação dos Coeficientes de Elasticidade
/com,
tb,ANEL,1,,,0    ! Definindo propriedade do material como sendo uma
tbdata,1,c11,c12,c12,0,0,0 !matriz de coeficientes de elasticidade
tbdata,7,c11,c12,0,0,0
tbdata,12,c11,0,0,0
tbdata,16,c44,0,0
/com,
/com, Aplicação da Resistividade
/com,
mp,RSVX,1,rho
/com,
/com, Aplicação dos Coeficientes Piezorresistivos
/com,
tb,PZRS,1        !Definindo propriedade do material como sendo uma
tbdata,1,p11,p12,p12,0,0,0 !matriz de coeficientes piezorresistivos
tbdata,7,p12,p11,p12,0,0,0
tbdata,13,p12,p12,p11,0,0,0
tbdata,22,p44,0,0
/com,
!Definição das dimensões do piezoelemento e da membrana. Os números de 1 a 36
!representam todos os vértices (keypoints) do piezoelemento.
/com, Definição das Dimensões do Piezoelemento e da Membrana
/com,
/com, Definição da Área do Piezoelemento
!Escolhendo o sistema de coordenada
/com, Sistema de Coordenada
csys,12
/com,
/com, Keypoints
k,1,gap/2,L/2
k,2,gap/2,L/2+ccc
k,3,gap/2+lcc,L/2+ccc
k,4,gap/2+lcc,L/2
k,5,1.5*gap+lcc,L/2
k,6,(1.5*gap)+lcc,L/2+ccc
k,7,(1.5*gap)+(2*lcc),L/2+ccc
k,8,(1.5*gap)+(2*lcc),L/2
k,9,W/2,L/2

```

k,10,W/2,-L/2
 k,11,(1.5*gap)+(2*lcc),-L/2
 k,12,1.5*gap+2*lcc,-L/2-ccc
 k,13,1.5*gap+lcc,-L/2-ccc
 k,14,1.5*gap+lcc,-L/2
 k,15,gap/2+lcc,-L/2
 k,16,gap/2+lcc,-L/2-ccc
 k,17,gap/2,-L/2-ccc
 k,18,gap/2,-L/2
 k,19,-gap/2,-L/2
 k,20,-gap/2,-L/2-ccc
 k,21,-gap/2-lcc,-L/2-ccc
 k,22,-gap/2-lcc,-L/2
 k,23,-1.5*gap-lcc,-L/2
 k,24,-1.5*gap-lcc,-L/2-ccc
 k,25,-1.5*gap-2*lcc,-L/2-ccc
 k,26,-1.5*gap-2*lcc,-L/2
 k,27,-W/2,-L/2
 k,28,-W/2,L/2
 k,29,-1.5*gap-2*lcc,L/2
 k,30,-1.5*gap-2*lcc,L/2+ccc
 k,31,-1.5*gap-lcc,L/2+ccc
 k,32,-1.5*gap-lcc,L/2
 k,33,-gap/2-lcc,L/2
 k,34,-gap/2-lcc,L/2+ccc
 k,35,-gap/2,L/2+ccc
 k,36,-gap/2,L/2

/com,

!Construindo área. Unem-se todos os keypoints através de uma lista.

flst,2,36,3
 fitem,2,1
 fitem,2,2
 fitem,2,3
 fitem,2,4
 fitem,2,5
 fitem,2,6
 fitem,2,7
 fitem,2,8
 fitem,2,9
 fitem,2,10
 fitem,2,11
 fitem,2,12
 fitem,2,13
 fitem,2,14
 fitem,2,15
 fitem,2,16
 fitem,2,17

```

fitem,2,18
fitem,2,19
fitem,2,20
fitem,2,21
fitem,2,22
fitem,2,23
fitem,2,24
fitem,2,25
fitem,2,26
fitem,2,27
fitem,2,28
fitem,2,29
fitem,2,30
fitem,2,31
fitem,2,32
fitem,2,33
fitem,2,34
fitem,2,35
fitem,2,36
a,p51x
/com, Definição da Área da Membrana
/com,
!Escolhendo o sistema de coordenada
/com Sistema de Coordenada
csys,11
/com,
!Construção de uma Membrana do tipo retangular
/com, Membrana Retangular
rect,-M/2,M/2,-M/2,M/2
/com,
!Fazendo-se um overlapping das 2 estruturas
aovlap,all
/com,
!Fazendo-se o processo de Meshing das 2 áreas (piezoelemento e membrana)
!manualmente.
/com, Processo de Meshing dos Materiais
esys,12                !Escolha do sistema de coordenada do elemento
type,1                !Escolha do Material
esize,1.5            !Tamanho do mesh (dos elementos)
mshape,1,2-D        !Escolha do tipo de meshing: triangular e em 2D
amesh,1             !Escolhendo a área fazer o meshing
esys,11                !Escolha do sistema de coordenada do outro elemento
type,2                !Escolha do material
esize,5              !Tamanho do mesh
amesh,3             !Escolhendo a área para fazer o meshing. Não é necessário definir !o
                    tipo de meshing novamente
/com,

```

```

!Aplicação das condições de contorno elétrica e estrutural de cada material
/com, Aplicações das Condições de Contorno
/com,
/com, Aplicação das Condições de Contorno Elétricas no Piezoelemento
csys,12          !Selecionando sistema de coordenada do piezoelemento
/com,
/com, Aplicação das Fontes de Corrente nos Terminais de Contatos-Corrente
/com,
/com, Braço 1 - Superior
nset,s,loc,y,(L/2)+ccc          !Definindo Região...
nset,r,loc,x,-1.5*gap-2*lcc,-1.5*gap-lcc  !... do eletrodo
cp,1,volt,all          !Setando eletrodo
*get,n11,node,0,num,max          !Introduzindo variável n11 neste eletrodo
f,n11,amps,Is          !Aplicando corrente
/com,
/com, Braço 1 - Inferior
nset,s,loc,y,-L/2-ccc          !Definindo Região...
nset,r,loc,x,-1.5*gap-2*lcc,-1.5*gap-lcc  !... do eletrodo
cp,2,volt,all          !Setando eletrodo
*get,n12,node,0,num,max          !Introduzindo variável n12 neste eletrodo
f,n12,amps,-Is          !Aplicando corrente
d,all,volt,0          !Aplicando referência (define região de contorno)
/com,
/com, Braço 2 - Superior
nset,s,loc,y,L/2+ccc          !Definindo região...
nset,r,loc,x,-gap/2-lcc,-0.5*gap          !... do eletrodo
cp,3,volt,all          !Setando Eletrodo
*get,n21,node,0,num,max          !Introduzindo variável n21 neste eletrodo
f,n21,amps,Is          !Aplicando corrente
/com,
/com, Braço 2 - Inferior
nset,s,loc,y,-L/2-ccc          !Definindo região...
nset,r,loc,x,-gap/2-lcc,-0.5*gap          !... do eletrodo
cp,4,volt,all          !Setando Eletrodo
*get,n22,node,0,num,max          !Introduzindo variável n22 neste eletrodo
f,n22,amps,-Is          !Aplicando corrente
/com,
/com, Braço 3 - Superior
nset,s,loc,y,L/2+ccc          !Definindo região...
nset,r,loc,x,gap/2,0.5*gap+lcc          !... do eletrodo
cp,5,volt,all          !Setando Eletrodo
*get,n31,node,0,num,max          !Introduzindo variável n31 neste eletrodo
f,n31,amps,Is          !Aplicando corrente
/com,
/com, Braço 3 - Inferior
nset,s,loc,y,-L/2-ccc          !Definindo região...
nset,r,loc,x,0.5*gap,0.5*gap+lcc          !... do eletrodo

```

```

cp,6,volt,all                !Setando Eletrodo
*get,n32,node,0,num,max      !Introduzindo variável n32 neste eletrodo
f,n32,amps,-Is              !Aplicando corrente
/com,
/com, Braço 4 - Superior
nset,s,loc,y,L/2+ccc        !Definindo região...
nset,r,loc,x,(1.5*gap)+lcc,(1.5*gap)+2*lcc !... do eletrodo
cp,7,volt,all                !Setando Eletrodo
*get,n41,node,0,num,max     !Introduzindo variável n41 neste eletrodo
f,n41,amps,Is              !Aplicando corrente
/com,
/com, braço 4 - Inferior
nset,s,loc,y,-L/2-ccc      !Definindo região...
nset,r,loc,x,(1.5*gap)+lcc,(1.5*gap)+2*lcc !... do eletrodo
cp,8,volt,all                !Setando Eletrodo
*get,n42,node,0,num,max     !Introduzindo variável n42 neste eletrodo
f,n42,amps,-Is            !Aplicando corrente
/com,
/com, Setando Eletrodos dos Contatos-Sensor
/com,
/com, Contatos-Sensor: Braço da Esquerda
nset,s,loc,x,-W/2          !Definindo região...
nset,r,loc,y,-S/2,S/2     !... do eletrodo
cp,9,volt,all              !Setando eletrodo
*get,nt,node,0,num,min    !Introduzindo variável nt em um nó deste eletrodo
/com,
/com, Contatos-Sensor: Braço da Direita
nset,s,loc,x,W/2           !Definindo região...
nset,r,loc,y,-S/2,S/2     !... do eletrodo
cp,10,volt,all             !Setando eletrodo
*get,nb,node,0,num,min    !Introduzindo variável nb em um nó deste eletrodo
/com,
nset,all
/com,
/com, Aplicação das Condições de Contorno Estruturais da Membrana
/com,
csys,11                    !Selecionando sistema de coordenada da membrana
/com,
/com, Aplicação do Engastamento no Lado Esquerdo da Membrana
nset,s,loc,x,-M/2         !Selecionando nós do eixo x
d,all,ux,0                !Aplicando força 0 (zero) em x
nset,r,loc,y,-M/2         !Selecionando nós do eixo y
d,all,uy,0                !Aplicando força 0 (zero) em y
/com,
/com, Aplicação da Pressão no Lado Oposto ao Engastamento
nset,s,loc,x,M/2          !Selecionando nós
sf,all,pres,p            ! Aplicando pressão

```

```

/com,
nset,all
/com,
/com, Plotando Símbolos das Condições de Contorno Aplicadas
/dbc,u,,1          !Símbolo das forças em x e y (engastamento)
/dbc,volt,,1       !Eletrodos
/dbc,amps,,1       !Corrente aplicada
/dbc,cp,,1
/pnum,type,1
/number,1
epplot
/com,
fini
/com,
/com, Aplicando Solução
/solu              ! Escolhendo modo solução
antype,static      ! Tipo de análise
cnvtol,amps,1,1.e-3 ! Opcional para prevenir mensagens de avisos
solve              ! Solucionado...
fini
/com,
/com, Apresentação dos Resultados
! Estes resultados serão apresentados na tela do Ansys. O parâmetro “abs” utilizado !abaixo
é usado para se fazer cálculos. Estes cálculos são feitos baseados nas variáveis !definidas
no programa.
/post1
/com, Resultados:
/com,
/com, Corrente de Polarização:
/com, Is = %abs(Is)%, pA
/com,
/com, Tensão de Saída: Ansys e Analítica
/com, Vout (ANSYS) = %abs(volt(nt)-volt(nb))*1e3%, mV
/com, Vout (Analitical) = %abs(((4*p44/2)*p*rho*Is)*1e3)%, mV
/com,
/com, Fator de Correção Geométrico
/com, G (Ansys) = %abs(((volt(nt)-volt(nb))*1e3)/(((4*p44/2)*p*rho*Is)*1e3)))%
/com,
fini

```

Apêndice C

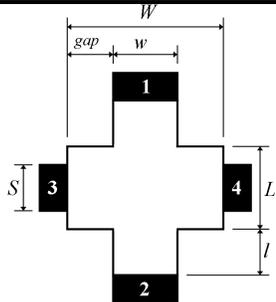
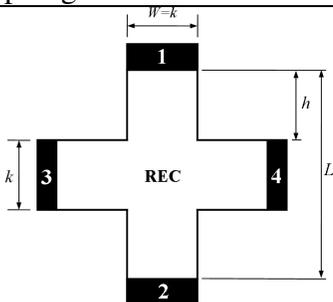
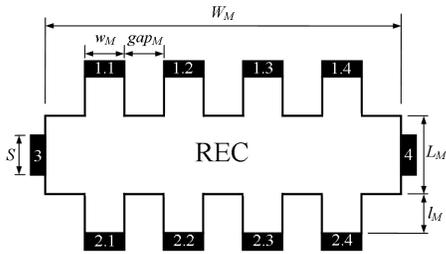
Processo de Fabricação

Neste apêndice apresentamos o projeto das máscaras, todas as etapas de processo envolvidas na fabricação, os resultados finais da fabricação (*layout* dos piezoelementos e seu alinhamento na membrana) e as características elétricas dos piezoelementos fabricados no CCS/Unicamp.

1 – Projeto das Máscaras do sensor de pressão no CCS/Unicamp

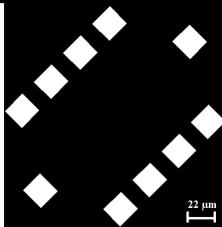
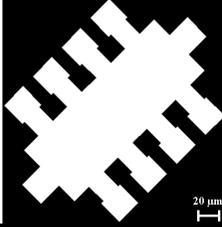
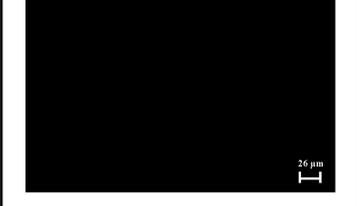
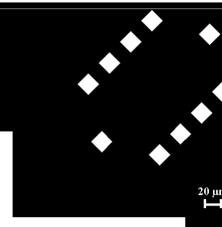
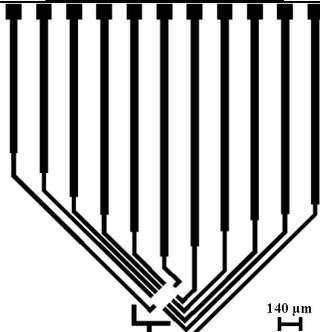
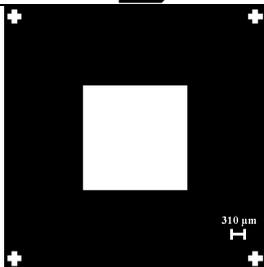
O primeiro passo para a fabricação dos sensores é o projeto e confecção das máscaras a serem usadas. O projeto das máscaras é baseado em parâmetros de processo e no adequado dimensionamento dos piezoelementos de acordo com o seu estudo analítico. Foram escolhidos 3 diferentes tipos de piezoelementos: o piezoelemento de 4 terminais modificado, o piezoelemento em forma de cruz grega e o piezoelemento de multiterminais (com 4 terminais de contatos-corrente de entrada), sendo que, para este último, projetamos 2 piezoelementos com dimensões diferentes. Cada um destes 4 piezoelementos foram projetados para serem fabricados um em cada lado da membrana quadrada. A Tabela C1 apresenta estes piezoelementos e suas dimensões.

Tabela C1 – Dimensões e topologias escolhidas dos piezoelementos para fabricação do sensor no CCS/Unicamp.

Topologias	$L/W ; L_M/W_M$	$l/S ; h/k ; l_M/w_M$ <i>gap</i>	$S/W ; S/W_M$
 <p>Topologia 1: FTSP Modificado</p>	$L = 30 \mu\text{m}$ $W = 60 \mu\text{m}$ $L/W = 0,5$	$l = 30 \mu\text{m}$ $w = 20 \mu\text{m}$ $l/w = 1,5$ $gap = 20 \mu\text{m}$	$S = 20 \mu\text{m}$ $S/W \approx 0,33$
 <p>Topologia 2: Cruz Grega</p>	$L = 2h + k$ $L = 80 \mu\text{m}$ $W = 20 \mu\text{m}$ $L/W = 4$	$h = 30 \mu\text{m}$ $k = 20 \mu\text{m}$ $h/k = 1,5$	-
 <p>Topologias 3a e 3b: 4-MTPS Menor e Maior, respectivamente.</p>	$L_M = 20 \mu\text{m}$ $W_M = 180 \mu\text{m}$ $L_M/W_M = 0,11$ $L_M = 90 \mu\text{m}$ $W_M = 180 \mu\text{m}$ $L_M/W_M = 0,5$	$l_M = 20 \mu\text{m}$ $w_M = 20 \mu\text{m}$ $l_M/w_M = 1$ $gap_M = 20 \mu\text{m}$ $l_M = 20 \mu\text{m}$ $w_M = 20 \mu\text{m}$ $l_M/w_M = 1$ $gap_M = 20 \mu\text{m}$	$S = 20 \mu\text{m}$ $S/W \approx 0,11$ $S = 20 \mu\text{m}$ $S/W \approx 0,11$

Após a definição dos piezoelementos, projetamos nossos níveis de máscaras. A Tabela C2 apresenta todos os níveis de máscaras, considerando como exemplo um piezoelemento de multitermianis.

Tabela C2 – Níveis de máscaras usadas para fabricação do sensor de pressão no CCS/Unicamp.

<u>Seqüência das Máscaras</u>	
	<p><u>Primeiro Nível de Máscara (N1):</u></p> <p>Implantação “P+”</p> <p>Região de Contato Ôhmico Tipo: Campo Escuro</p>
	<p><u>Segundo Nível de Máscara (N2):</u></p> <p>Implantação “P”</p> <p>Região Ativa do Piezoelemento Tipo: Campo Escuro</p>
	<p><u>Terceiro Nível de Máscara (N3):</u></p> <p>Implantação “N+”</p> <p>Anel de Guarda Tipo: Campo Escuro</p>
	<p><u>Quarto Nível de Máscara (N4):</u></p> <p>Abertura das Regiões de Contatos para Deposição de Alumínio</p> <p>Tipo: Campo Escuro</p>
	<p><u>Quinto Nível de Máscara (N5):</u></p> <p>Deposição de Alumínio nas regiões de contato, de trilhas e de <i>pads</i>.</p> <p>Tipo: Campo Claro</p>
	<p><u>Sexto Nível de Máscara (N6):</u></p> <p>Máscara para Abertura da Região da Membrana no <i>back-side</i>.</p> <p>Tipo: Campo Escuro</p> <p>Cavidade de 2,36 mm x 2,36 mm</p>

A escolha da menor dimensão a ser utilizada nos níveis de máscaras foi definida por um parâmetro de projeto. Havia 2 tipos de equipamentos, disponíveis no CCS/Unicamp, para confecção das máscaras: a fotorredutora e a fotorrepetidora. A diferença entre as duas deve-se basicamente as suas resoluções e ao tamanho do campo de projeção. A fotorredutora permite a confecção de máscaras de 4'' × 4'' (101,6 mm × 101,6 mm), 2,5'' × 2,5'' (63,5 mm × 63,5 mm) ou 2'' × 2'' (50,8 mm × 50,8 mm) e espessura de 1,6 mm reduzindo dez ou vinte vezes a imagem negativa de um fotolito para a máscara. O campo útil da máscara fotorreduzida é de 85 mm × 42 mm (redução 10x) e linhas de 20 μm são obtidas com erro máximo de ± 2 μm [C1]. Já a fotorrepetidora permite a redução e repetição de imagem, gerando máscaras de emulsão fotográfica de 2,5'' × 2,5'' (63,5 mm × 63,5 mm) e espessura de 1,6 mm. O campo máximo por *chip* é de 4 mm x 4 mm e as menores linhas obtidas são de 5 μm com erro de ± 1 μm [C2]. A Figura C1 exemplifica a resolução de cada equipamento.

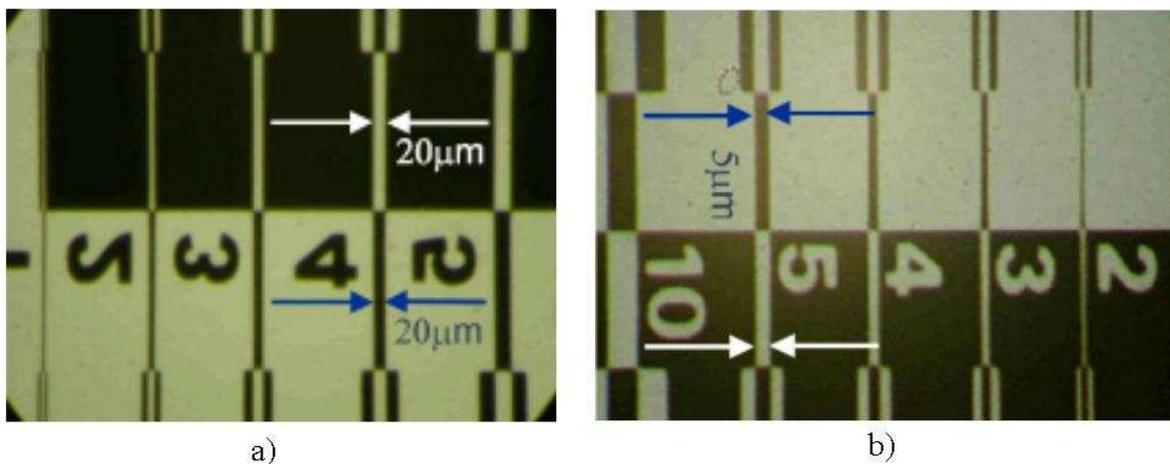
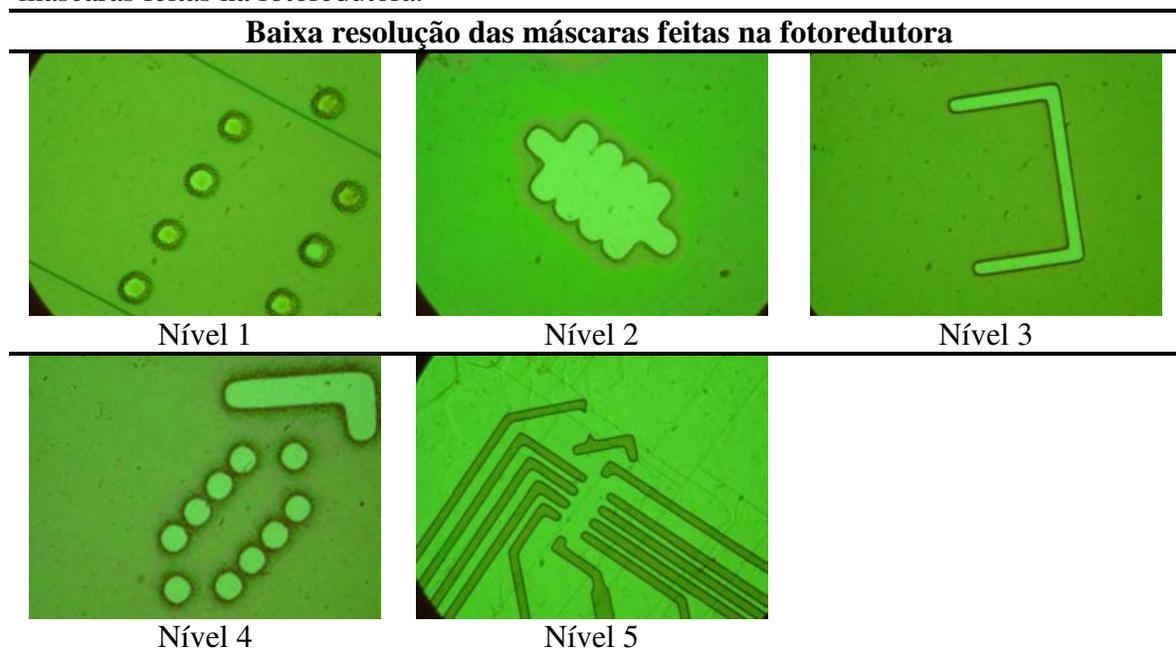


Figura C1 – Resolução para as máscaras: a) Na fotorredutora e b) Na fotorrepetidora.

Embora a fotorrepetidora possua uma resolução maior do que a fotorredutora, o que nos possibilitaria a fabricação de piezoelementos menores, o campo de projeto é limitado a um *chip* de 4 mm x 4 mm. No caso da fotorredutora, este campo de projeto é muito maior, possibilitando o projeto de *chips* maiores e em maior quantidade. Como, em um primeiro momento, pretendíamos fabricar sensores em *chips* de 6 mm x 6 mm, optamos por fabricar as máscaras usando a fotorredutora. Desta maneira, 20 μm foi a dimensão mínima utilizada nos níveis de máscaras apresentados na Tabela C2. Contudo, após confecção e testes destas

máscaras, os resultados foram insatisfatórios. A Tabela C3 apresenta fotos retiradas dos testes.

Tabela C3 – Deformação das regiões do piezorresistor devido à baixa resolução das máscaras feitas na fotoredutora.



Em uma primeira tentativa, todos os níveis de máscaras, que foram projetadas com dimensões mínimas de 20 μm , apresentaram deformações. Vários testes foram feitos deixando as amostras ora em um tempo mais longo ora em um tempo mais curto de revelação. Em tempos mais longos, as estruturas eram reveladas por demais, curto-circuitando ou aproximando os terminais dos piezoelementos, conforme Nível 2 e 4. Já em tempos de revelação mais curtos, as estruturas não eram reveladas ou eram reveladas não uniformemente, conforme Nível 1. Então, optamos por usar as mesmas estruturas já projetadas para a fotoredutora na fotorrepetidora. Com uma resolução maior, obtivemos resultados bem definidos para as estruturas feitas na fotorrepetidora. Desta maneira, os sensores foram fabricados em *chips* de 4 mm x 4 mm. Este *chip* foi repetido de forma a se obter 25 *chips* (matriz 5 x 5) em uma única máscara, conforme Figura C2.

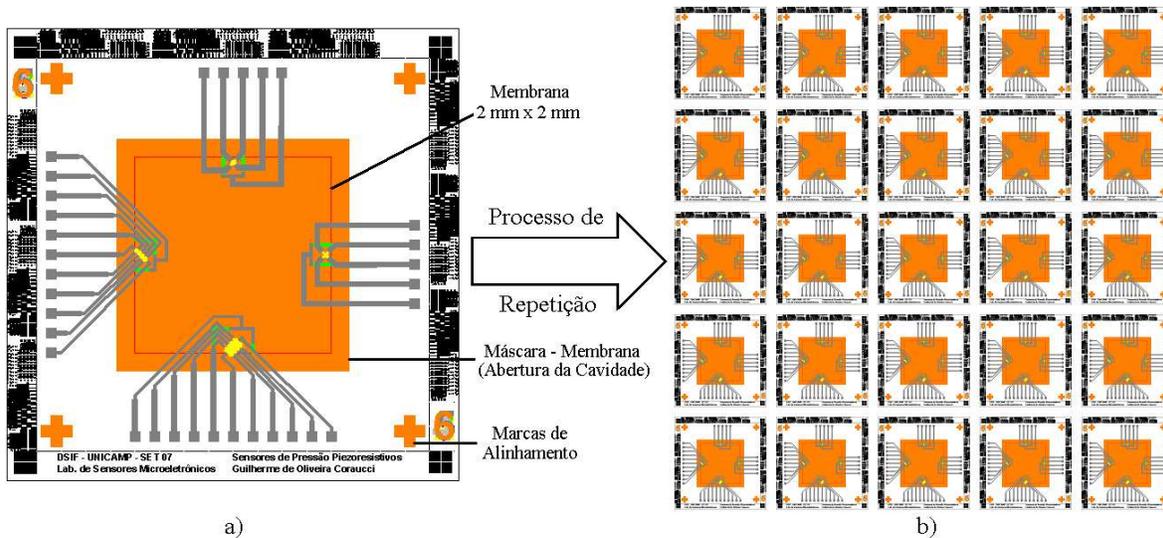


Figura C2 – Projeto das máscaras para o processo de fabricação do sensor de pressão no CCS/Unicamp: a) Projeto de um *chip* com todos os 6 níveis de máscara e b) Construção de máscaras com 25 *chips* (matriz 5 x 5) utilizando o processo de repetição.

Conforme pode ser notado, são formados espaços entre os *chips* devido aos passos necessários para sua repetição. Estes espaços são úteis quando se faz os alinhamentos das máscaras do nível 1 a 5 devido a facilidade de se orientar no microscópio. No entanto, eles são inconvenientes para o nível 6 (máscara da membrana) já que estes próprios espaços formam regiões a serem corroídas no processo de microfabricação da membrana, uma vez que a máscara de nível 6 é do tipo campo escuro, ou seja, a região da membrana é clara, como os espaços. Para a solução deste problema, a máscara original foi refeita regravando-a de forma a eliminar os espaços (máscara ficou totalmente escura, apenas com a região da cavidade clara para este nível). Outra observação é quanto ao erro inerente ao processo. Como já mencionado, a fotorrepetidora pode ter um erro de até $\pm 1 \mu\text{m}$. Este erro deve ser levado em consideração no projeto das máscaras para evitar a sobreposição das bordas da região ativa do piezoelemento e a região de contato ôhmico. Outros fatores que contribuem para a sobreposição são erros de alinhamento e uma abertura excessiva destas regiões após corrosão do óxido de silício e, portanto, também devem ser levados em consideração. Desta forma, optamos por dimensionar a distância entre a região de abertura de contatos, de contato p+ e da região ativa, conforme mostrado na Figura C3.

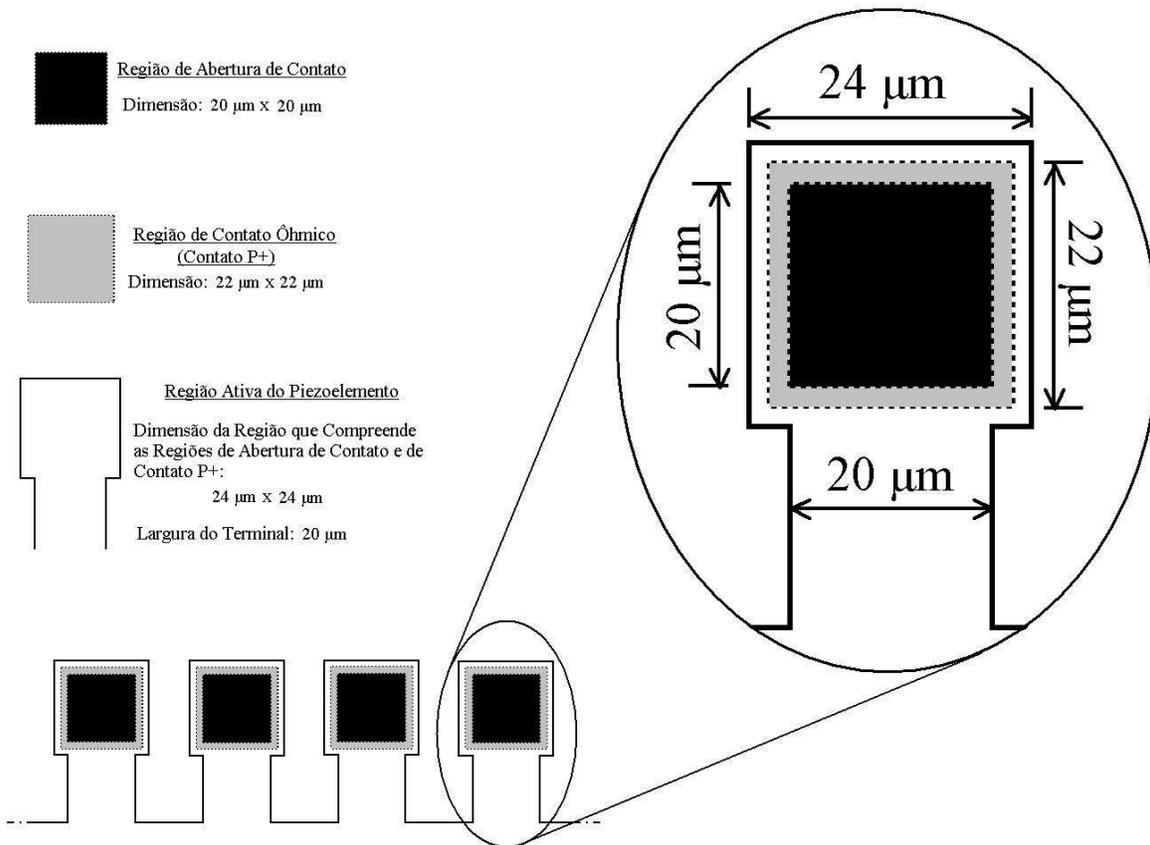


Figura C3 – Dimensões entre a região ativa e de contato do piezoelemento.

No detalhe, são mostradas 3 regiões que correspondem à 3 níveis de máscara (Nível 4, 1 e 2 na Tabela C2, respectivamente).

2 – Processo de Fabricação do sensor de pressão no CCS/Unicamp

A seguir, apresentamos as etapas de fabricação do sensor de pressão e também as medidas realizadas para acompanhamento do processo.

2.1 – Características das lâminas de silício escolhidas para a fabricação

Neste processo de fabricação utilizamos lâminas (100) do tipo-n com resistividade de 4 Ohm cm. A espessura de cada lâmina e sua finalidade está mostrada na Tabela C4.

Tabela C4 – Características das lâminas de silício utilizadas no processo de fabricação do sensor de pressão no CCS/Unicamp.

Nome das Amostras	Descrição
A1	Cacos (para Medida da Resistividade)
	Espessura Média: 374 μm
A2	Lâmina do Processo
	Espessura Média: 393 μm
A3	Lâmina do Processo
	Espessura Média: 418 μm
A4	Lâmina de 3'' tipo-n para caracterização da taxa de corrosão do silício em KOH e teste do filme de oxinitreto
	Espessura Média: 358 μm

2.2 – Etapas do processo de Fabricação do Sensor de Pressão Piezorresistivo

2.2.1 - Limpeza Padrão RCA

Data: 28/11/07

Amostras: A1, A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Amostras:

Procedimento:

- I. $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) em 80°C por 10 min;
- II. $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (1:1:5) em 80°C por 10 min;
- III. Dip (Remoção do óxido);
- IV. Lavagem da lâmina com água DI (18 M Ω) por 3 min;
- V. Secagem com N_2 .



Figura C4 – 1ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Limpeza do substrato.

2.2.2 – Oxidação Úmida

Data: 28/11/07

Amostras: A1, A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não
Amostras:

Procedimento:

Tabela C5 – Processo de Oxidação Úmida	
Forno de oxidação, $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	
<i>Ambiente</i>	<i>Tempo (min)</i>
N ₂	> 3
N ₂	30
O ₂	10
O ₂ + H ₂ O (oxidação úmida)	180 (\approx 63 gotas/min)
N ₂	10
N ₂	> 3

Espessura do Óxido (esperado: 0,8 μm):
A1 (0,754 μm), A2 (0,775 μm) e A3 (0,776 μm)

Observações: As lâminas, antes de serem colocadas e retiradas do interior do forno, elas permanecem um tempo na entrada do forno onde indicamos pelo tempo “> 3” na Tabela C5. As medidas da espessura do óxido foram feitas através do elipsômetro. Os índices de refração do substrato (n_s) e do filme (n_f) devem ser escolhidos adequadamente. Como neste caso, $n_f = 1,46$ e $n_s = 3,4$, escolhemos a opção $n_f < n_s$ no equipamento.



Figura C5 – 2ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Oxidação Úmida.

2.2.3 – Fotogravação para Abertura das Regiões de Contato P+

Data: 29/11/07

Nível de Máscara: N1 (Nível 1)

Amostras: A1, A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Fotorresiste: AZ 1518	
Umidade Relativa (sala): 50%	Temperatura (sala): 24 °C
RPM do Spinner: 6000	Tempo: 30 segundos

Pre-Bake – Hot Plate / Estufa

Temperatura: 90 °C Tempo: 1 minuto

Tipo de Exposição: Ultravioleta (UV) Tempo de Exposição: 20 segundos

Solução Reveladora: MIF 300 Puro Tempo de Revelação: 18 segundos

Cura do Fotorresiste (Pós-Bake)? Sim Não

Hot Palte ou Estufa

Temperatura: 120 °C / Tempo: 5 minutos

Observações: Antes da aplicação do fotorresiste, fizemos uma limpeza das lâminas com álcool isopropílico para remoção da umidade e melhor aderência do fotorresiste. Após o uso da solução MIF, as lâminas devem ser imersas em água deionizada (DI) para sua neutralização. Após o pós-bake, não há necessidade de se fazer a limpeza das lâminas, pois o fotorresiste pode ser removido. Se resíduos de fotorresiste ainda está sobre as lâminas, deve-se usar o barril ou plasma de oxigênio para sua remoção. O pós-bake da A3 foi feito durante 15 minutos.



Figura C6 – 3ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogravação do 1º nível de máscara (região de contatos p+ dos piezoelementos).

2.2.4 – Etching do Óxido

Data: 30/11/07

Amostras: A1, A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - Sim Não

Procedimento:

Solução Tampão (*Buffer*): BHF (150 nm/min)

Temperatura: 25 °C Tempo: 5 minutos

Observações: A taxa de corrosão pode variar e, conseqüentemente, o tempo de corrosão. Portanto, a corrosão foi feita intermitentemente checando-a no microscópio.
Solução buffer de HF: HF + NH₄F + H₂O.



Figura C7 – 4ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão do óxido do 1º nível de máscara.

2.2.5 – Remoção do Fotorresiste (Limpeza Orgânica) Data: 30/11/07

Amostras: A1, A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Acetona Fria - (X) Sim () Não

Temperatura: 25 °C / Tempo: 10 minutos

Acetona Quente - (X) Sim () Não

Temperatura: 50 °C / Tempo: 10 minutos

Isopropanol Quente - (X) Sim () Não

Temperatura: 80 °C / Tempo: 10 minutos

H₂O DI - () Sim (X) Não

Observações: Após remoção do fotorresiste, notamos que a corrosão da lâmina A1 não foi adequada, havendo excesso de abertura. Desta forma, a lâmina A1 passou a ser a lâmina de testes (cacos). Lembrar que se cacos serão usados como lâminas de testes, estes devem ser limpos em limpeza padrão RCA (seção 2.2.1).

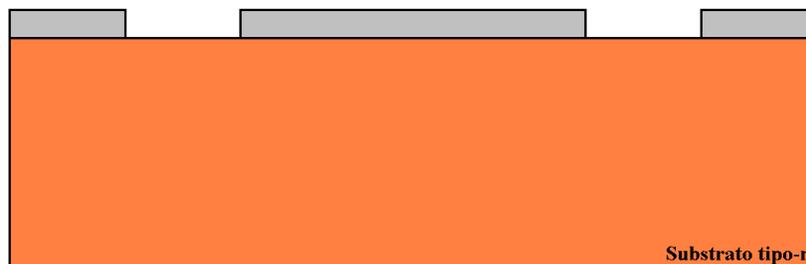


Figura C8 – 5ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 1º nível de máscara.

.2.2.6 – Limpeza RCA

Data: 05/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento: () Sim (X) Não

Observações: Idem a seção 2.2.1.

2.2.7 – Implantação Iônica – Região de contatos (P+)

Data: 14/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Dopante: $^{11}\text{B}^+$

Energia: 50 KeV

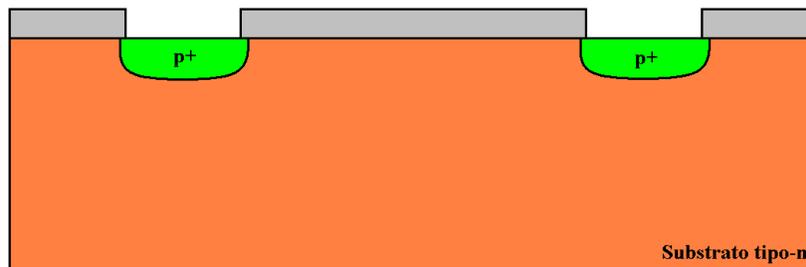
Dose: $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ Ângulo de Inclinação da Amostra: 7° 

Figura C9 – 6ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Implantação da região p+.

2.2.8 – Limpeza RCA

Data: 14/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento: () Sim (X) Não

Observações: Idem a seção 2.2.1.

2.2.9 – Fotogravação: Abertura das Regiões Ativa (tipo P)

Data: 17/12/07

Nível de Máscara: N2 (Nível 2)

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Fotorresiste: AZ 1518

Umidade Relativa (sala): 57%	Temperatura (sala): 22 °C
RPM do Spinner: 6000	Tempo: 30 segundos

Pré-Bake – (X) Hot Plate / () Estufa

Temperatura: 90 °C / Tempo: 1 minuto
 Tipo de Exposição: UV / Tempo de Exposição: 20 segundos
 Solução Reveladora: MIF 300 Puro/Tempo de Revelação: A3 (20s),A2 (23s)

Cura do Fotorresiste (Pós-Bake)? Sim Não

Hot Plate ou Estufa

Temperatura: 120 °C / Tempo: 15 minutos

Observações: Este processo é o mesmo feito no passo 3.



Figura C10 – 7ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotograbagem do 2º nível de máscara (região ativa dos piezoelementos).

2.2.10 – Etching do Óxido

Data: 17/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - Sim Não

Procedimento:

Solução Tampão (*Buffer*): BHF

Temperatura: 25 °C Tempo: 6 minutos e 15 segundos

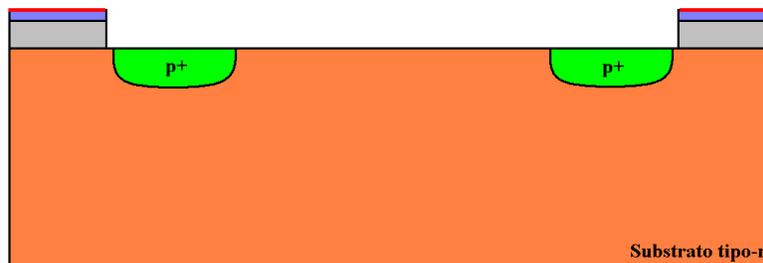


Figura C11 – 8ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão do óxido do 2º nível de máscara.

2.2.11 – Remoção do Fotorresiste

Data: 17/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - Sim Não

Observações: Idem a seção 2.2.5.

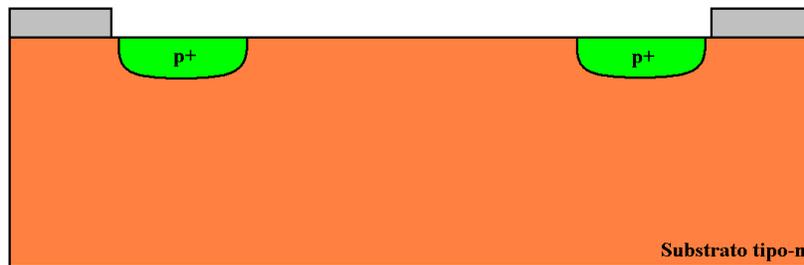


Figura C12 – 9ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresistivo do 2º nível de máscara.

2.2.12 – Limpeza RCA

Data: 17/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: A1

Observações: Idem a seção 2.2.1. Como o próximo passo do processo é a implantação da região ativa dos piezoelementos e necessitamos saber sua resistência de folha, usamos uma amostra de acompanhamento (A1) na implantação iônica para posterior medida de sua resistividade (medida V/I de 4 pontas). Portanto, também limpamos esta lâmina de acompanhamento antes da implantação iônica. Para isso, clivamos a lâmina A1 para obtermos 1 caco de acompanhamento.

2.2.13 – Implantação Iônica – Região Ativa (tipo P)

Data: 21/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: Caco de A1

Procedimento:

Dopante: $^{11}\text{B}^+$

Energia: 120 KeV

Dose: $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

Ângulo de Inclinação da Amostra: 7°



Figura C13 – 10ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Implantação da região ativa dos piezoelementos (região p).

2.2.14 – Limpeza RCA

Data: 23/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: Caco de A1

Observações: Idem a seção 2.2.1. Para medição quatro pontas do caco de acompanhamento foi necessária fazer a ativação dos seus dopantes e, portanto, fizemos a limpeza também do caco.

2.2.15 – Recozimento (Ativação dos Dopantes) e Oxidação Úmida

Data: 23/12/07

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento: (X) Sim () Não

Amostras: Caco de A1

Procedimento:

Tabela C6 – Processo de Recozimento e Oxidação Úmida

Forno de oxidação, $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	
<i>Ambiente</i>	<i>Tempo (min)</i>
N_2	> 3
N_2	30
O_2	10
$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	100 (≈ 33 gotas/min)
O_2	10
N_2	10
N_2	> 3

Observações: Como altas temperaturas afetam o perfil de implantação dos dopantes, o caco destinado a medição da resistência de folha deve ser colocado em toda etapa que envolve altas temperaturas. O caco da amostra A1 foi então colocado nesta etapa.



Figura C14 – 11ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Ativação dos dopantes e oxidação úmida.

2.2.16 – Limpeza Orgânica

Data: 31/01/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento: () Sim (X) Não

Observação: Idem a etapa de remoção do fotorresiste (seção 2.2.5).

2.2.17 – Fotogravação: Abertura da Região de Contato N+

Data: 31/01/08

Nível de Máscara: N3 (Nível 3)

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Fotorresiste: AZ 1518

Umidade Relativa (sala): 60,5%	Temperatura (sala): 24 °C
RPM do Spinner: 6000	Tempo: 30 segundos

Pre-Bake – (X) Hot Plate / () Estufa

Temperatura: 90 °C

Tempo: 1 minuto

Tipo de Exposição: UV

Tempo de Exposição: 21 segundos

Solução Reveladora: MIF 300 Puro

Tempo de Revelação: 18 segundos

Cura do Fotorresiste (Pós-Bake)? (X) Sim () Não

Hot Plate (X) ou Estufa ()

Temperatura: 120 °C

Tempo: 15 minutos



Figura C15 – 12ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogravação do 3º nível de máscara.

2.2.18 – Etching do Óxido

Data: 31/01/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Solução Tampão (*Buffer*): BHF

Temperatura: 25 °C

Tempo: variou

Observações: Idem a seção 2.2.4. A amostra A2 foi corroída durante 10 minutos e 10 segundos enquanto a amostra A3 foi corroída durante 9 minutos e 58 segundos.



Figura C16 – 13ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão do óxido do 3º nível de máscara.

2.2.19 – Remoção do Fotorresiste

Data: 31/01/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Observação: Idem a seção 2.2.5.



Figura C17 – 14ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 3º nível de máscara.

2.2.20 – Limpeza RCA

Data: 31/01/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Observações: Idem ao passo 2.2.1.

2.2.21 – Implantação Iônica – Região N+

Data: 31/01/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Dopante: $^{31}\text{P}^+$

Energia: 80 KeV

Dose: $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Ângulo de Inclinação da Amostra: 7°



Figura C18 – 15ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Implantação do anel de guarda (região n+) dos piezoelementos.

2.2.22 – Limpeza RCA

Data: 01/02/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Observações: Idem a seção 2.2.1.

2.2.23 - Recozimento (Ativação dos Dopantes) e Oxidação Seca

Data: 01/02/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento: () Sim (X) Não

Procedimento:

Tabela C7 – Processo de Recozimento e Oxidação Seca

Forno de oxidação, $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	
<i>Ambiente</i>	<i>Tempo (min)</i>
N ₂	> 3
N ₂	5
O ₂	5
O ₂	30
O ₂	5
N ₂	30
N ₂	> 3



Figura C19 – 16ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Ativação dos dopantes e oxidação seca.

2.2.24 – Limpeza Orgânica

Data: 12/02/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento: () Sim (X) Não

Observação: Idem a seção 2.2.5.

2.2.25 – Fotogravação: Abertura da Região das Vias dos Contatos P+ e N+

Data: 12/02/08

Nível de Máscara: N4 (Nível 4)

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Fotorresiste: AZ 1518

Umidade Relativa (sala): 62 %	Temperatura (sala): 24 °C
RPM do Spinner: 6000	Tempo: 30 segundos

Pré-Bake – (X) Hot Plate / () Estufa

Temperatura: 90 °C Tempo: 1 minuto

Tipo de Exposição: UV Tempo de Exposição: 21 segundos

Solução Reveladora: MIF 300 Puro Tempo de Revelação: 20 segundos

Cura do Fotorresiste (Pós-Bake)? (X) Sim () Não

Hot Plate (X) ou Estufa ()

Temperatura: 120 °C Tempo: 15 minutos

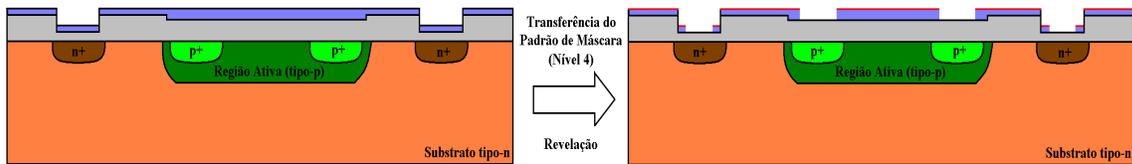


Figura C20 – 17ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotografação do 4º nível de máscara (abertura das regiões de contato).

2.2.26 – Etching do Óxido

Data: 12/02/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Solução Tampão (*Buffer*): BHF

Temperatura: 30 °C

Tempo: 9 minutos

Observações: Idem a seção 2.2.4. Para microfabricação da membrana de silício no *back-side* da lâmina usando KOH utiliza-se filme de nitreto ou óxinitreto de silício (SiOxNy) como máscara. Nossos testes indicaram que estes filmes têm uma melhor aderência se depositados sobre um óxido de silício ao invés do substrato somente. Desta forma, neste passo do processo, antes de se fazer a corrosão, preservamos o óxido de silício crescido no *back-side* da lâmina usando cera de abelha. Isto foi feito colocando cera de abelha sólida sobre a lâmina e, em seguida, colocando a lâmina no *hot plate* a uma temperatura de aproximadamente 100 °C.

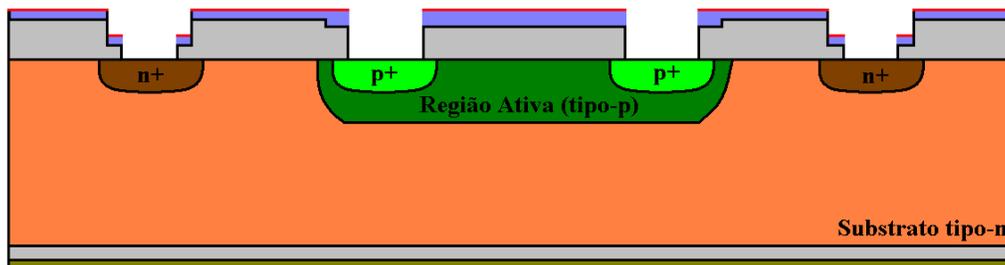


Figura C21 – 18ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão do óxido do 4º nível de máscara.

2.2.27 – Deposição de Nitreto de Silício

Data: 18/02/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Observações: O nitreto de silício feito no LPCVD disponível no CCS/Unicamp é depositado a temperatura de 750 °C . Já o oxinitreto disponível no LME/USP é depositado

a de 320 °C. A primeira opção somente pode ser feita antes da evaporação de alumínio na lâmina, desde que o ponto de fusão do alumínio é 660 °C. Já a segunda opção pode ser feita após metalização ter sido feita. Optamos, como um procedimento de teste, fazer a deposição do nitreto a 750 °C. Portanto, esta etapa do processo foi necessária agora, antes da deposição do alumínio. O nitreto deveria ser depositado apenas no *back-side* da lâmina. Entretanto, o nitreto acabou sendo depositado por toda a lâmina (*back e front side*). Desta maneira, foi necessária uma limpeza especial, denominada Corrosão do Nitreto de Silício no Ácido Fosfórico a 180 °C durante 30 minutos. Da mesma forma, não tínhamos uma maneira de isolar apenas um lado da lâmina e, então, removemos o nitreto de toda a lâmina. Por fim, optamos pelo filme de óxinitreto feito no LME/USP, conforme seção 2.2.36.

2.2.28 – Remoção do Fotorresiste

Data: 25/02/08

Amostras: A2 e A3.

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Observação: Idem a seção 2.2.5.



Figura C22 – 19ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 4º nível de máscara.

2.2.29 – Limpeza RCA

Data: 26/02/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento: () Sim (X) Não

Amostras:

Observação: Idem a seção 2.2.1.

2.2.30 – Evaporação de Alumínio

Data: 26/02/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Amostras:

Procedimento:

Pressão Base: 5×10^{-7} torr

Pressão Evaporação: 5×10^{-5} torr

Temperatura: _____ / Tempo: 3 minutos

Espessura: 1 um (esperado 1 um)

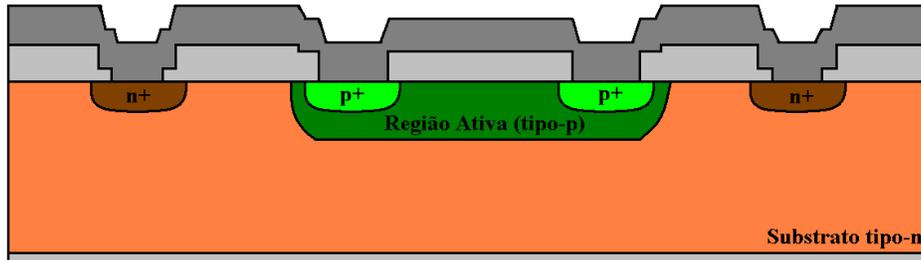


Figura C23 – 20ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Evaporação de alumínio.

2.2.31 - Fotogravação do Alumínio

Data: 28/03/08

Nível de Máscara: N5 (Nível 5)

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Fotorresiste: AZ 1518

Umidade Relativa (sala): 60 %

Temperatura (sala): 24 °C

RPM do Spinner: 6000

Tempo: 30 segundos

Bake - () Hot Plate / (X) Estufa (Forno)

Temperatura: 90 °C

Tempo: 1 minutos

Tipo de Exposição: UV

Tempo de Exposição: 20 segundos

Solução Reveladora: MIF 300 Puro

Tempo de Revelação: 18 segundos

Cura do Fotorresiste (Pós-Bake)? (X) Sim () Não

Hot Plate (X) ou Estufa ()

Temperatura: 120 °C

Tempo: 15 minutos

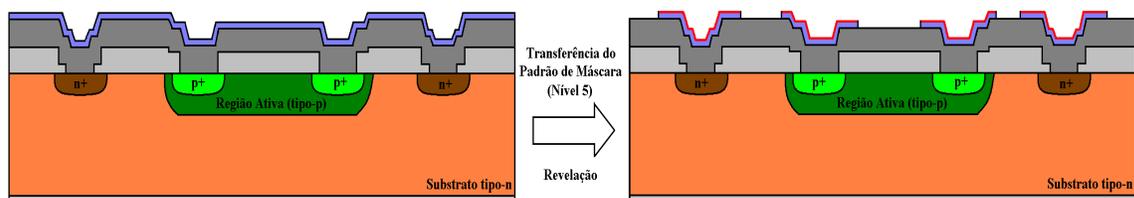


Figura C24 – 21ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogravação do 5º nível de máscara (formação das trilhas e dos pads).

2.2.32 - Remoção do Alumínio

Data: 28/03/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Solução: H_3PO_4 (95 ml) + HNO_3 (0,5 ml)

Temperatura: 50 °C

Tempo: 25 segundos

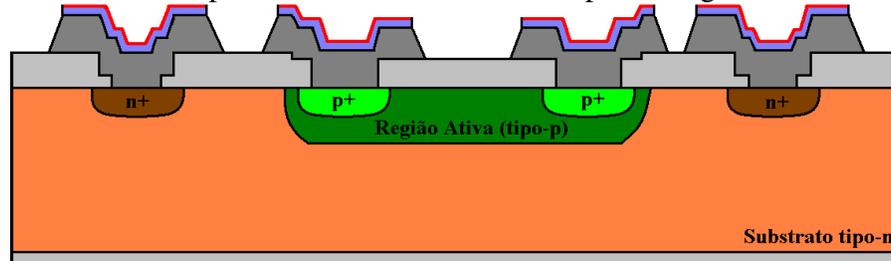


Figura C25 – 22ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do alumínio do 5º nível de máscara.

2.2.33 – Remoção do Fotorresiste

Data: 8/03/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Observação: Idem a seção 2.2.5.

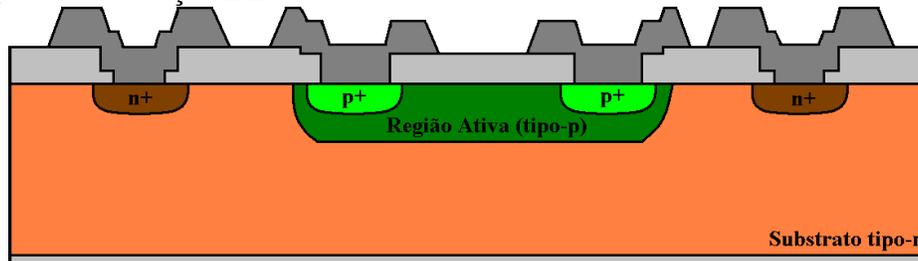


Figura C26 – 23ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do 5º nível de máscara.

2.2.34 – Limpeza Orgânica

Data: 07/04/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Observações: As amostras foram colocadas na solução em ebulição por 10 minutos. Este procedimento foi feito 2 vezes para garantir que todo o fotorresiste tivesse sido removido. Esta precaução é necessária uma vez que no próximo procedimento, sinterização do alumínio, as amostras são colocadas a altas temperaturas, o que ocasionaria a carbonização do fotorresiste. Resíduos de fotorresiste carbonizados são de difícil remoção.

2.2.35 – Sinterização do Alumínio: formação do contato Ôhmico

Data: 07/04/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - () Sim (X) Não

Procedimento:

Ambiente: N₂ (52%) + H₂ (8%)

Temperatura: 450 °C Tempo: 30 minutos

Observações: Após a sinterização do alumínio, notamos que as amostras apresentavam defeitos, tais como: descontinuidades e baixa aderência. Possivelmente estes defeitos foram ocasionados por partículas provenientes da câmara de evaporação quanto a possíveis resíduos de nitreto de silício que possa ter permanecido na amostra devido a sua deposição na seção 2.2.26. A amostra A2, em particular, apresentou um maior número de defeitos possibilitando apenas o aproveitamento de 5 *chips*. Desta maneira, para esta amostra, optamos por refazer todo o processo referente à evaporação de alumínio (seções de 2.2.29 ao 2.2.35). Porém, todo este processo foi feito sem a remoção do alumínio já contido na amostra, e a câmara evaporadora foi previamente limpa. Contudo, a amostra ainda apresentou os mesmos defeitos. Estes defeitos podem ser visualizados nas fotos apresentadas na Tabela C8.

2.2.36 – Deposição de Filme de Óxinitreto (SiOxNy)

Data: 13/05/2003

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: A4

Dados do Processo:

Configuração do Reator: Triodo (2 grades capacitivas de aproximadamente 200 mm de lado).

Pressão de Processo: 34 mTorr

Potência: 200 W

Pressão de Alto-Vácuo: $2,3 \times 10^{-5}$ Torr (pressão base)

Potência Refletida: 1 W

Fluxo de SiH₄: 30 sccmFluxo de N₂: 45 sccmFluxo de N₂O: 30 sccm

Temperatura: 293° (estabilizada)

Tempo de Deposição: 120 minutos

Taxa de Deposição: $\approx 175 \text{ \AA}/\text{min}$

Medida:

Espessura Média do Filme: 2,1 μm

Observações: A deposição deste filme é feita somente em um lado da lâmina. Junto às lâminas do processo de fabricação do sensor no CCS tentamos fixar *chips* do sensor fabricado na AMS. Estes *chips* têm uma dimensão de 4 mm x 4 mm. No entanto, o suporte das amostras foi projetado para fixar amostras de lâminas relativamente grandes, onde estas são presas por pequenas presilhas de alumínio com terminações pontiagudas (para se evitar “sombras” sobre a região de deposição) e um parafuso em seu centro para ajuste da fixação. Contudo, tentamos fixar os *chips* colocando-os entre duas presilhas e apertando os parafusos para pressionar suas bordas. No entanto, durante a deposição, devido ao fluxo de gases, estes *chips* se soltavam. Assim, a deposição foi então feita apenas nas lâminas.

A medida da espessura do filme de óxinitreto foi feita utilizando um elipsômetro. Esta medida foi feita após a fotogração do nível 6 de máscara (nível da membrana quadrada) e posterior corrosão do filme de oxinitreto e do óxido de silício. Para um resultado da espessura média do filme, escolhemos 6 regiões diferentes na lâmina, conforme Figura C27.

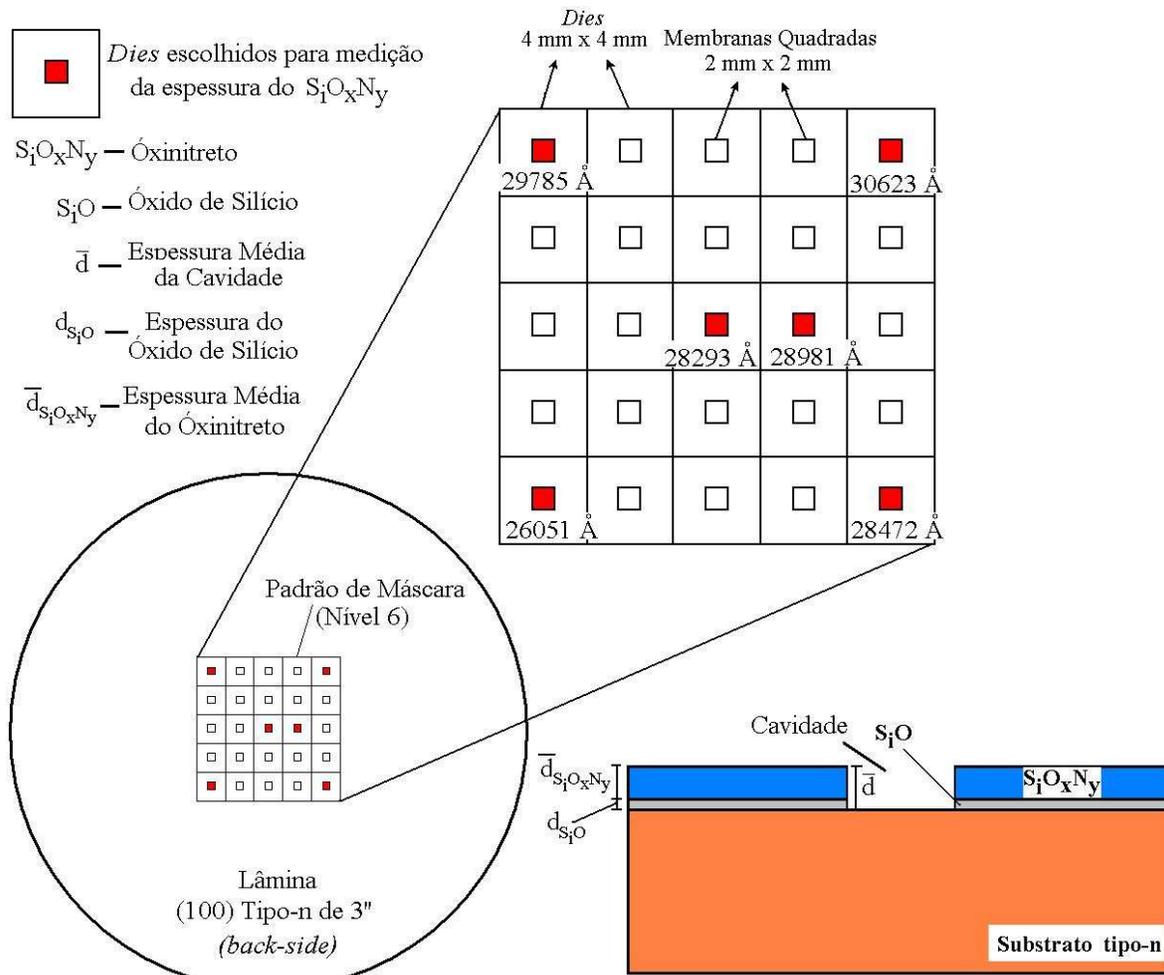


Figura C27 – Medição da espessura do filme de óxinitreto (SiO_xN_y).

A corrosão do filme de óxinitreto foi feita utilizando plasma. Uma vez que a corrosão por plasma é seletiva ao óxido de silício (SiO_2), corroemos o óxinitreto até atingir a camada de SiO_2 . Em seguida, corroemos este óxido em solução química de HF até a exposição do substrato formando, assim, uma cavidade na lâmina. Por fim, medimos a espessura desta cavidade para todos os *chips* selecionados (indicados por quadrados vermelhos na Figura C27). Os valores da espessura de cada cavidade selecionada estão mostrados na própria figura.

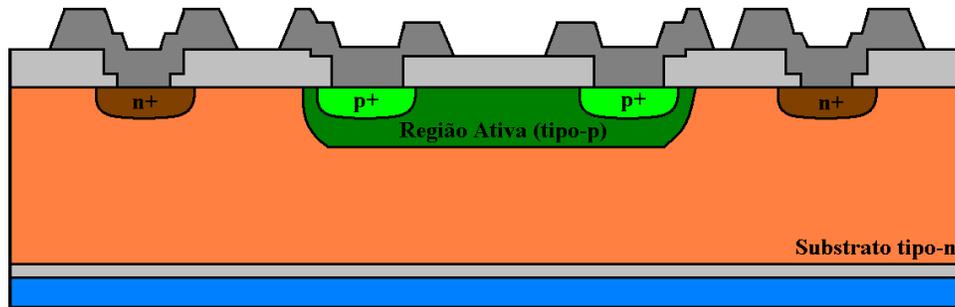


Figura C28 – 24ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Deposição do oxinitreto (SiOxNy).

2.2.37 – Fotogravação da Cavidade da Membrana
 Nível de Máscara: N6 (Nível 6)

Data: 15/07/08

Amostra: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - (x) Sim () Não

Amostras: A4

Procedimento:

Fotorresiste: AZ 1518

Umidade Relativa (sala): 62 %	Temperatura (sala): 24 °C
RPM do Spinner: 6000	Tempo: 30 segundos

Pré-Bake – (X) Hot Plate / () Estufa

Temperatura: 90 °C Tempo: 1 minuto

Tipo de Exposição: UV Tempo de Exposição: 21 segundos

Solução Reveladora: MIF 300 Puro Tempo de Revelação: 20 segundos

Cura do Fotorresiste (Pós-Bake)? (X) Sim () Não

Hot Plate (X) ou Estufa ()

Temperatura: 120 °C Tempo: 15 minutos

Observações: Este nível de máscara foi fotogravado alinhando-o com níveis de máscara do *front-side*. Como as tentativas em alinhar este nível usando fotoalinhadoras especiais, uma que usa um esquema de espelhos (Semikron) e outra que usa infravermelho (Aegis), não foi possível, desenvolvemos um método para alinhamento dupla-face usando uma fotoalinhadora comum. Este método consiste em duplicar o último nível de máscara aumentando os números de *chips* do padrão de máscara original de forma a obter *chips* em uma região maior que o tamanho da lâmina a ser fotogravada. Como usamos uma matriz 5 x 5 de *chips*, utilizamos a ultima coluna desta matriz para fazer o alinhamento de cada lado

do padrão original. A Figura C29 exemplifica a fabricação de uma nova máscara usada neste método.

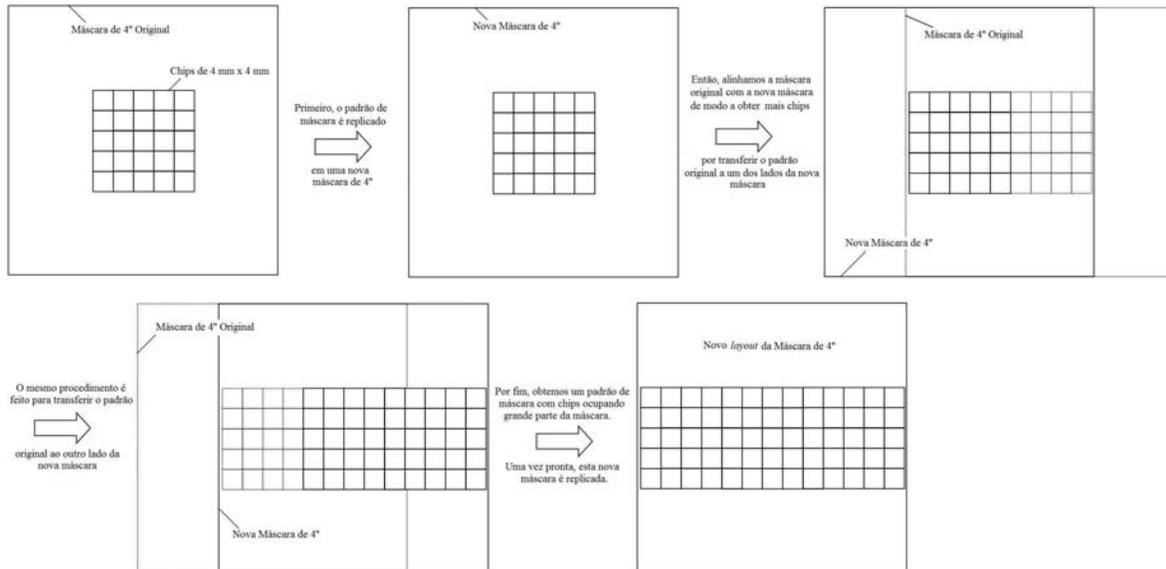


Figura C29 – Fabricação de uma nova máscara para alinhamento dupla-face.

O alinhamento dupla-face foi feito colocando-se a lâmina entre as duas novas máscaras e alinhando os *chips* através dos que estão fora da região da lâmina. Como estávamos usando uma lâmina de 3'', esta lâmina encobriria todos os *chips* que deveriam ser usados para alinhamento. Ainda, o campo de visão da fotoalinhadora era de somente 2,5''. Então, cortamos a lâmina em um quadrado com lados de aproximadamente 2'', conforme mostrado na Figura C30.

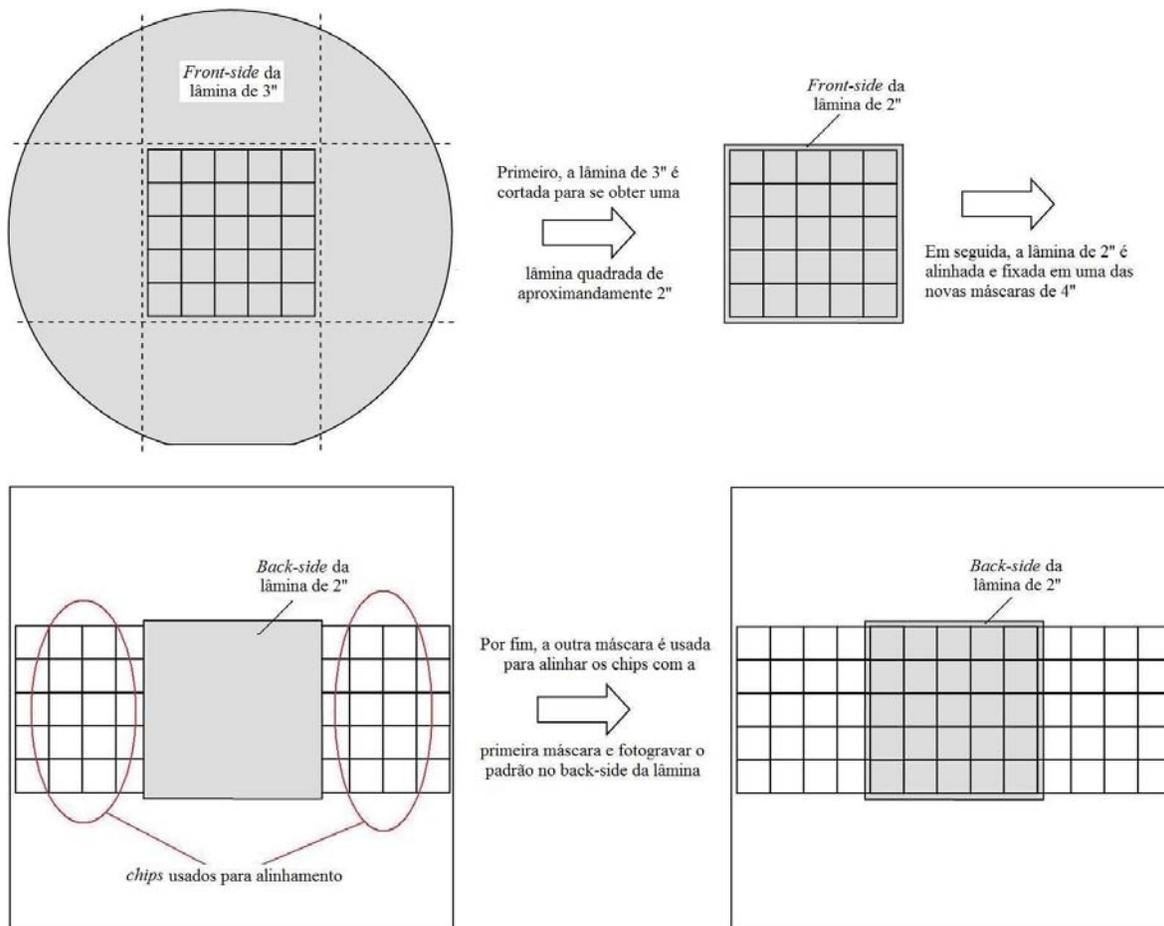


Figura C30 – Método de alinhamento dupla-face usando uma fotoalinhadora comum.

Na seqüência, alinhamos o *front-side* (eletrônica ativa) da lâmina de 2'' com uma das novas máscaras. Gotas de fotorresiste foram aplicadas nos cantos da lâmina de 2'' para fixação da lâmina na máscara após alinhamento. Então, fizemos o alinhamento da máscara com a lâmina e, em seguida, aproximamos a lâmina da máscara até que a lâmina encostasse suavemente na máscara. Uma vez em contato, a lâmina é automaticamente aderida na máscara pelo fotorresiste. Posteriormente, usamos a outra máscara para alinhamento do *back-side*. Na seqüência, alinhamos as duas máscaras através das aberturas que estão fora da região da lâmina de 2''.

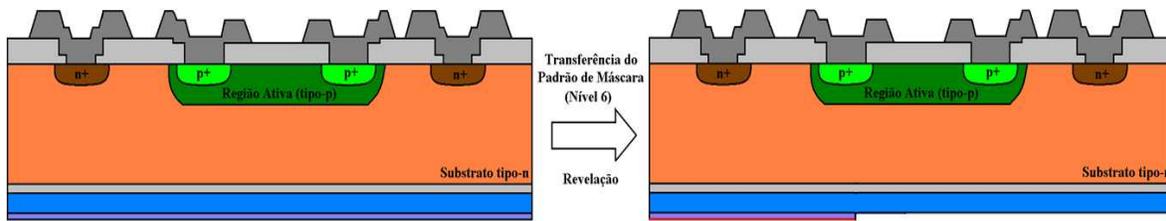


Figura C31 – 25ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Fotogravação do 6º nível de máscara (cavidade da membrana quadrada).

2.2.38 – Remoção do Oxinitreto e do Óxido de Silício Data: 15/07/2008

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - (x) Sim () Não

Amostras: A4

Procedimento:

Solução Tampão (*Buffer*): BHF

(X) HF e NH₄F

Temperatura: 25 °C

Tempo: 7 minutos

Observações: Aplicamos cera de abelha no *front-side* da lâmina para proteção da eletrônica ativa (a cera foi somente depositada nas lâminas A2 e A3). Em seguida, fizemos a corrosão do óxido de nitreto e do óxido de silício em buffer. Em seguida, inspecionamos a lâmina com o auxílio de um microscópio metalográfico para analisar as definições das geometrias, verificando suas medidas e se apresentam resíduos de óxido de nitreto.

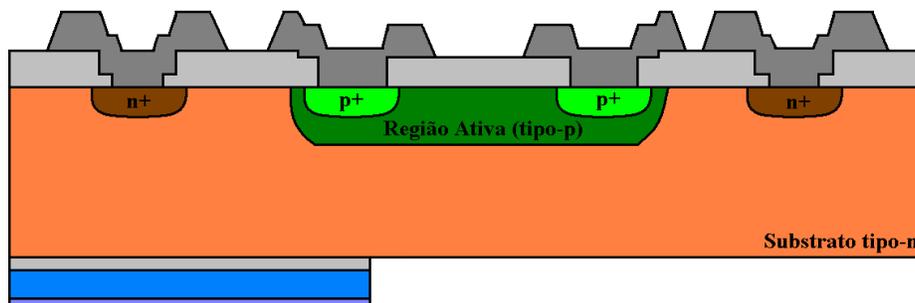


Figura C32 – 26ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do oxinitreto e do óxido de silício no *back-side*.

2.2.39 – Remoção Fotorresiste

Data: 15/07/08

Amostras: A2 e A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: A4

Observações: Idem a seção 2.2.5. Após remoção do fotoresiste, removemos a cera de abelha colocando as lâminas em um *hot plate* a temperatura de 110 °C. Após derretimento da cera, passamos papel toalha para sua remoção.

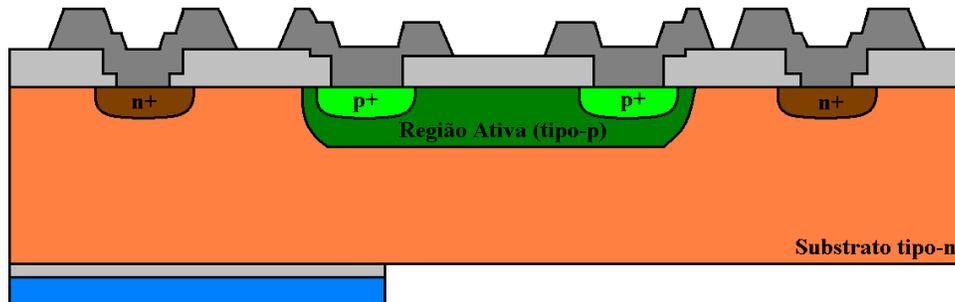


Figura C33 – 27ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Remoção do fotorresiste do nível 6.

2.2.40-) Deposição do Sylgard®

Data: 16/07/08

Amostras: A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: A4

Procedimento: Misturamos 5 gramas da resina Sylgard® e um catalisador na proporção de 1 parte do catalisador para 10 partes de base por peso. Em seguida, mexemos suavemente para evitar a introdução de ar em excesso. Antes de ser usada, a resina foi deixada em descanso por pelo menos 30 minutos (se houver introdução de ar, deve-se retirar as bolhas em um sistema a vácuo). Em seguida, despejamos cuidadosamente a resina sobre a lâmina em um recipiente para evitar a formação de bolhas. A cura foi então feita colocando o recipiente em uma estufa a uma temperatura de 100 °C por 30 minutos.

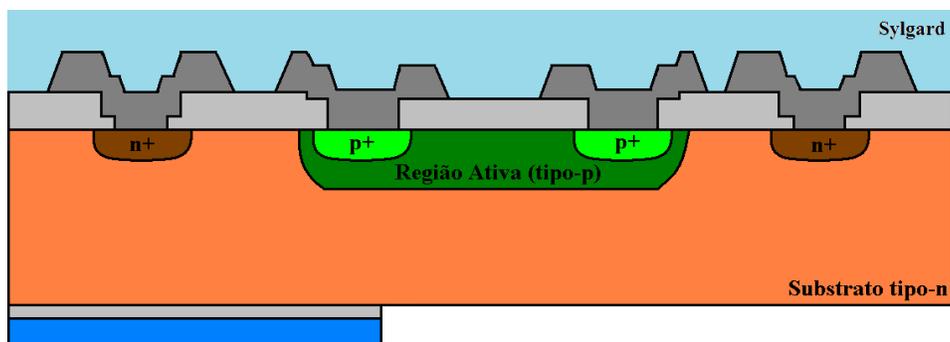


Figura C34 – 28ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Deposição da resina Sylgard®.

2.2.41 – Corrosão do Si em KOH

Data: 16/07/08

Amostras: A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: A4

Dados do Processo:

Rotação da amostra: parada

Sentido de Rotação: -

Temperatura do KOH: 90 °C

Tempo: 2 horas e 30 minutos

Espessura da Membrana: $\approx 20 \mu\text{m}$ (30 um esperado)Rugosidade (rms): $\approx 61 \text{ nm}$

Observações: Antes da corrosão da lâmina do sensor de pressão, usamos a lâmina de teste A4 para confirmação da taxa de corrosão e teste do filme de óxinitreto. Fixamos a lâmina de teste em um suporte de polipropileno e fizemos a corrosão em KOH 10 Molar por cerca de 2 horas e 45 minutos. Em seguida, medimos a profundidade do poço através de um micrômetro eletrônico. A taxa de corrosão foi então obtida dividindo-se a profundidade do poço pelo tempo de corrosão. Neste caso, a taxa foi de aproximadamente $1,8 \mu\text{m}/\text{min}$ e obtivemos um membrana de espessura de $10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ com uma largura de 1,8 mm a 2 mm. Contudo, testes posteriores mostraram que esta taxa é de $\approx 2,1 \mu\text{m}/\text{min}$.

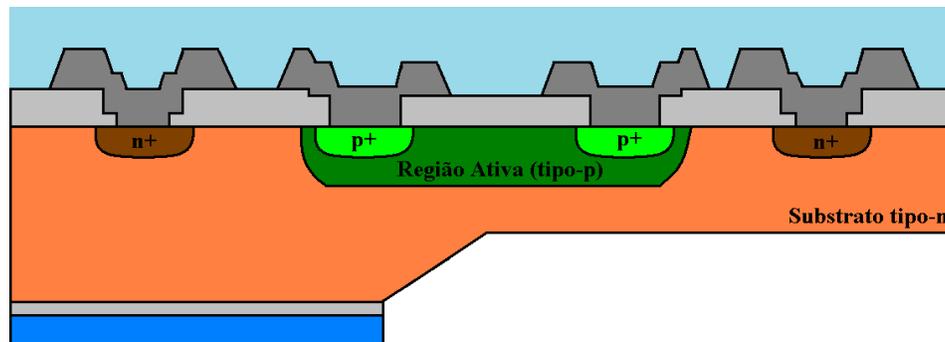


Figura C35 – 29ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Deposição da resina Sylgard®.

2.2.42 – Limpeza RCA

Data: 15/07/2008

Amostras: A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: A4

Observação: Idem a seção 2.2.1.

2.2.43 – Remoção do Sylgard®

Data: 16/07/08

Amostras: A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: A4

Procedimento: A remoção da resina Sylgard® foi feita aquecendo-se o Toluol até a ebulição e colocando-se a lâmina com a resina imersa na solução até que se desprendesse completamente da lâmina. Durante esta etapa alguns *chips* se quebraram.

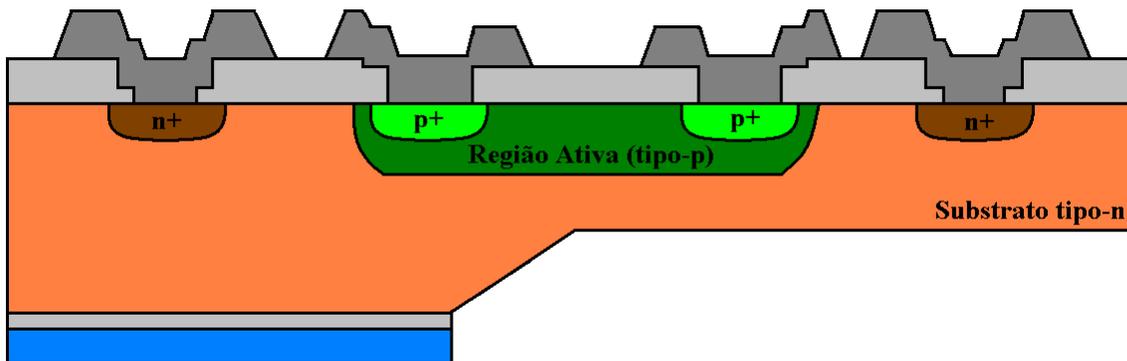


Figura C36 – 30ª Etapa do processo de fabricação do sensor no CCS/Unicamp: Corrosão úmida em KOH para formação da membrana quadrada.

2.2.44 – Limpeza Orgânica

Data: 16/07/08

Amostras: A3

Amostras de Acompanhamento - (X) Sim () Não

Amostras: A4

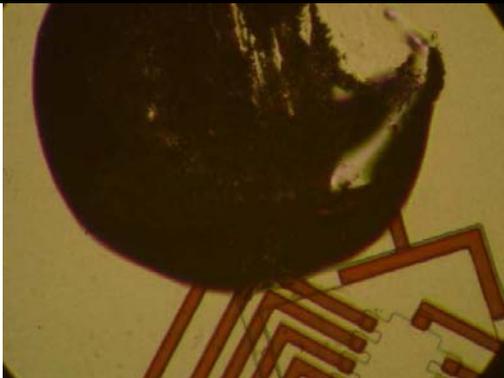
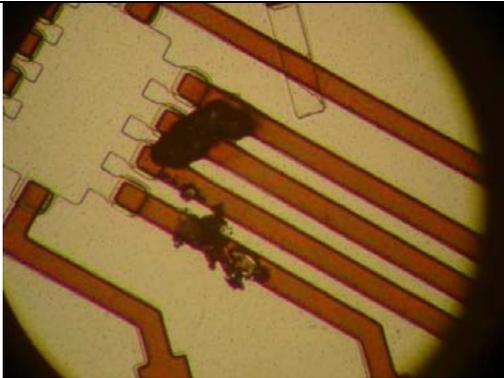
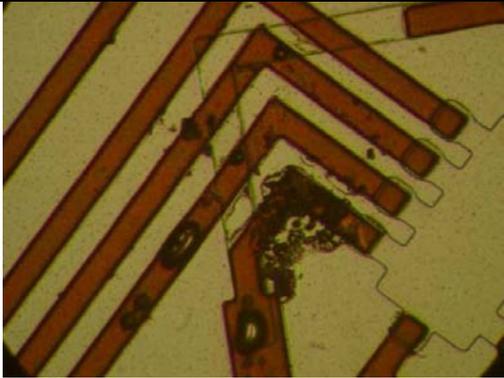
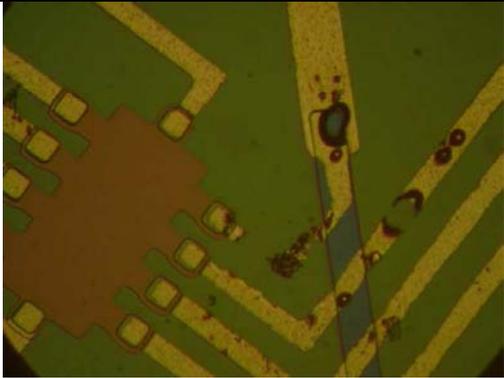
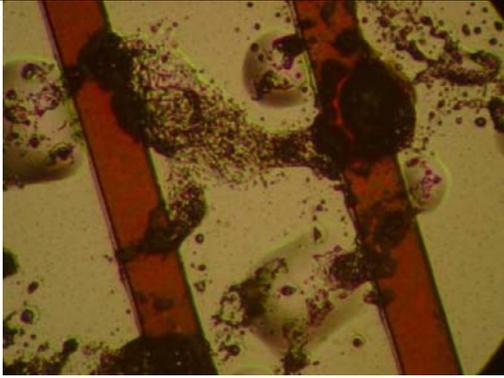
Observações: Fizemos a limpeza orgânica para remoção dos resíduos da resina Sylgard®.

3 - Resultados

3.1 – Metalização

Na Tabela C8 apresentamos alguns defeitos ocorridos na etapa de metalização do sensor de pressão.

Tabela C8 – Rompimentos de trilhas devido a sujeiras metalizadas.

Antes da remoção do alumínio (com fotorresiste)	Após remoção do alumínio (sem fotorresiste)
	
	
	
	

3.2 – Microscopia

Os resultados apresentados da microscopia foram feitos usando o FIB (*Focused Ion Beam*) no CCS/Unicamp.

3.2.1 – Membrana

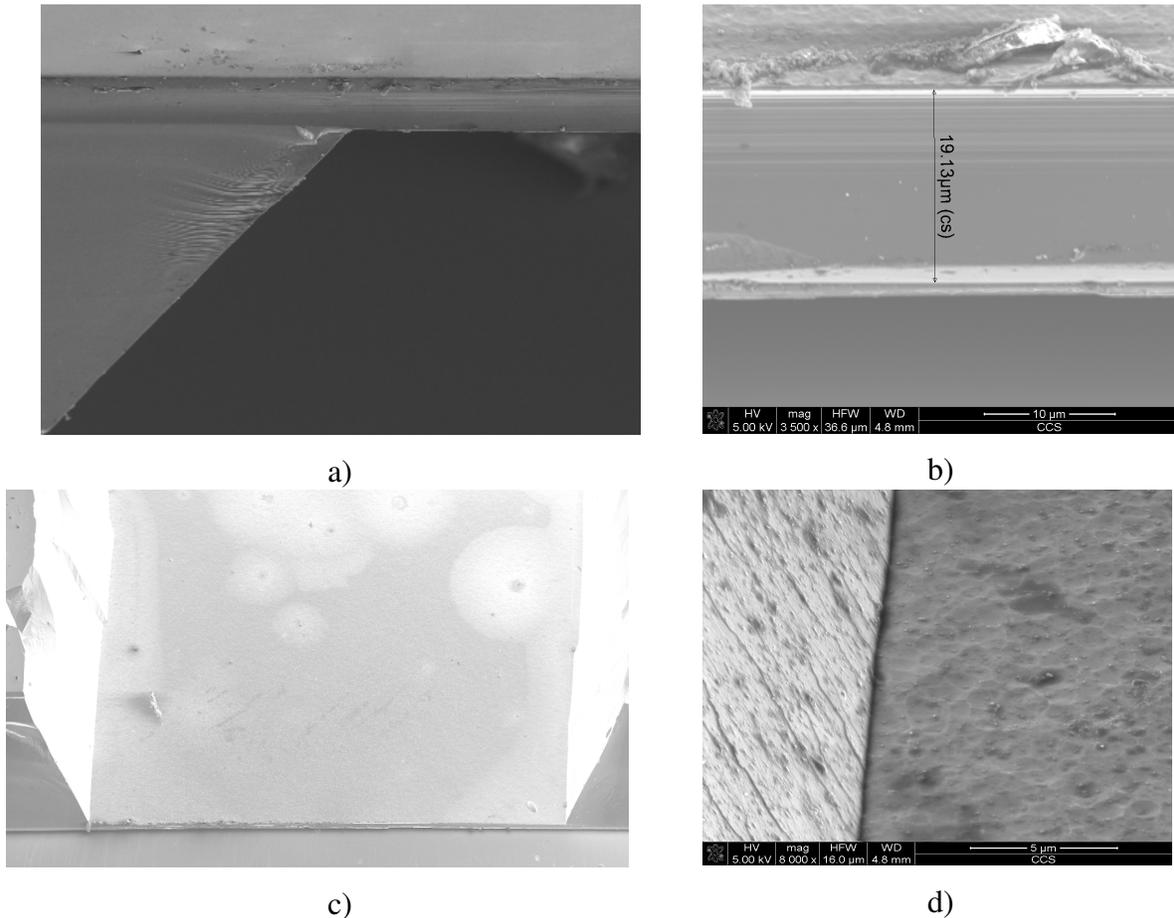


Figura C37 – Microscopia da Membrana: a) Detalhe da inclinação do plano (111) com o plano (100); b) Detalhe da espessura da membrana: $\approx 20 \mu\text{m}$; c) Detalhe da largura da membrana: $\approx 1,8 \text{ mm}$ e d) Detalhe da rugosidade da membrana: $\approx 61 \text{ nm (rms)}$.

3.2.2 – Eletrônica Ativa

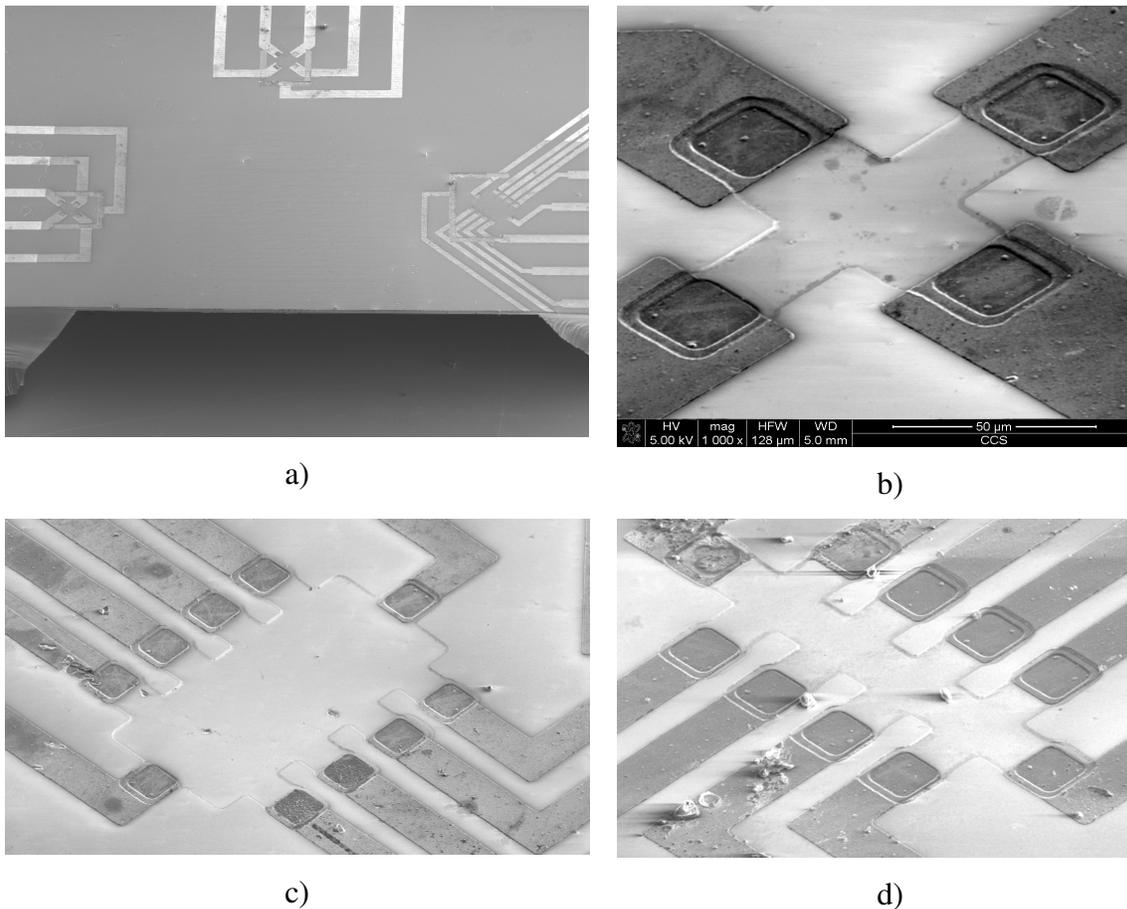


Figura C38 – Microscopia dos Piezoelementos: a) Detalhe dos piezoelementos e da membrana; b) Detalhe de um FTPS; c) e d) Detalhe de um MTPS.

3.3 – Alinhamentos entre a eletrônica ativa e a membrana

Analisando os furos feitos através do FIB no centro da região ativa de cada piezoelemento, notamos que houve um desalinhamento entre a membrana quadrada e os piezoelementos, conforme mostrado na Figura C39. No *chip* testado, o FTPS Modificado ficou fora da região de membrana e, portanto, não está mostrado na figura.

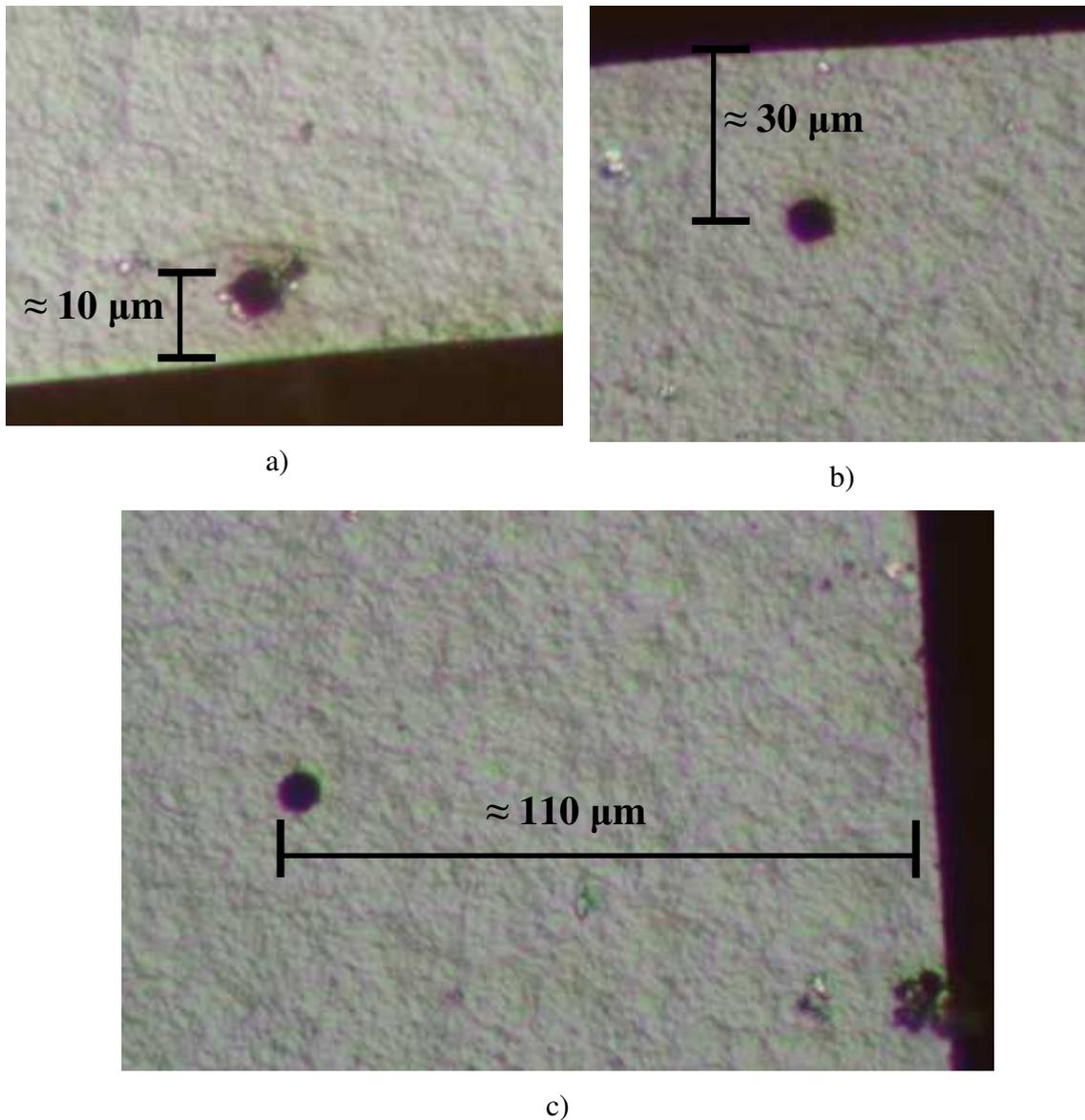


Figura C39 – Furos feito através do FIB no centro da região ativas dos piezoelementos para checagem do alinhamento da membrana quadrada com os piezoelementos

Já a Figura C40 mostra o alinhamento dos piezoelementos sobre a região de membrana. Estas fotos foram tiradas usando uma fonte de luz intensa para iluminar a cavidade da membrana (no *back-side*) e uma segunda fonte de luz para iluminação dos piezoelementos (no *front-side*). Na Figura C40 a linha tracejada separa a região fora da membrana (região mais escura) e a região da membrana (região mais clara). Ainda, observamos que há passagem de luz pelos furos feitos no FIB em alguns piezoelementos. Contudo, isto não ocorre na região ativa do FTPS Modificado (Figura C40a).

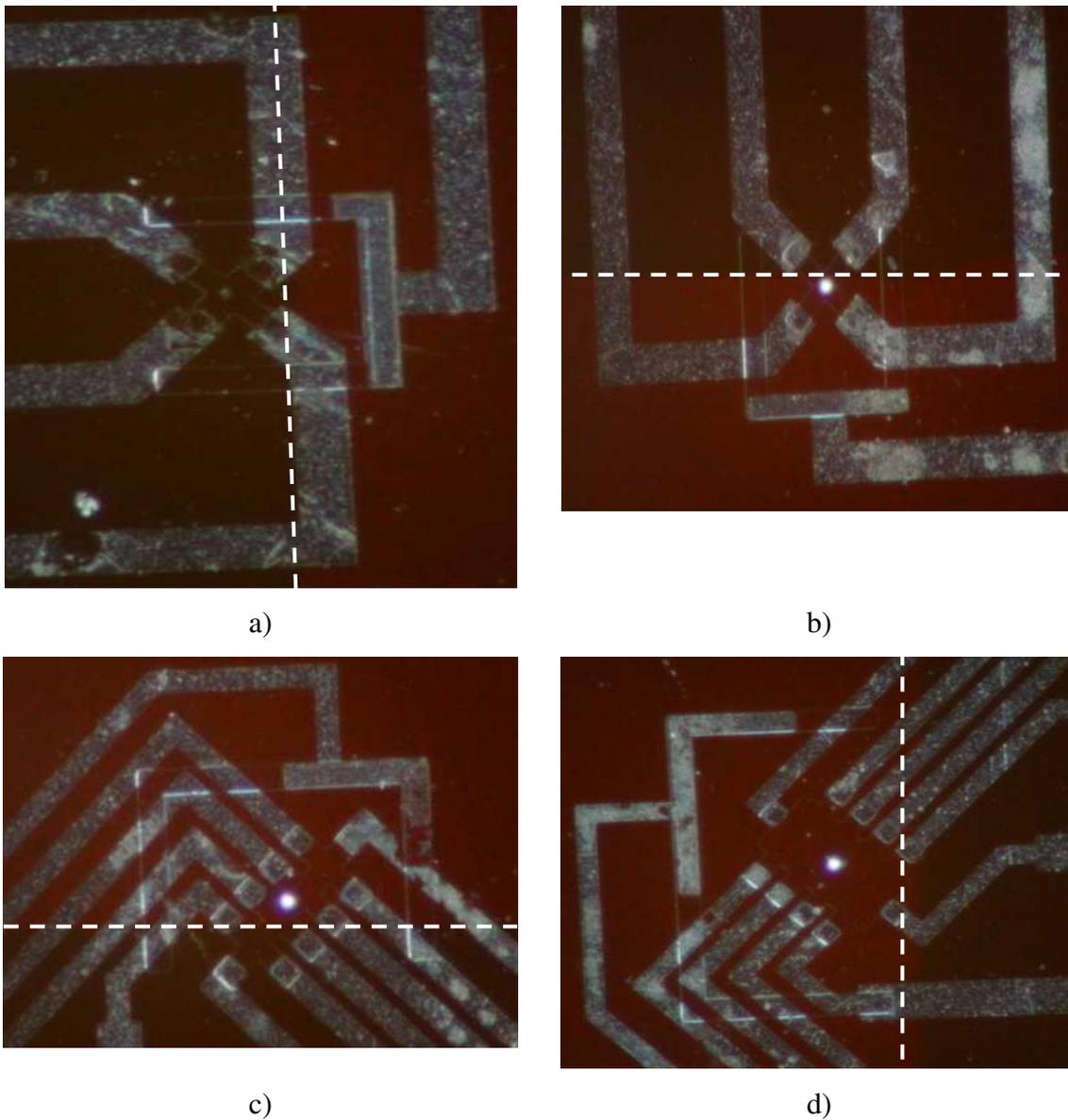


Figura C40 – Checagem do alinhamento dos piezoelementos com a membrana quadrada através de fonte de luz para iluminação da região de membrana.

3.4 – Caracterização elétrica

Realizamos a caracterização $I \times V$ dos piezoelementos. Durante a caracterização, os anéis de guarda foram mantidos no maior potencial. Por conveniência, estamos apresentando somente os resultados referentes a apenas um dos terminais dos piezoelementos (os contatos-corrente). Contudo, todos os terminais de cada piezoelemento foram testados.

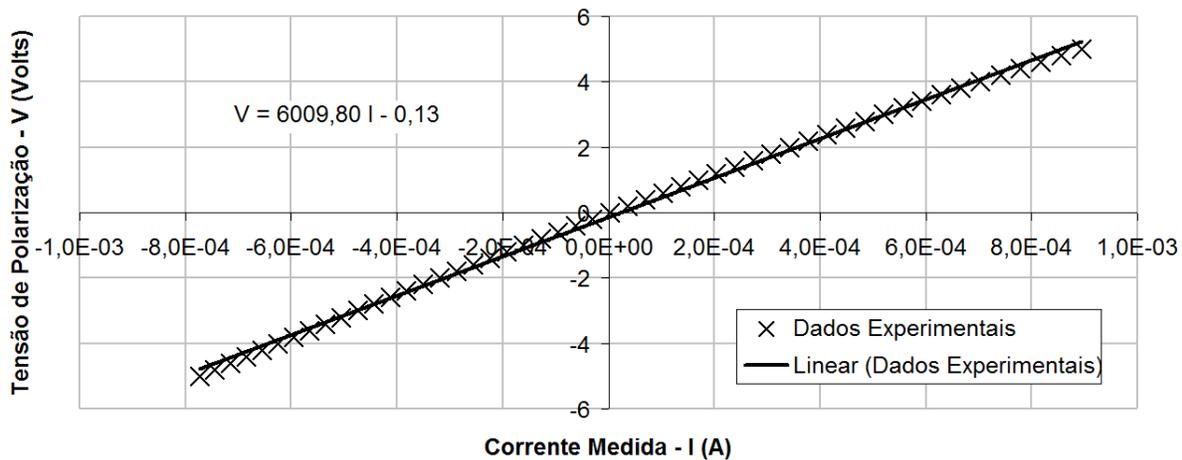


Figura C41 – Caracterização I×V da Cruz Grega.

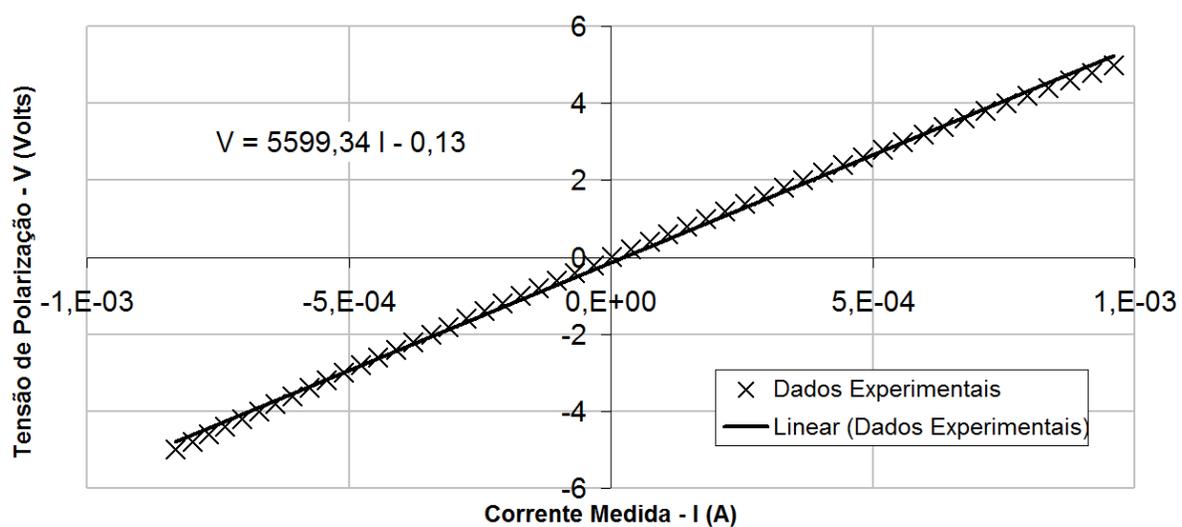


Figura C42 – Caracterização I×V do FTSP Modificado.

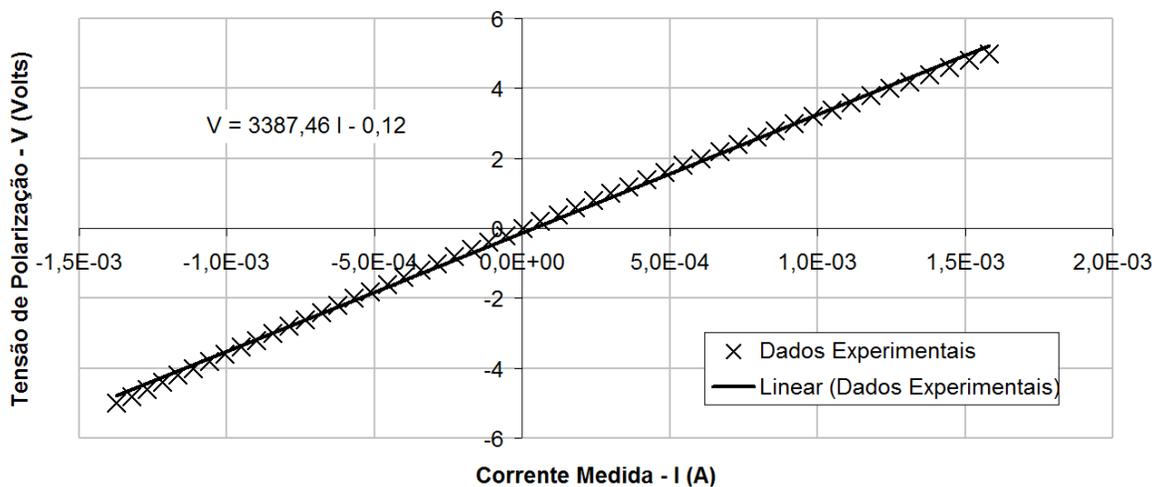


Figura C43 – Caracterização I×V do MTPS (com as dimensões menores).

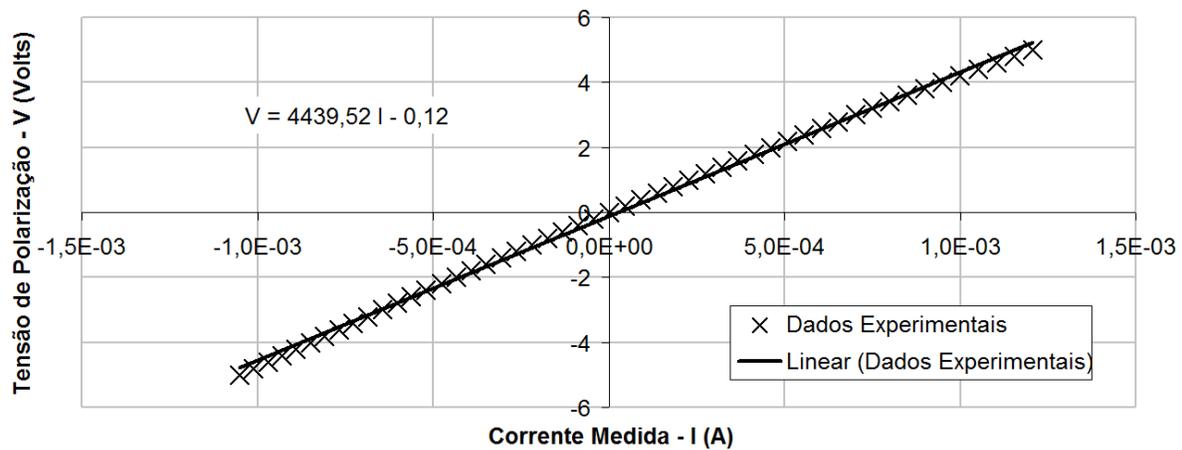


Figura C44 – Caracterização I x V do MTPS (com as dimensões maiores).

Referências

[C1] http://www.ccs.unicamp.br/site_antigo/masc2003/fotorredutora/fotorredutora.html

[C2] http://www.ccs.unicamp.br/site_antigo/masc2003/fotorrepetidora/fotorrepetidora.html

Apêndice D

Aparatos de Corrosão Química e de Teste Mecânico

1 – Aparato de Corrosão Química

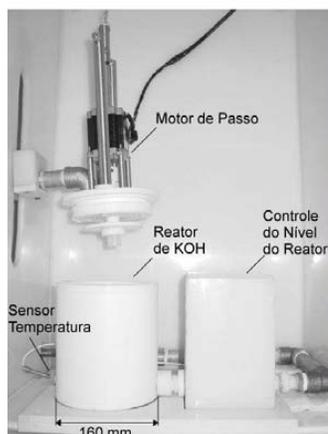
O aparato de corrosão química é um equipamento totalmente automatizado que permite o controle apurado de parâmetros, tais como: temperatura, forma de agitação, pureza e circulação da solução, para fornecer uma taxa de corrosão bem controlada. A Figura D.1 mostra o Reator de KOH, seu programa de controle implementado em Labview® e seus circuitos de condicionamento e controle (painel elétrico) (ver apêndice D para maiores detalhes).



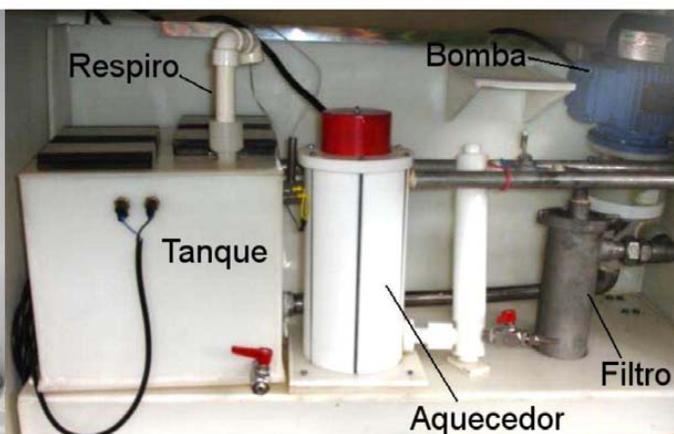
a) Programa de Controle



b) Painel Elétrico (Hardwares de Controle)



c) Reator de KOH, Sensor de Temperatura, Controle de Nível e Motor de Passo



d) Tanque, Respiro, Aquecedor, Filtro e Bomba

Figura D1 – Aparato de Corrosão Química – Reator de KOH.

O Reator de KOH consiste de um computador, de um painel elétrico e do sistema físico de armazenagem e manipulação da solução de KOH. No reator controlamos algumas variáveis de processo, tais como: fluxo e temperatura da solução, e rotação da amostra. O fluxo da solução é controlado de duas maneiras: eletricamente, através do acionamento da bomba de fluxo; e mecanicamente, através de uma válvula mecânica do tipo agulha. A temperatura é controlada através do acionamento e controle PID de um aquecedor e de uma resistência acoplada ao tanque. Este controle PID é feito monitorando sensores de temperatura do tipo PT-100 em dois pontos do sistema: um dentro do reator (recipiente onde a lâmina de silício sofre o processo de corrosão) e outro dentro do tanque. A rotação da amostra é controlada através do acionamento e controle de rotação de um motor de passo acoplado ao reator de KOH. No computador está armazenado o programa desenvolvido em Labview® para controle destas variáveis. No painel elétrico está todo o *hardware* desenvolvido para controle e acionamento dos dispositivos, e uma placa USB que faz a interface entre o computador e o painel elétrico. No sistema físico estão todos os dispositivos a ser controlados, tais como: aquecedor, bomba e motor de passo; e os recipientes de armazenamentos, tais como: tanque, reator de KOH, controlador de nível e filtro de passagem.

2 – Aparato de Teste Mecânico

A Figura D.2 mostra o esquemático do aparato de teste mecânico desenvolvido para aplicação de pressão diferencial no sensor de pressão. Este aparato fornece uma pressão estável e bem controlada no interior de uma câmara de pressão. Ele é composto por um gerador de pressão, instrumentos de aquisição e controle de dados, uma referência de pressão e um programa de controle [D1]. O programa, desenvolvido em Labview®, utiliza instrumentos virtuais (VI's) para controlar, através de um computador, todos os equipamentos de aquisição e controle de dados via interface GPIB. Os dados adquiridos são armazenados em forma de arquivos texto e html.

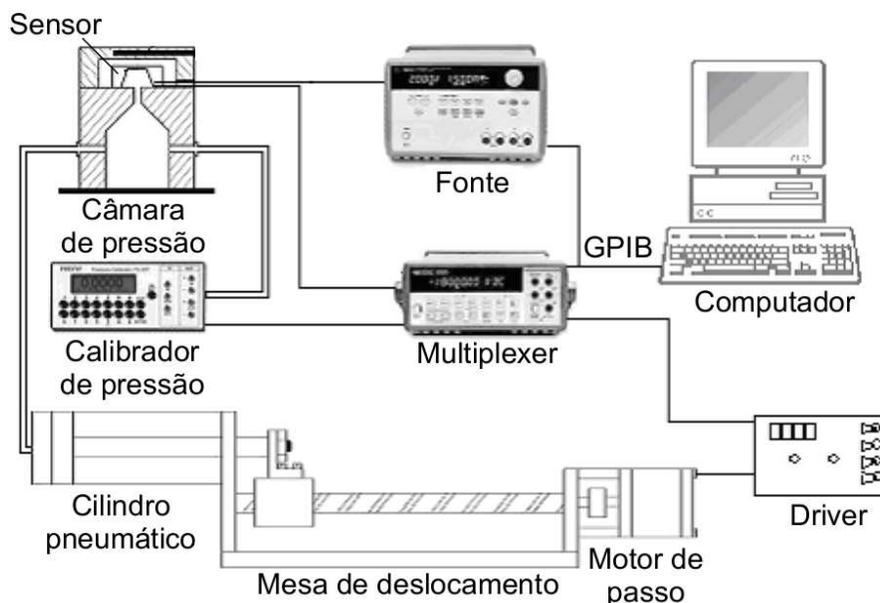


Figura D2 – Esquemático do aparato de teste mecânico

O gerador de pressão é composto por uma mesa de deslocamento, por um cilindro pneumático e por uma câmara de pressão. A câmara de pressão é conectada ao cilindro pneumático através de uma mangueira plástica. O cilindro pneumático está conectado a mesa de deslocamento através de seu êmbolo, que está preso a um dispositivo móvel. A mesa de deslocamento é formada por um eixo central rotativo. Uma das extremidades deste eixo central está conectada a um motor de passo que faz o controle da rotação do eixo central da mesa de deslocamento. Conforme o eixo central é rotacionado, o dispositivo móvel, preso ao eixo, movimenta o êmbolo do cilindro. A movimentação do êmbolo ocasiona uma variação do volume dentro do cilindro pneumático, o que gera uma pressão interna no cilindro. Esta pressão é então transmitida até a câmara de pressão, onde um sensor está acondicionado, através da mangueira. Um calibrador de pressão, conectado a câmara de pressão, monitora a pressão gerada. Através do controle preciso da mesa de deslocamento e do monitoramento da pressão gerada, uma pressão diferencial bem controlada é obtida dentro da câmara de pressão.

O controle do motor de passo é feito por um *driver* composto por um circuito lógico e um de potência, por uma unidade de chaveamento e uma fonte de alimentação. O *driver* é conectado a um multiplexador através de uma interface serial, e este está ligado a um computador e a um calibrador de pressão por uma interface GPIB. Através de VI's, os

níveis de pressão são definidos. O computador controla o motor de passo para que este gere os níveis de pressão desejados no interior da câmara de pressão. Para um preciso controle destes níveis de pressão, o calibrador de pressão monitora constantemente o nível de pressão no interior da câmara e envia este dado ao computador para comparação.

A aquisição do sinal de saída do sensor de pressão em teste é feita utilizando um cabo *shield* conectado ao multiplexador que está ligado ao computador por uma interface GPIB. A fim de evitar interferências eletromagnéticas e geração de ruídos, uma caixa de metal quadrada é colocada sobre a câmara de pressão e o sensor; e tanto a placa quanto o cabo *shield* são aterrados. A caixa de metal ainda minimiza a influência da luminosidade externa no sensor, uma vez que, somente o encapsulamento dos sensores não é suficiente. A Figura D.3 mostra o aparato de teste mecânico.

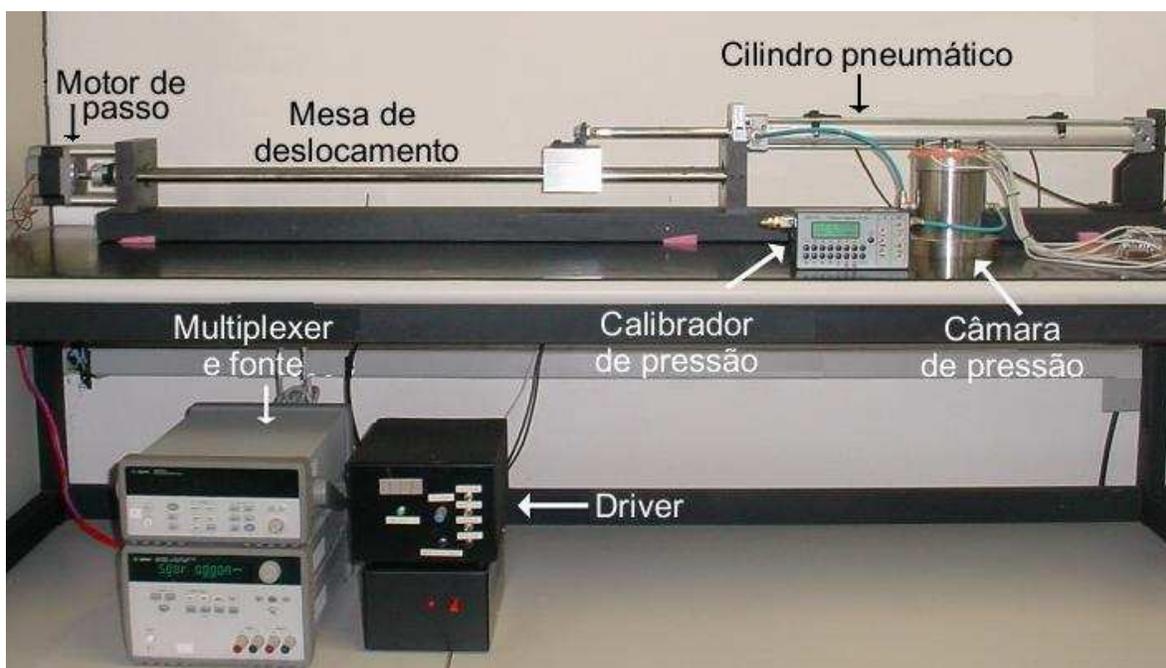


Figura D3 – Aparato de teste mecânico.

REFERÊNCIAS

[D1] GARCIA, V. *Sensor de Pressão Microeletrônico Baseado no Efeito Piezomos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de Campinas, 2006

Apêndice E

Método de Van Der Pauw

O Método de Van Der Pauw é comumente usado para medição da resistividade dos materiais em geometrias arbitrárias. Por este método, a resistividade específica de uma amostra plana e de geometria arbitrária pode ser medida se as seguintes condições são satisfeitas [E1]:

- Os contatos estão na circunferência da amostra;
- Os contatos são suficientemente pequenos;
- A amostra é homogênea em espessura (amostra plana);
- A amostra não tem buracos isolados.

Quaisquer alterações destas condições contribuem para erros na medida.

O método então consiste em considerar uma amostra plana de geometria arbitrária, completamente livre de buracos e com 4 contatos pequenos, em lugares arbitrários, na periferia da amostra, conforme Figura E1.

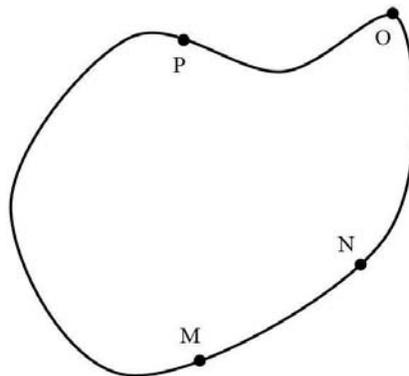


Figura E1 – Geometria arbitrária para medida de resistividade pelo Método de Van Der Pauw.

Na Figura E1, M, N, O e P são os contatos. Por aplicar uma corrente i_{MN} aos contatos M e N, uma diferença de potencial entre os pontos O e P ($V_P - V_O$) pode ser medida e, então, uma resistência $R_{MN,OP}$ pode ser definida como sendo [D1,D2]:

$$R_{MN,OP} = \frac{(V_P - V_O)}{i_{MN}}. \quad (E.1)$$

Analogamente, define-se:

$$R_{NO,PM} = \frac{(V_M - V_P)}{i_{NO}}. \quad (E.2)$$

O novo método de medição é baseado no teorema que entre $R_{MN,OP}$ e $R_{NO,PM}$ existe a seguinte relação [E1,E2]:

$$\exp\left(-\frac{\pi d R_{MN,OP}}{\rho}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d R_{NO,PM}}{\rho}\right) = 1, \quad (E.3)$$

sendo que d e ρ são a espessura e a resistividade do material, respectivamente. Como a resistência de folha de um material é dada por:

$$R_S = \frac{\rho}{d}, \quad (E.4)$$

Substituindo (E.4) em (E.3), podemos reescrever (E.3) em função de R_S , como sendo:

$$\exp\left(-\frac{\pi R_{MN,OP}}{R_S}\right) + \exp\left(-\frac{\pi R_{NO,PM}}{R_S}\right) = 1. \quad (E.5)$$

Na equação (E.5), R_S pode ser calculada numericamente, uma vez que $R_{MN,OP}$ e $R_{NO,PM}$ são conhecidas.

Referências

[E1] L. J. Van Der Pauw, A Method Of Measuring Specific Resistivity And Hall Effect Of Discs Of Arbitrary Shape, Philips Research Reports, Vol. 13, No. 1, 1 – 9, 1958

[E2] L. J. Van Der Pauw, A Method Of Measuring The Resistivity And Hall Coefficient On Lamellae Of Arbitrary Shape, Philips Technical Review, Vol. 20, No. 8, 220 – 224, 1958/59

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WILSON, J. S., *Sensor Technology Handbook*, Elsevier, Burlington, EUA, 2005.
- [2] INTECHO CONSULTING. *Sensor Markets 2008: Worldwild Analyses and Forecasting for the Sensor Market until 2008*. Disponível em <http://www.intechnoconsulting.com/>.
- [3] FRUETT, F.; MEIJER, G. C. M., *The Piezjunction Effect in Silicon, Its Consequences and Applications For Integrated Circuits and Sensors*. Kluwer, Delft, The Netherlands, 2002.
- [4] BEEBY, S. P.; ENSEL, G.; KRAFT, M., *MEMS Mechanical Sensor*, Artech House Publishers, 2004.
- [5] SZE, S. M., *Semiconductor Sensors*, Wiley-Interscience, 1994
- [6] GRIDCHIN, A. V, *The Four-Terminal Silicon Piezotransducer: History and Future*, 5TH International Siberian Workshop and Tutorial, Electron Devices and Materials, 21 (2004).
- [7] MIDDELHOEK, S.; AUDET, S.A.; FRENCH, P.J. *Silicon Sensors*, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, Laboratory for Electronic Instrumentation, The Netherlands, 2000.
- [8] TUFTE, O. N.; CHAPMAN, P. W.; LONG, D., *Silicon Diffused-Element Piezoresistive Diaphragms*, Journal Of Applied Physics, Vol. 33, 1994.
- [9] GIELES, C. M., *Subminiature Silicon Pressure Sensor Transducer*, Digest IEEE International Solid-State Circuits Conference, 1969.
- [10] CAMOLESI, A.; SOUZA, P. R.; FRUETT, F., *Design, Simulation, Fabrication and Characterization of a Pressure Sensor arranged in Wheatstone Piezoresistive Bridge*. In: Chip in the Mountains SBMICRO, 2006, Ouro Preto. Microelectronics Technology and devices SBMICRO2006. Pennington, USA : The Electrochemical Society. v. 4. p. 195-203.

- [11] BAO, M.; WANG, Y., *Analysis and Design of a Four-Terminal Silicon Pressure Sensor at the Centre of a Diaphragm*, Sensors and Actuators, Vol. 12, pp. 49-56, 1987.
- [12] *Motorola® Master Semiconductor Guide*, Rev. 7, Motorola, 1994.
- [13] GRIDCHIN, V. A.; PIROGOVA, R. A., *Numerical Simulation of Multiterminal Silicon Piezoelements*, Sensors and Actuators, Vol 65, pp. 5-9, 1998.
- [14] BENEDICT, R. P., *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, 3^a ed., J. Wiley, New York, 1984.
- [15] SMITH, C. S., *Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon*, Physical Review, Vol. 94, 1954.
- [16] KANDA, Y.; YAMAMURA, K., *Four-Terminal-Gauge Quasi-Circular And Square Diaphragm Silicon Pressure Sensors*, Sensors and Actuators, Vol 18, pp. 247-257, 1989.
- [17] GRIDCHIN, A. V.; GRIDCHIN, V. A., *The Four-Terminal Piezotransducer: Theory and Comparison with Piezoresistive Bridge*, Sensors and Actuators, Vol 58, pp. 219-223, 1997.
- [18] BAO, M.; QI, W.; WANG, Y., *Geometric Design Rules of Four-Terminal Gauge For Pressure Sensor*, Sensors and Actuators, Vol 18, pp. 149-156, 1989.
- [19] GREENWOOD, J. C., *Silicon in Mechanical Sensors*, Journal of Physics: Instrument Science and Technology, Vol 21, pp. 1114-1128, 1988.
- [20] GARDNER, J. W.; VARADAN, V. K., AWADELKHARIM, O. O., *Microsensors, MEMS and Smart Devices*, Wiley, 2001.
- [21] BORESI, A. P.; CHONG, K. P., *Elasticity in Engineering Mechanics*, 2^a Ed, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [22] KOX, A. J.; KLEIN, M. J.; SCHULMANN, R., *The Collected Papers of Albert Einstein, The Berlin Years: Writings 1914-1917*, Vol. 6, pp. 146-200.
- [23] TIMOSHENKO S.; WOINOWSKY-KRIEGER S., *Theory of Plates and Shells*, McGraw Hill, New York, EUA, 1959.

[24] PIERRET, R. F., *Advanced Semiconductor Fundamentals*, 2^a Ed., Vol 6, Prentice Hall, New Jersey, EUA, 2003.

[25] WORTMAN, J. J.; EVANS, R. A., *Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio in Silicon and Germanium*, Journal of Applied Physics, Vol. 36, pp. 153-156, 1965.

[26] GARCIA, V. *Sensor de Pressão Microeletrônico Baseado no Efeito PiezoMOS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de Campinas, 2006.

[27] PETERSEN, K. E., *Silicon As A Mechanical Material*, Proceedings of IEEE, Vol. 70, pp. 420-457, 1982.

[28] MIDDLEHOEK, S., *Celebration of the Tenth Transducers Conference: The Past, Present and Future of Transducer Research and Development*, Sensors and Actuators, Vol. 82, pp. 2-23, 2000.

[29] CREEMER, J. F.; FRUETT, F. ; MEIJER, G. C.; FRENCH, P. J., *The Piezjunction Effect in Silicon Sensors and Circuits and Its Relation to Piezoresistance*. IEEE Sensors Journal, Madison, USA, v. 1, n. 2, p. 98-108, 2001.

[30] SINGH, R.; NGO, L. L.; SENG, H. S.; MOK, F. N. C, *A Silicon Piezoresistive Pressure Sensor*, Proceedings of the First IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Application, pp. 1-4, 2002.

[31] KANDA, Y., *Piezoresistance Effect of Silicon*, Sensors and Actuators, Vol. 28, pp. 83-91, 1991.

[32] GARCIA, V.; FRUETT, F., *A Mechanical-Stress Sensitive Differential Amplifier*, Sensors and Actuators, Vol. 132, pp.8-13, 2006.

[33] FRIEDRICH, A. P.; BESSE, P. A.; ASHRUF, C. M. A.; POPOVIC, R. S.; *New Piezo-Tunneling Strain Sensor with Very Low Temperature Sensitivity*, Proceedings of International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Vol. 1, pp. 133-136, 1997.

[34] POPOVICH, R. S.; *Hall Effect Devices*, Adam Hilger, 1991.

[35] BALTES, H. P.; POPOVIC, R. S.; *Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor*, Proceedings of the IEEE, Vol. 74, pp. 1107-1132, 1986.

- [36] MATSUDA, K.; SUZUKI, K.; YAMAMURA, K.; KANDA, Y.; *Nonlinear Piezoresistance Effect in Silicon*, Journal of Applied Physics, Vol. 73, pp. 1873-1847, 1993.
- [37] KANDA, Y.; *A Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon*, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 29, pp. 64-70, 1982.
- [38] CHO, C. H.; JAEGER, R. C.; SUHLING, J. C.; *Experimental Characterization of the Temperature Dependence of the Piezoresistive Coefficients of Silicon*, IEEE, pp. 928-935, 2006.
- [39] SMITH, C. S.; *Macroscopic Symmetry and Properties of Crystals*, Solid State Physics, Advance in Research and Application, Vol. 6, New York, 1958.
- [40] BAO, M.; HUANG, Y.; *Batch Derivation of Piezoresistive Coefficient Tensor by Matrix Algebra*, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. 332-334, 2004.
- [41] MARTINS, N., *Introdução à Teoria da Eletricidade e do Magnetismo*, Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 1973.
- [42] GRIDCHIN, A. V.; *An Application of Conform Mapping to the Calculation of FTFS Transducer with Various Geometrical Form*, 3rd Siberian Russian Workshop And Tutorials EDM'2002, Vol. 1, pp. 1-5, 2002.
- [43] WICK, R. F.; *Solution of the Field Problem of the Germanium Gyrotator*, Journal of Applied Physics, Vol. 25, pp. 741-756, 1954.
- [44] VERSNEL, W.; *The Geometrical Correction Factor for a Rectangular Hall Plate*, Journal Applied Physics, Vol. 53, pp. 4980-4986, 1982.
- [45] PALLÁS-ARENY, R.; WEBSTER, J. G.; *Sensors and Signal Conditioning*, Wiley Inter-Science, New York, 1991.
- [46] MOAVENI, S.; *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*, Prentice Hall, 3^a Ed., 2007.
- [47] Ansys Elements Reference, Release 9.0.
- [48] GRIDCHIN, V. A.; GRIDCHIN, A. V.; LUBIMSKY, V. M.; BESEDIN, V. M.; *Experimental Investigation of the Greek Cross-Shaped Piezoresistive Element*, 4TH International Conference – APEIE/98, pp. 113-118, 1998.

- [49] UDO, A.; *Limits of Offset Cancellation by the Principle of Spinning Current Hall Probe*.
- [50] AustrianMicrosystem, *0,35 μm CMOS C35 Process Parameters*, Revision 3.0, 2004.
- [51] BERTAILS, J. C.; *Low-Frequency Noise Considerations for MOS Amplifiers Design*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-14, pp. 773-776, 1979.
- [52] PAUW, L. J. V. D.; *A Method Of Measuring Specific Resistivity And Hall Effect Of Discs Of Arbitrary Shape*, Philips Research Reports, Vol. 13, No. 1, 1 – 9, 1958.
- [53] PAUW, L. J. V. D.; *A Method Of Measuring The Resistivity And Hall Coefficient On Lamellae Of Arbitrary Shape*, Philips Technical Review, Vol. 20, No. 8, 220 – 224, 1958/59.
- [54] PATTNAIK, P. K.; VIJAYAADITYA, B.; SIRINIVAS, T.; SELVARAJAN, A.; *Optical MEMS Pressure Sensor using Resonator on a Circular Diaphragm*, Proceedings of 2005 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems – ICMENS, pp. 277-280, 2005.
- [55] BRANTLEY, W. A.; *Calculated Elastic Constants for Stress Problems Associated with Semiconductor Devices*, Journal of Applied Physics, Vol. 44, pp. 534-535, 1973.
- [56] FRICK, V.; HEBRARD, L.; POURE, P.; BRAUN, F.; *CMOS Microsystem Front-End for MicroTesla Resolution Magnetic Field Measurement*, The 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Vol. 1, pp. 129-132, 2001.
- [57] POPOVIC, R. S.; *A Hall MOS Device Free From Short-Circuit Effect*, Sensor and Actuators, Vol. 5, pp. 253-262, 1984.
- [58] KAMMERER, J.B.; HEBRARD, L.; FRICK, V.; POURE, P.; BRAUN, F.; *Horizontal Hall Effect Sensor With High Maximum Absolute Sensitivity*, Sensor Journal IEEE, Vol. 3, pp. 700-707, 2003.
- [59] *Motorola® Semiconductor Technical Data*, MPX50 Series, Rev. 5, 1997.