

Marcelo Del Guerra

**ESTUDO DE TRANSDUTORES PARA GERAÇÃO DO
SINAL DE DISPARO EM APALPADORES
COMUTADORES PARA MÁQUINAS-FERRAMENTAS
CNC.**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço...../...../.....
20/03/09

Ass
Anna

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E GESTÃO DE OPERAÇÕES

ORIENTADOR: Prof. Ass. Reginaldo Teixeira Coelho



São Carlos
2009

Class.	TESE ✓
Cutt.	7075
Tombo	7076109
Sysno	1787045

3120011229

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.



Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

D352e Del Guerra, Marcelo
Estudo de transdutores para geração do sinal de disparo em apalpadores comutadores para máquinas-ferramentas CNC / Marcelo Del Guerra ; orientador Reginaldo Teixeira Coelho. -- São Carlos, 2009.


Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Produção) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

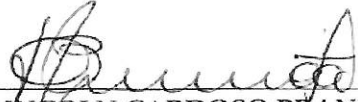
1. Máquinas-ferramenta. 2. Monitoramento e controle da qualidade dimensional. 3. Apalpadores. 4. Medição durante a usinagem. 5. Centro de usinagem CNC. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCELO DEL GUERRA**


Tese defendida e julgada em 16/02/2009 perante a Comissão Julgadora:

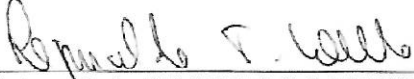

Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO


Prof. Dr. **LINCOLN CARDOSO BRANDÃO**
(Universidade Federal de São João del-Rei/UFSJ) APROVADO


Prof. Associado **RENATO GOULART JASINEVICIUS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO


Prof. Dr. **ALESSANDRO ROGER RODRIGUES**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/Campus de Ilha Solteira) APROVADO


Prof. Dr. **ÁLVARO JOSÉ HACKERLI**
(Instituto de Pesquisa Tecnológica/IPT) APROVADO


Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção


Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela Vida e oportunidades.

A minha Esposa, pela dedicação e apoio incondicional.

A minha Família, por não poupar esforços em me proporcionar educação para a Vida.

Ao Prof. Reginaldo Teixeira Coelho pela orientação, paciência e confiança ao longo dos anos.

Aos amigos Adolfo, Alex, Américo, Aquiles, Arai, Ariel, Cris, Dinho, Eraldo, Fábio, Gustavo, Irene, José Eduardo, Juliano, Nunzio, Thiago, Tobias, Vanda e Vinícius, pelo auxílio técnico e excelente convívio no laboratório.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP pelo financiamento do projeto.

EPÍGRAFE

*“Não há nada que seja maior evidência de insanidade do que fazer a
mesma coisa dia após dia e esperar resultados diferentes”.*

Albert Einstein

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo pesquisar transdutores comerciais que viabilizem a geração do sinal de disparo em apalpadores comutadores capazes de realizar medições tridimensionais em máquinas-ferramenta CNC. Em uma fase inicial, foram comparados diversos transdutores a fim de se verificar qual seria o mais adequado para a finalidade, de acordo com critérios de seleção definidos. Desta avaliação, os extensômetros resistivos e piezoresistivos obtiveram a maior pontuação. Os extensômetros foram então ensaiados em um Centro de Usinagem, ambiente de utilização dos apalpadores comutadores, para levantamento da sua relação Sinal/Ruído, sensibilidade térmica, resposta a uma entrada degrau e repetitividade. Em seguida foi realizado ensaio também em Centro de Usinagem para determinação da repetitividade de um mecanismo de geração do sinal de disparo baseado em contato elétrico, técnica esta amplamente utilizada nos apalpadores comutadores atuais. Os resultados comparativos entre os dois tipos de extensômetros mostraram que os extensômetros piezoresistivos foram mais adequados pra a aplicação, apresentado repetitividade ($\pm 6DP$) igual a $0,23\mu m$, além de apresentar menor sensibilidade térmica e menor tempo de resposta à aplicação de uma entrada degrau. Os ensaios para determinação da repetitividade do mecanismo de geração do sinal de disparo baseado em contato elétrico apresentaram repetitividade ($\pm 6DP$) igual a $\pm 0,16\mu m$. Como principal conclusão para o presente trabalho, comprova-se a viabilidade da utilização de extensômetros piezoresistivos como substitutos do mecanismo de ativação do sinal de disparo, com vantagens no que se refere ao fenômeno de folga de percurso verificado no sistema convencional.

Palavras-Chaves: Monitoramento e Controle da Qualidade Dimensional, Apalpadores Comutadores, Medição durante a usinagem, Centro de Usinagem CNC.

ABSTRACT

falta 707 en inglés

The objective of this work is to research commercially available transducers to be used for trigger signal generation in 3D touch trigger probes for CNC machine tools. First, a variety of transducers was compared to verify which one best suits the application according to the developed metrics. Resistive and piezoresistive strain-gages obtained the best rating from the comparison. The strain-gages were then experimented using a milling machine, where touch trigger probes are widely used, to acquire information regarding transducers signal/noise ratio, thermal sensibility, step response and repeatability. Also, the repeatability of a mechanism developed to generate trigger signal based on electrical contact, widely used technique, was calculated using the same milling machine. The comparative results between the two strain-gages showed that piezoresistive model is more suitable for the application, with repeatability ($\pm 6SD$) equal $0,23\mu m$, also showing smaller thermal sensibility and smaller step time response. The experiments to determine the repeatability of the electrical contact mechanism showed results ($\pm 6SD$) equal $0,16\mu m$. The main conclusion of this work shows that piezoresistive strain-gages transducers can be used to generate trigger signal in touch trigger probes as a substitute to the electrical contact system, showing advantages regarding pre-travel variation.

Keywords: Dimensional Quality Monitoring and Control, Touch-Trigger-Probes, On-Machine Measuring systems, CNC Machine Center.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Representação de um extensômetro colado e devidamente protegido.....	24
FIGURA 2.2 – Extensômetros utilizados em teste de torção em tubos de Carbono.....	24
FIGURA 2.3 – Exemplos de extensômetros disponíveis comercialmente [FONTE: HBM (2006)].....	25
FIGURA 2.4 - Diagrama representativo de um extensômetro semiconductor [FONTE: HOFFMANN (1989)].....	26
FIGURA 2.5 - Extensômetro depositado diretamente no corpo de um transdutor [FONTE: HOFFMANN (1989)].....	27
FIGURA 2.6 – Fabricação de MEMS pelo processo denominado “surface Micromachining” [FONTE: FREESCALE SEMICONDUCTOR(a), (2007)].....	30
FIGURA 2.7 - Diagrama de um sistema de medição para extensômetros. [FONTE: HOFFMANN, (1989)].....	34
FIGURA 2.8 - Extensômetro em uma ponte de Wheatstone [FONTE: HOFFMANN, (1989)].....	35
FIGURA 2.9 - Princípio de funcionamento de uma ponte de Wheatstone [FONTE: HELFRICK e COOPER, (1989)].....	36
FIGURA 2.10 - Tipos de pontes de Wheatstone [FONTE: HELFRICK e COOPER, (1989)].....	38
FIGURA 2.11 - Esquema básico de um amplificador operacional.....	41
FIGURA 2.12 - Representação simplificada do circuito interno de um amplificador operacional.....	41
FIGURA 2.13 - Esquema do circuito seguidor de tensão.....	43
FIGURA 2.14 - Esquema do circuito inversor.....	43
FIGURA 2.15 - Esquema do circuito não inversor.....	44
FIGURA 2.16 - Esquema do circuito de amplificação da diferença.....	45
FIGURA 2.17 - Esquema do circuito amplificador para instrumentação.	46
FIGURA 2.18 – Estrutura de um sensor de pressão Piezoresistivo. [FONTE: MIDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2008.].....	47

FIGURA 2.19 - Diferenciação entre elemento sensor para a medição de pressões absolutas e diferenciais. [FONTE: MERIT SENSOR SYSTEMS (2008)].....	48
FIGURA 2.20 - Distribuição das tensões de Von Misses no diafragma de silício. [FONTE: FRAGA (2005)].....	48
FIGURA 2.21 - Processo de remoção anisotrópica na fabricação de sensores de pressão piezoresistivos. [FONTE: MAXIM, (2001)].....	49
FIGURA 2.22 – Sofisticação e miniaturização dos sensores de pressão Piezoresistivos [FONTE: FREESCALE SEMICONDUCTOR, (2005)].....	49
FIGURA 2.23 – Representação de um corte lateral realizado em um sensor de pressão diferencial. [FONTE: FREESCALE SEMICONDUCTOR, (2005)].....	50
FIGURA 2.24 - Diferentes tipos de encapsulamento para sensores de pressão [FONTE: FREESCALE SEMICONDUCTOR, (2005)].....	50
FIGURA 2.25 - Aplicação de uma força sobre a superfície do sensor de toque. [FONTE: CROWDER (1998)].....	52
FIGURA 2.26 - Sensor de toque composto de duas placas paralelas e espuma condutiva. [FONTE: CROWDER, (1998)].....	52
FIGURA 2.27 - Aplicação de sensores táteis na análise da oclusão dental. [FONTE: TEKSCAN, 2006].....	54
FIGURA 2.28- Esquema de funcionamento de um sistema de medição acoplado a um Centro de Usinagem.....	55
FIGURA 2.29 - Exemplo de um sistema de transmissão óptico via infravermelho (TP10 - Renishaw).....	56
FIGURA 2.30 - Discrepância entre a posição de contato real e a percebida pelo CNC.....	58
FIGURA 2.31 - Princípio de funcionamento de um “Kinematic touch trigger probe” [FONTE: TOOLING & PRODUCTION (1999)].....	59
FIGURA 2.32 - Teste padrão da folga de percurso ou “pretravel” em XY de um Kinematic TTP [FONTE: KIM; CHUNG, (2001)].....	59
FIGURA 2.33 - Ponte de Wheatstone usando 4 extensômetros [FONTE: OMEGA HANDBOOK SERES, 1998].....	60

FIGURA 2.34 - Comparação dos valores da folga de percurso entre apalpadores convencionais e Apalpadores “Strain-Gages” [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION, 2008].....	62
FIGURA 2.35 - Princípio de funcionamento dos “apalpadores a Laser” e a variação do ponto de incidência do feixe na fotocélula sensível quando há a deflexão da haste [FONTE: HEIDENHAIN, 2007].....	63
FIGURA 2.36 - Transmissão da força de toque para os sensores nos “piezo probes”. [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION, 2008].....	64
FIGURA 3.1 - Subsistemas propostos para o desenvolvimento do apalpador.....	66
FIGURA 3.2 - Circuito interno do TI-INA121. [FONTE TEXAS INSTRUMENTS (2000)].....	69
FIGURA 3.3 - Esquemático da interface para os sensores Honeywell FSG15N1A e FSS1500NSB.	70
FIGURA 3.4 - Circuito da interface amplificadora dos sensores de força piezoresistivos	71
FIGURA 3.5 - Vistas superior e inferior das interfaces amplificadoras desenvolvidas para os sensores de força Piezoresistivos.....	71
FIGURA 3.6 - Circuito do filtro passa-baixa passivo e diagrama de relação de amplitudes entre saída e entrada (V_{out}/V_{in}).....	73
FIGURA 3.7 – Esquema do circuito elétrico desenvolvido pra testes dos extensômetros	73
FIGURA 3.8 – Esquema do sistema desenvolvido para simulações em sensores	74
FIGURA 3.9 – Comportamento esperado na saída de um sensor amplificado e método adotado para acionamento do sinal de disparo.....	75
FIGURA 3.10 – Fluxograma representativo do software Labview®	76
FIGURA 3.11 - Módulo de aquisição de dados USB-6009, National Instruments	77
FIGURA 3.12 - Diagrama de blocos do simulador desenvolvido em LabView®	77

FIGURA 3.13 - Gráfico LabView® da aquisição instantânea do sinal de tensão do sensor.....	78
FIGURA 3.14 - Gráfico LabView® da série histórica de aquisição do sinal de tensão do sensor.....	79
FIGURA 3.15 - Tela frontal do simulador desenvolvido para testes dos sensores.....	79
FIGURA 3.16 - Bancada para testes e simulações dos sensores	80
FIGURA 3.17 – Modelo de extensômetro escolhido para experimentos	82
FIGURA 3.18 – Extensômetro colado em uma viga em balanço.....	83
FIGURA 3.19 - Gráfico demonstrando a ocorrência do fenômeno de histerese.....	84
FIGURA 3.20 - Dois diferentes tipos de encapsulamento de sensores de força piezoresistivos. [FONTE: HONEYWELL (2008)].....	85
FIGURA 3.21 -Aquisição de dados do sensor FSG15N1A pelo período de 45 horas	86
FIGURA 3.22 - Ilustração do dispositivo para simulação de efeito de pré-carga no sensor FSS1500NSB	89
FIGURA 3.23 - Foto do dispositivo para simulação de efeito de pré-carga no sensor FSS1500NSB	89
FIGURA 3.24 - Aquisição de dados do sensor FSS1500NSB pelo período de 45 horas	90
FIGURA 3.25 - Foto obtida em microscópio do diafragma de um sensor de pressão antes do teste de excitação mecânica direta.....	92
FIGURA 3.26 - Remoção da tampa superior do sensor de pressão para acesso ao diafragma	92
FIGURA 3.27 - Espessura reduzida e fragilidade dos cristais impedem excitação direta do diafragma de sensores de pressão piezoresistivos.....	93
FIGURA 3.28 - Sensor de toque analógico FlexiForce A201. [FONTE: TEKSCAN, (2006)].....	94
FIGURA 4.1 – Extensômetro piezoresistivo com compensação térmica.....	101
FIGURA 4.2 – Ilustração de ajuste do ganho para casamento da amplitude do sinal.....	104

FIGURA 4.3 – Aplicação de força na extremidade livre de uma viga engastada.....	105
FIGURA 4.4 – Dimensões em (mm) da viga para simulação.....	105
FIGURA 4.5 – Deslocamento na direção (3) dada pelo software.....	106
FIGURA 4.6 – Deslocamento na direção (2) dada pelo software (sentido negativo).....	106
FIGURA 4.7 – Viga em balanço fixada à suporte.....	107
FIGURA 4.8 – Fluxograma do procedimento de deslocamento incremental do eixo árvore e medição da tensão do extensômetro e valor do MT 1201.....	108
FIGURA 4.9 – Fluxograma do procedimento de deslocamento incremental do eixo para levantamento de curva sinal X deslocamento.....	111
FIGURA 4.10 – Ilustração da curva de Tensão (VDC) X Deslocamento (μm) à temperatura T1.....	112
FIGURA 4.11 - Fluxograma do procedimento adotado para monitoramento da variação sinal do extensômetro em função da temperatura dentro da máquina.....	113
FIGURA 4.12 – Ilustração do mecanismo de contato entre plano e esfera.....	115
FIGURA 4.13 – Ilustração do mecanismo para ensaio da técnica de disparo do sinal de (“Trigger”) por contato elétrico.....	116
FIGURA 4.14 – Ilustração do sistema de teste de repetitividade do contato elétrico.....	117
FIGURA 4.15 – Sistema de aquisição de dados do experimento de repetitividade de contato elétrico.....	118
FIGURA 4.16 – Estabelecimento do contato elétrico.....	119
FIGURA 4.17 –Variabilidade da posição da perda do Contato Elétrico medida pelo (“Length Gage”).....	119
FIGURA 4.18 – Conexão básica do INA-125 para amplificação de sinal proveniente de Ponte de Wheatstone.....	121
FIGURA 4.19 – Interface amplificadora desenvolvida a partir do amplificador operacional INA 125.....	122
FIGURA 4.20 – Conexão básica do sensor de temperatura.....	123
FIGURA 4.21 – Vedação do sensor de temperatura para imersão em água.....	123
FIGURA 4.22 – Fixação do sistema de medição ao eixo árvore.....	124

FIGURA 4.23 - Display digital de posição modelo ND 280	124
FIGURA 4.24 – Tela frontal do painel de instrumentação virtual desenvolvido em LabView®	125
FIGURA 4.25 – Fixação da viga em balanço à base da máquina	126
FIGURA 4.26 – Preparação para ensaio com extensômetros no centro de usinagem Mori Seiki	126
FIGURA 4.27 – Preparação para ensaios com extensômetros.	127
FIGURA 4.28 – Polimento realizado na face inferior da barra de aço mola.....	128
FIGURA 4.29 – Medição da Rugosidade da face inferior da barra de aço mola	128
FIGURA 4.30 – Montagem do sistema disparo do sinal de (“Trigger”) por contato elétrico.....	129
FIGURA 4.31 - Sistema disparo do sinal de (“Trigger”) por contato elétrico instalado no Centro de Usinagem	130
FIGURA 5.1 – Resposta do extensômetro resistivo ($G=10.000$)	132
FIGURA 5.2 – Resposta do extensômetro resistivo ($G=7.900$)	132
FIGURA 5.3 - Resposta do extensômetro resistivo ($G=1.715$)	133
FIGURA 5.4 – Resposta do extensômetro Piezoresistivo ($G=110$)	134
FIGURA 5.5 – Resposta do extensômetro Piezoresistivo ($G=508$)	134
FIGURA 5.6 – Resposta do extensômetro Piezoresistivo ($G=873$)	135
FIGURA 5.7 – Gráfico Tensão (VDC) X Deslocamento (μm) ao longo do tempo.	136
FIGURA 5.8 – Curva de calibração do extensômetro resistivo.....	137
FIGURA 5.9 - Gráfico Tensão (VDC) X Deslocamento (μm) ao longo do tempo.	138
FIGURA 5.10 - Curva de calibração do extensômetro piezoresistivo.....	138
FIGURA 5.11 – Desvio padrão observado ao longo do deslocamento (extensômetro Resistivo).....	139
FIGURA 5.12 – Desvio padrão observado ao longo do deslocamento (extensômetro Piezoresistivo).....	140
FIGURA 5.13 – Sensibilidade Térmica do extensômetro resistivo	141
FIGURA 5.14 – Sensibilidade Térmica do extensômetro piezoresistivo.....	142
FIGURA 5.15 – Variação térmica comparativa dos dois extensômetros ao longo do ensaio.....	143

FIGURA 5.16 – Resposta do extensômetro resistivo a uma entrada degrau..... 145

FIGURA 5.17 – Resposta do extensômetro resistivo a uma entrada degrau..... 146

FIGURA 5.18 – Experimento demonstrando a posição do “Length Gage” no momento do contato elétrico..... 148

LISTA DE TABELAS

TABELA 3-1 - Parâmetros obtidos para o sensor de força FSG15N1A.....	85
TABELA 3-2 - Parâmetros obtidos para o sensor de força FSSS1500NSB	88
TABELA 3-3 - Detalhamento das características dos sensores FlexiForce A201. [FONTE: TEKSCAN, (2006)]......	94
TABELA 3-4 - Avaliação sobre o uso de extensômetros no projeto	96
TABELA 3-5 - Avaliação sobre o uso de semicondutores piezoresistivos de força no projeto	97
TABELA 3-6 - Avaliação sobre o uso de semicondutores piezoresistivos de pressão no projeto.....	98
TABELA 3-7 - Avaliação sobre o uso de sensores de toque resistivos no projeto	99
TABELA 3-8 - Matriz geral de avaliação dos sensores.....	99
TABELA 5-1 – Resposta à entrada degrau – Extensômetro Resistivo	145
TABELA 5-2 - Resposta à entrada degrau – Extensômetro Piezoresistivo	147
TABELA 5-3 - Resultado do experimento 4 – posições de contato	148
TABELA 5-4 - Dados compilados para as repetições de 1 a 7 (valores em micrometros).	148
TABELA 5-5 - Dados compilados para as repetições de 8 a 14 (valores em micrometros).	149
TABELA 5-6 - Dados compilados para as repetições de 15 a 21 (valores em micrometros).	149

LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- A/D – Analógico/Digital
- AmpOp – Amplificador Operacional
- CAD – Projeto auxiliado por computador
- CAM – Manufatura auxiliada por computador
- CLP – Controlador Lógico Programável
- CMOS- Semicondutor metal-óxido complementar
- CN – Comando Numérico
- CNC – Comando Numérico Computadorizado
- DDP – Diferença de Potencial
- IHM – Interface Homem Máquina
- LPCVD - Deposição Química de Vapor a Baixa Pressão
- MMC – Máquina de medir por coordenadas
- MEMS – Sistemas micro eletromecânicos
- PDA – Assistente pessoal digital
- PECVD - Deposição Química de Vapor por Plasma
- R&R – Reetitividade e Reprodutibilidade
- TTP – Apalpadores comutadores

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	19
1.2	Estrutura da Tese	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	Extensometria	22
2.1.1	Princípio de Funcionamento dos Extensômetros Elétricos de Resistência.....	22
2.1.2	Extensômetros Piezoresistivos	25
2.1.3	Extensômetros por Deposição Direta de Vapor	27
2.1.4	Demais Tipos de Extensômetros	27
2.2	Piezoresistividade.....	28
2.2.1	O Efeito Piezoresistivo	28
2.2.2	O Processo de Fabricação de Piezoresistores.....	29
2.2.3	Especificações	31
2.3	O Sistema de Medição de Sinais Elétricos	34
2.3.1	Circuito de Medição – Ponte de Wheatstone	35
2.4	Amplificação da Tensão de Saída.....	39
2.4.1	Notação	41
2.4.2	AmpOp Ideal	42
2.4.3	Realimentação Negativa: “Closed Loop Gain”	42
2.4.4	Voltage Follower/Voltage Buffer (Seguidor de Tensão).....	43
2.4.5	Circuito Inversor.....	43
2.4.6	Circuito não Inversor	44
2.4.7	Circuito Amplificador da Diferença	44
2.4.8	Amplificador para Instrumentação	45
2.5	Sensores de Pressão e Força Piezoresistivos	47
2.6	Sensores Táteis e de Toque.....	51
2.7	Os Apalpadores.....	54
2.7.1	Características Gerais dos Apalpadores.....	55
2.7.2	Programação e Rotinas de Medição	56
2.8	Tecnologias em Uso na Geração do Sinal de Disparo.....	57
2.8.1	O “Kinematic Contact”	58
2.8.2	Extensômetros	60
2.8.3	Laser.....	62
2.8.4	Sensores Piezoelétricos	63
3	EXPERIMENTOS INICIAIS E ESCOLHA DOS SENSORES.....	65

3.1	Definição dos Subsistemas.....	65
3.2	CrITÉrios de AvaliaÇão dos Transdutores	67
3.3	PreparaÇão dos Bancos de Ensaio Iniciais	68
3.3.1	Desenvolvimento de Interfaces Amplificadoras para Sensores de Força.....	68
3.3.2	Desenvolvimento de Interfaces Amplificadoras para Extensômetros	72
3.3.3	AquisiÇão de Sinais Via LabView®	73
3.3.4	Montagem da Bancada.....	80
3.4	Extensômetros.....	81
3.5	Sensores de Força Piezoresistivos	84
3.6	Sensores de Pressão Piezoresistivos	90
3.7	Sensores de Toque Resistivos	93
3.8	Resultado da Escolha dos Transdutores	95
3.8.1	Extensômetros	95
3.8.2	Sensores de Força Piezoresistivos	96
3.8.3	Sensores de Pressão Piezoresistivos	97
3.8.4	Sensores Toque Resistivos	98
3.8.5	CompilaÇão dos Dados	99
4	MATERIAIS E MÉTODOS	100
4.1	DefiniÇão dos Parâmetros de ComparaÇão.....	101
4.2	Planejamento dos Experimentos	102
4.2.1	Extensômetros	102
4.2.1.1	Ensaio de Ajuste do Ganho e EqualizaÇão de Amplitudes	108
4.2.1.2	Levantamento das Curvas de CalibraÇão e Cálculo da Repetitividade.....	110
4.2.1.3	Levantamento da Resposta dos Transdutores a VariaÇões Térmicas	112
4.2.1.4	Levantamento da Resposta Dinâmica dos Transdutores a AplicaÇão de um Deslocamento em Degrau	114
4.2.2	Contato Elétrico.....	115
4.3	Bancos de Ensaio.....	120
4.3.1	MediÇão e Monitoramento do Sinal do Extensômetro	120
4.3.2	MediÇão e Monitoramento de Temperatura.....	122
4.3.3	MediÇão e Monitoramento do Deslocamento do Eixo rvore	124
4.3.4	Sistema de AquisiÇão de Dados	124
4.3.5	PreparaÇão dos Ensaio com Extensômetro Resistivo e Piezoresistivo no Centro de Usinagem Mori Seiki.....	125
4.3.6	PreparaÇão dos Experimentos para Determinar a Repetitividade do Sinal de Disparo via Contato Elétrico	127
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	131
5.1	Extensômetros.....	131

5.1.1	Ajuste do Ganho para Equalização de Amplitude.....	131
5.1.2	Curvas de Calibração e Repetitividade.....	136
5.1.3	Resposta dos Transdutores a Variações Térmicas.....	141
5.1.4	Resposta Dinâmica à Aplicação de um Deslocamento em Degrau.....	144
5.2	Contato Elétrico.....	147
6	CONCLUSÕES	151
6.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	153
	REFERÊNCIAS	154
	ANEXO I – CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA ATRAVÉS DE BANHO TERMOSTÁTICO	159
	ANEXO II – USINAGEM DE VIGA EM BALANÇO, SUPORTE E PINO GUIA E COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS	161
	ANEXO III – PROGRAMAÇÃO C PARA O MICROCONTROLADOR	164
	ANEXO IV – DADOS DE REPETITIVIDADE DOS EXTENSÔMETROS	166

1 INTRODUÇÃO

Segundo (YANDAYAN; BURDEKIN, 1997), métodos de inspeção automáticos podem ser a solução para o aumento da demanda por qualidade dimensional nas peças usinadas e a redução dos custos envolvidos. Tais métodos de inspeção devem ser capazes de realizar o controle dimensional durante o processo de usinagem e realimentar o sistema com as informações necessárias para as correções. Ainda segundo (YANDAYAN; BURDEKIN, 1997), a estratégia para atingir alta qualidade, produtividade e “lead times” reduzidos é trazer o controle da qualidade para próximo da máquina-ferramenta, o que pode ser atingido através da utilização de medições em processo, inspecionando as partes na medida em que são produzidas.

A utilização dos apalpadores comutadores (“Touch Trigger Probes”) acoplados às máquinas-ferramentas tem se mostrado a solução mais prática na realização do controle de processos automatizados, pois possibilita uma integração entre a ferramenta, a peça e o comando numérico. Tal integração promove soluções como: compensação de desgastes de flanco na ferramenta, detecção de quebra da ferramenta, localização automática do ponto zero, “setup” simplificado e rápido, posicionamento rápido da ferramenta, controle dimensional, realização de medições e calibrações em processo mediante as especificações de projeto, dentre muitas outras.

A possibilidade de utilização dessas funções é de extrema importância no contexto dos modelos atuais de manufatura, pois permitem o controle dimensional mais rigoroso, podendo-se até chegar ao controle peça-a-peça, garantindo que erros dimensionais sejam imediatamente detectados, diminuindo o refugo, ou minimizando as consequências de retrabalho.

1.1 Objetivos

O presente trabalho de Doutorado tem como objetivo pesquisar sensores e técnicas capazes de serem utilizadas na geração do sinal de disparo, (“Trigger Signal”), em apalpadores comutadores. Em uma fase inicial de pesquisa bibliográfica e pré-escolha de sensores e técnicas, foram determinados, através de método descrito no Capítulo Experimentos Iniciais, aqueles mais adequados ao projeto. Em

seguida foram desenvolvidos os sistemas eletrônicos necessários para a amplificação do sinal dos sensores e projetados experimentos a fim de levantar as características dos mesmos quanto a sua viabilidade para a fabricação de apalpadores capazes de realizar medições tridimensionais em um centro de usinagem CNC.

1.2 Estrutura da Tese

A presente Tese de Doutorado está dividida nos capítulos abaixo:

- **Capítulo 1: Introdução** Posiciona o leitor a respeito da importância da utilização de apalpadores nas máquinas-ferramenta perante o panorama da indústria de manufatura moderna, bem como as possíveis utilizações e vantagens no uso desse equipamento. Explica os objetivos definidos para o presente projeto e apresenta os capítulos da Tese.
- **Capítulo 2: Revisão da Literatura:** Aborda tópicos importantes relacionados ao trabalho. Os primeiros tópicos tratam de apresentar ao leitor diferentes tipos de transdutores cuja utilização se mostrou relevante ao presente trabalho, bem como a conexão por meio das pontes de Wheatstone e métodos de amplificação de sinais analógicos. É apresentado também um apanhado geral sobre acoplamentos cinemáticos, dispositivos indispensáveis no desenvolvimento de sistemas repetitivos. Finalmente, nos últimos dois tópicos, é feito um apanhado geral a respeito da utilização dos apalpadores no auxílio do Controle de Processos e da Qualidade Dimensional, percorrendo sobre seu histórico, características gerais, sua programação e rotinas de medição e as tecnologias utilizadas na geração do sinal de disparo.
- **Capítulo 3: Experimentos Iniciais e Escolha dos Sensores:** Define os subsistemas adotados para o desenvolvimento do projeto. Para auxiliar na escolha dos sensores, é apresentada uma proposta de parâmetros críticos e pesos, onde cada tecnologia recebe uma avaliação a respeito de sua utilização no presente trabalho. Através desta avaliação é feita uma pré-escolha dos sensores e sistemas mais viáveis para o desenvolvimento de apalpadores comutadores.

- **Capítulo 4: Materiais e Métodos:** Expõe os procedimentos e sistemas desenvolvidos para a realização dos experimentos afim de determinar parâmetros comparativos entre o sensor/transdutor proposto e o sistema baseado em contato elétrico.
- **Capítulo 5: Resultados e Discussão:** Trata de descrever os resultados dos ensaios realizados e traçar comparações entre as tecnologias afim de posicionar o sistema proposto em comparação com o existente atualmente.
- **Capítulo 6: Conclusões:** Apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A pesquisa que se segue visa prover ao projeto os conhecimentos necessários para seu bom desenvolvimento. Inicialmente são apresentados transdutores cuja utilização para o presente projeto se mostrou mais adequada durante toda a fase de pesquisa bibliográfica. Em seguida são apresentadas as pontes de Wheatstone e as técnicas utilizadas para amplificação de sinais analógicos.

Por fim são apresentados os Apalpadores comutadores, seu funcionamento, utilização e os sistemas existentes atualmente.

2.1 Extensometria

Uma abordagem sobre os extensômetros, do inglês “strain gages”, torna-se necessária para esse trabalho devido à sua importância, relevância e base para o desenvolvimento de métodos mais modernos. Tais sensores ainda são extensivamente utilizados nos dias de hoje em aplicações que vão de balanças eletrônicas de alta precisão e células de carga, à medição de tensões e deformações em edifícios, aeronaves, obras arqueológicas, dentre outros.

2.1.1 Princípio de Funcionamento dos Extensômetros Elétricos de Resistência

Segundo (HOFFMANN, 1989), na segunda metade da década de 1930, dois pesquisadores trabalhando separadamente, Edward E. Simmons e Arthur Claude Ruge, voltaram sua atenção para um fenômeno descoberto quase um século antes, em 1843, por Charles Wheatstone. Tratava-se da observação de que havia uma variação da resistência de um condutor elétrico quando o mesmo era submetido à aplicação de tensões.

Simmons, que trabalhava na Califórnia, desenvolveu um equipamento elétrico utilizando uma fina resistência para medir a força exercida em um corpo de prova em uma máquina de teste de impacto.

Ruge, que trabalhava no instituto de sismologia do Massachusetts Institute of Technology, queria medir as tensões geradas durante suas simulações de terremotos. Ele utilizou um fio elétrico dobrado repetidas vezes que foi então colado

em um tecido. Para investigar as propriedades do protótipo, ele colou o tecido no local de estudo do simulador de terremotos e comparou os resultados com aqueles obtidos através do método tradicional de análise do simulador. Foi então observada uma ótima correlação e linearidade dos valores sobre toda a faixa de medição, tanto no campo positivo quanto no campo negativo.

HOFFMANN (1989) afirma que a grande vantagem do sistema desenvolvido por Ruge se deve ao fato de que o mesmo proporciona um método bastante exato, não destrutivo, simples e muito eficaz de se medir as tensões, bastando para isso fixar um pequeno fio na superfície que se quer analisar, criando-se um sistema independente, não interferente no processo.

Segundo HANNAH e REED (1992), o princípio de funcionamento dos extensômetros tem como base a variação da resistência elétrica de um condutor que é submetido a uma deformação, princípio descoberto por Wheatstone e Thomson em 1843 e 1856. Tal variação de resistência é devida à deformação do condutor e a mudança da resistividade do material devido a variações microestruturais. Esse processo é descrito pela Equação 2.1

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon(1 + 2\gamma) + \frac{d\rho}{\rho}$$

Equação 2.1

Onde,

R= Resistência elétrica

ρ = Resistividade elétrica do material

γ = coeficiente de Poisson

ε = deformação

Costuma-se representar a sensibilidade global do extensômetro (K_g) pela razão entre a variação da resistência e a deformação. A essa variável dá-se o nome de fator de sensibilidade ("gage-factor").

Tem-se assim:

$$K_g = \frac{dR/R}{\varepsilon_a}$$

Equação 2.2

Onde,

R = Resistência elétrica

ϵ_a = deformação do material segundo a direção principal do extensômetro.

Os extensômetros são construídos com resistências elétricas típicas de 120 e 350 Ω .

Os extensômetros são habitualmente colados às superfícies nas quais se pretende medir as deformações, FIGURA 2.1. A cola deve possuir características que permitam uma boa adesão do extensômetro à superfície; não deve ser demasiado rígida de modo a impedir a deformação do material onde se cola o extensômetro.

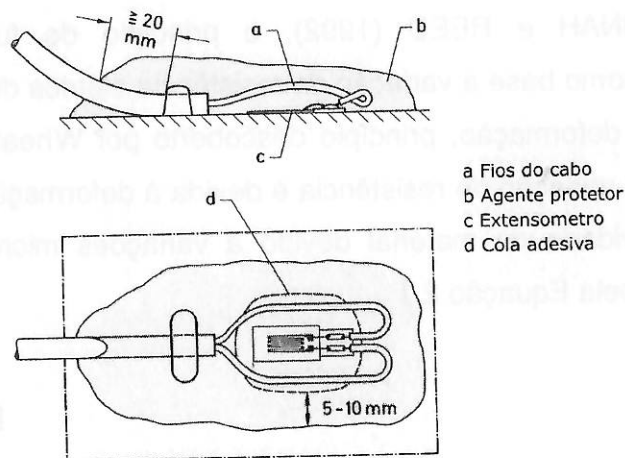


FIGURA 2.1 - Representação de um extensômetro colado e devidamente protegido

A seguir, FIGURA 2.2, exemplifica-se a utilização de extensômetros em testes de torção de tubos de fibra de carbono.

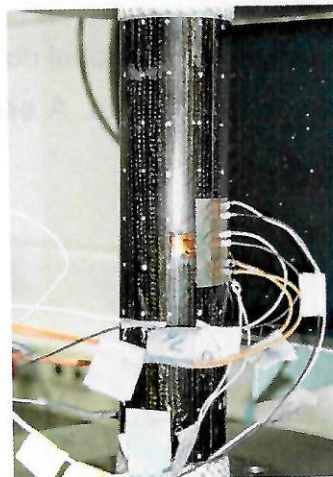


FIGURA 2.2 – Extensômetros utilizados em teste de torção em tubos de Carbono

O sistema desenvolvido naquela época é basicamente o mesmo que os utilizados nos dias de hoje. Durante as últimas décadas, várias modificações foram apresentadas, visando à facilidade de produção em larga escala, (HANNAH; REED, 1992).



FIGURA 2.3 – Exemplos de extensômetros disponíveis comercialmente [FONTE: HBM (2006)]

A utilização de circuitos impressos estendeu ainda mais as possibilidades de uso dos extensômetros, possibilitando o desenho das trilhas em qualquer formato que possa ser representado em um plano. Formas espirais podem ser facilmente reproduzidas, facilitando o desenvolvimento de transdutores para medição de variáveis mecânicas como forças, pressão, torque, dentre outras.

Segundo as técnicas usuais e mais estabelecidas (HANNAH; REED, 1992), sua utilização requer o uso de circuitos de amplificação e ajuste de ganho, técnicas de compensação de variações térmicas, circuito de análise de sinal e filtragem de ruído e fonte externa de alimentação. Outra informação muito difundida desde a década de 60 é que os extensômetros consomem uma quantidade razoável de corrente, pois sua resistência elétrica é relativamente baixa, (na faixa de algumas centenas de ohms), sendo seu uso inadequado em aplicações que requerem portabilidade.

Além dos extensômetros elétricos de resistência apresentados, outros demais tipos de extensômetros existentes são apresentados a seguir.

2.1.2 Extensômetros Piezoresistivos

IVCHENKO et al. (1975), em sua pesquisa, afirmam que, além dos extensômetros elétricos de resistência, já discutidos, existem outros tipos de

extensômetros resistivos, dentre os quais se encontram os extensômetros semicondutores. Seu princípio de medição é baseado no efeito piezoresistivo, descoberto em alguns semicondutores por C. S. Smith em 1954 e detalhado em seus pormenores no capítulo Piezoresistividade.

No que se refere à construção, esses extensômetros não diferem muito dos extensômetros tradicionais. O elemento sensor consiste de uma tira de silício^(a) de alguns décimos de milímetro de comprimento e alguns milésimos de milímetro de largura, que é fixada em um filme isolante^(b) onde são colados os fios para conexão^(d). Pequenos fios de ouro^(c) são utilizados para conectar o elemento semicondutor, evitando a criação de um diodo, FIGURA 2.4.

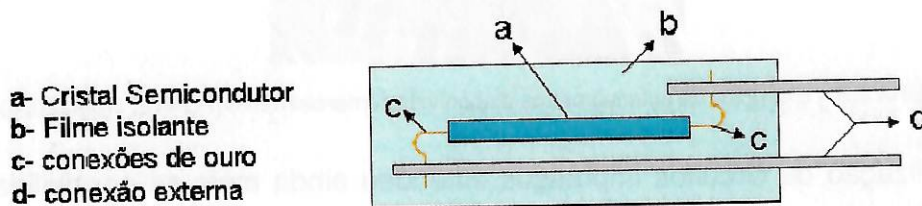


FIGURA 2.4 - Diagrama representativo de um extensômetro semicondutor [FONTE: HOFFMANN (1989)]

O fator de sensibilidade, "Gage Factor", desse tipo de extensômetro é da ordem de 50 a 80 vezes maior que os extensômetros elétricos de resistência. Por essa razão, sua principal aplicação se dá na medida de variáveis de pequena grandeza.

Abaixo, são apresentadas algumas características dos extensômetros piezoresistivos:

- Alta sensibilidade;
- Alta imunidade a ruídos elétricos e magnéticos;
- Apresenta características de não-linearidade demandando correção eletrônica quando se deseja alta exatidão de medições;
- São normalmente mais caros do que os extensômetros elétricos de resistência;
- São mais sensíveis a variações de temperatura do que os extensômetros tradicionais;
- São de difícil manuseio devido à fragilidade dos cristais semicondutores.

2.1.3 Extensômetros por Deposição Direta de Vapor

Esse tipo de extensômetro é formado a partir de técnicas de deposição química de vapor de algumas ligas sob vácuo. Assim, o elemento sensor é diretamente depositado sobre a superfície onde se deseja realizar a medição, (BRAY; VALABREAGA, 1964).

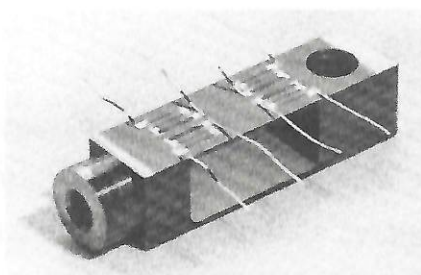


FIGURA 2.5 - Extensômetro depositado diretamente no corpo de um transdutor [FONTE: HOFFMANN (1989)]

Segundo (IVCHENKO et al., 1975), a substituição da camada de cola pela camada diretamente depositada proporciona vantagens como: redução de sensibilidade à umidade, aumento da faixa de operação e estabilidade a altas temperaturas e eliminação do efeito do extensômetro na deformação do objeto.

Ainda segundo (IVCHENKO et al., 1975), a deposição direta do extensômetro no objeto permite sua redução dimensional até a ordem de 10X em comparação com extensômetros comerciais fixados por cola e proporcionam um aumento na exatidão de posicionamento dos mesmos sobre o objeto.

Uma desvantagem desta técnica, de acordo com (DJUGUM, 2006) é o seu processo de fabricação que é bastante demorado e, conseqüentemente, custoso. Antes da deposição do fio metálico, é necessária a deposição de uma camada isolante. A deposição desta camada através dos processos atuais requer tipicamente horas até a obtenção de uma camada de (4-7 μ m) que é necessária.

2.1.4 Demais Tipos de Extensômetros

Além dos tipos de extensômetros apresentados, são citados a seguir modelos especialmente desenvolvidos para aplicações específicas:

- Extensômetros Capacitivos: Utilizados para altíssimas temperaturas não suportadas por metais;

- Extensômetros Piezelétricos: Construídos a partir de Titanato de Bário, trata-se de um elemento ativo, capaz de gerar separação de cargas elétricas quando submetido a tensões. (Não adequado para cargas estáticas)
- Extensômetros Fotoelásticos: Variações na reflexão óptica de um elemento são detectadas em função da aplicação de deformação ao material.

2.2 Piezoresistividade

Neste capítulo são tratados temas relacionados aos sensores piezoresistivos. De acordo com (SINGH et al., 2002), da mesma forma como ocorre com os extensômetros, os piezoresistores sofrem variações na sua resistividade de acordo com a aplicação de uma deformação mecânica.

Por esse motivo, a utilização desse efeito na fabricação de transdutores requer a utilização de Pontes de Wheatstone para amplificação da tensão de saída e os sensores apresentam parâmetros similares, como “Gage Factor”, sensibilidade a variações térmicas, histerese, “drift”, dentre outros, fatores estes que serão detalhados no item 2.2.3, Especificações.

A seguir são detalhadas as características do efeito piezoresistivo, os processos mais difundidos de fabricação de piezoresistores e sua integração para fabricação de transdutores, bem como as principais especificações técnicas desses elementos sensores.

2.2.1 O Efeito Piezoresistivo

GARCIA (2006) afirma que a piezoresistência é uma propriedade observada em alguns materiais, como metais, silício mono-cristalino, poli-cristalino e amorfo, onde a resistividade do material é influenciada pelo estresse mecânico aplicado. Desde que foi descoberto, o efeito piezoresistivo observado no silício mono-cristalino foi amplamente estudado (TUFTE, 1963) e muitos trabalhos sobre suas aplicações foram publicados (GIELES, 1969).

BRIZEC (1996) diz que as primeiras aplicações comerciais de sistemas Micro-Eleto Mecânicos (MEMS) se deu pela indústria de biomedicina, sendo rapidamente incorporada por diversos outros ramos da indústria sensores, equipamentos eletrônicos, automação, dentre outras.

Sensores baseados em MEMS são atualmente componentes cruciais na indústria automotiva, de equipamentos médicos, telefones celulares, “PDAs”, “hard disks”, dentre outros, sendo encontrados até em cartuchos de impressoras a jato de tintas e tênis “inteligentes”.

Segundo (MIDDELHOEK et al., 1995), a maioria dos sensores mecânicos fabricados comercialmente nos dias de hoje são baseados no efeito piezoresistivo.

Ainda segundo (GARCIA, 2006), os principais motivos pelo qual os sensores piezoresistivos são amplamente utilizados nos dias de hoje recaem sobre as vantagens apresentadas, como alto fator de sensibilidade, podendo atingir valores centenas de vezes superiores aos verificados em materiais metálicos.

Outro fator que favorece a utilização de piezoresistores se deve ao fato dos mesmos apresentarem valores nominais de resistência muito superiores aos extensômetros (da ordem de dezenas de quilo ohms contra centenas de ohms, respectivamente). Devido a esse fato, os sensores piezoresistivos apresentam um consumo de corrente muito inferior aos extensômetros, o que faz deles uma ótima opção para aplicações onde o consumo de energia é crítico, como aplicações que utilizam pilhas e baterias.

2.2.2 O Processo de Fabricação de Piezoresistores

De acordo com (KANÉ et al., 1995), uma nova gama de aplicações se abriu na década de 1990 em decorrência do desenvolvimento de micro-sistemas nos quais sensores, atuadores e circuitos eletrônicos são combinados. O desenvolvimento de sensores de silício integrados com processamento eletrônico de sinal é um passo importante na integração e oferece novas oportunidades de miniaturização, redução de custo e aumento de performance.

O termo utilizado para esses sistemas integrados é comercialmente tido como MEMS, do inglês “Micro-ElectroMechanical Systems” ou sistemas Micro-Eletromecânicos. Esses dispositivos utilizam componentes micrométricos que são capazes de sentir com altíssima precisão, processar e/ ou controlar o ambiente que os cerca. Alguns dos benefícios dessa tecnologia são:

- Baixo Custo;
- Baixo Consumo;

- Miniaturização;
- Desempenho;
- Integração.

Conforme afirma (BALTES, 1993), outra vantagem importante dos sensores piezoresistivos é que parte do seu processo de fabricação é compatível com a tecnologia de fabricação de circuitos integrados, o que inclui os processos CMOS padrão.

Basicamente, dois processos distintos são usados na fabricação de sensores baseados em MEMS: “Surface Micromachining” e “Bulk Micromachining”.

Segundo (FREESCALE SEMICONDUCTOR(a), 2007), no processo denominado “Surface Micromachining”, os sensores são formados no topo de um conjunto de camadas, que são “montadas” através da deposição de filmes finos. De acordo com (RESNIK et al., 2005), esses filmes normalmente são feitos por deposição química de vapor por plasma (PECVD) ou deposição química de vapor a baixa pressão. (LPCVD).

Esses materiais depositados consistem da parte estrutural usada para a formação do sensor e das camadas para definir os espaçamentos entre condutores. Muitos desses sensores usam transdutores capacitivos para converter um sinal mecânico em um equivalente sinal elétrico. Nesse método, o sensor pode ser considerado como sendo um capacitor onde uma das placas se move mediante a aplicação de um estímulo físico. Essa variação no espaçamento entre os dois eletrodos gera uma variação da capacitância proporcional ao estímulo, FIGURA 2.6.

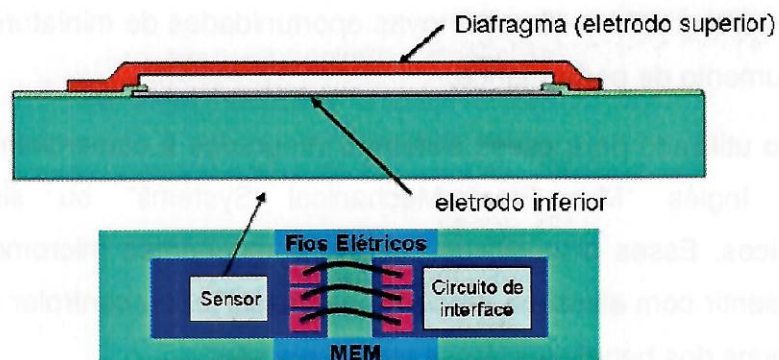


FIGURA 2.6 – Fabricação de MEMS pelo processo denominado “surface Micromachining” [FONTE: FREESCALE SEMICONDUCTOR(a), (2007)]

No processo denominado (“Bulk Micromachining”), ou micro-usinagem em volume, uma estrutura de silício é “corroída” para formar um elemento tridimensional. Um agente de “corrosão” úmido (“wet etching”) como Hidróxido de Potássio, EDP (solução aquosa de etilenodiamina e pirocatechol) ou TMAH (Hidróxido de tetrametilamoníaco) ou, alternadamente, um processo de “corrosão” seco usando, por exemplo o gás SF₆ é usado para gravar estruturas em 3D diretamente no wafer de silício, (MANDOU, 2002).

Ainda segundo (FREESCALE, SEMICONDUCTOR(a), 2007), trata-se de um processo subtrativo, no qual o silício é seletivamente removido utilizando processos químicos anisotrópicos. Utilizando esse método, MEMS como, por exemplo, sensores de pressão piezoresistivos puderam ser fabricados em alto volume. Na sua implementação mais simples, o silício é removido em certas áreas para formar um diafragma.

2.2.3 Especificações

Segundo (ELWENSPOEK; JANSEN, 1999), ao contrário do que ocorre com a maioria dos metais, o silício apresenta um comportamento linear até a fratura e não exibe o efeito de histerese típico da deformação plástica. A histerese apresentada nos sensores piezoresistivos se deve à incompatibilidade térmica entre o silício e os materiais utilizados na montagem e encapsulamento do sensor, sendo muitas vezes desprezível.

FRAGA (2005), diz que no projeto de um sensor piezoresistivo, é imprescindível analisar o efeito da não linearidade que, geralmente, é decorrente dos seguintes fatores:

- Em semicondutores, observa-se que os coeficientes de piezoresistência variam com a temperatura e concentração de dopantes. Quanto maior a temperatura e a dopagem, menor o fator de sensibilidade associado ao resistor (KANANDA, 1982).
- Grandes deflexões mecânicas provocam efeitos de não linearidade. No caso de membranas finas de silício, os grandes deslocamentos e os esforços de tensão provocam não linearidades geométricas.
- Não linearidades advindas da ponte de Wheatstone, como, diferença de sensibilidade das resistências que constituem a ponte, mudança da resistência

em decorrência de pressão / força aplicada em elementos implantados ou difundidos no diafragma.

Ainda de acordo com (FRAGA, 2005), os parâmetros que definem a sensibilidade de um sensor piezoresistivo são o tamanho do diafragma e a dopagem.

Sensores piezoresistivos apresentam ainda sensibilidade à variação térmica. O coeficiente piezoresistivo indica a variação relativa da resistividade devido ao esforço aplicado. Em semicondutores muito dopados, existem muitos portadores livres nas bandas de condução e, por esse motivo, a variação da resistividade é menor. No silício pouco dopado, o número de portadores livres depende da temperatura, pois há a geração de pares elétrons-lacunas quando do aumento da temperatura, (BELTRÁN, 2003). Desta forma, o efeito da temperatura é maior em sensores com baixo nível de dopagem.

Segundo (HAGEN, 2001), a especificação de sensores piezoresistivos geralmente requer que certos aspectos do projeto não sejam violados. O exemplo mais simples é a pressão de operação de um sensor de pressão, que geralmente é uma especificação de alta prioridade. Com o advento dos processos de micro-usinagem, é possível considerar uma ampla faixa de pressões disponíveis para a escolha do usuário. Além da pressão de operação, outros critérios como sensibilidade, tamanho, custo, exatidão, estabilidade térmica, confiabilidade e compatibilidade devem ser levadas em consideração.

Ainda segundo (HAGEN, 2001), exatidão e estabilidade térmica têm se mostrado os fatores mais complexos a se gerenciar na escolha de sensores piezoresistivos. Cada fabricante descreve e especifica a exatidão de seus sensores de maneira diferente, que necessitam de conversão para tornar possível uma comparação justa.

A seguir é apresentada uma lista que explica as definições para os parâmetros mais comuns utilizados na especificação de sensores piezoresistivos: (FREESCALE SEMICONDUCTOR(a), 2007), (FREESCALE SEMICONDUCTOR(b), 2007), (HAGEN, 2001) e HONEYWELL (2008).

- Tensão Máxima de Saída, ou ("Full Scale Output"): É a medida da tensão apresentada na saída do sensor quando a máxima pressão/força é aplicada.

- Variação Máxima de Saída, ou (“Full Scale Span”): É a diferença algébrica entre a tensão apresentada na saída do sensor quando sujeito à máxima pressão/força e quando sujeito à mínima pressão/força permitida.
- Tensão de offset, ou (“Zero Pressure/Force Offset”): Trata-se da tensão de saída apresentada pelo sensor à 25° C, sem nenhuma pressão/força aplicada e respeitando-se as tensões de excitação do catálogo. Tipicamente é expressa em milivolts. Um aumento na tensão de alimentação ou corrente resulta em maior offset. De acordo com (BELTRÁN, 2003), Tensão de Offset existe devido à diferença entre a geometria e a concentração de impurezas das resistências que constituem o sensor. Outra causa é o stress induzido pelo encapsulamento.
- Histerese em Zero, ou (“Pressure/Force Hysteresis of Zero”): É a medida da repetitividade do zero quando o sensor é submetido a um ou mais ciclos para atingir a pressão/força máxima permitida. A unidade é normalmente expressa em termos da porcentagem em relação à saída apresentada à pressão/força máxima. Diferentes fabricantes de sensores podem utilizar diferentes números de ciclos e faixas de pressão/força máxima para o cálculo desse parâmetro.
- Variação da Histerese com a Pressão/Força ou “Span Pressure/Force Hysteresis”: É a medida da diferença da saída apresentada pelo sensor quando submetido a dois ou mais ciclos de pressão/força. O valor usualmente expressa a maior variação ocorrida, em termos da porcentagem em relação à saída apresentada à pressão/força máxima.
- Variação da Histerese com a Temperatura ou “Span Temperature Hysteresis”: É a medida da repetitividade da saída do sensor quando submetido à ciclos de variações térmicas. Em outras palavras, o sensor é submetido à máxima e mínima temperatura suportada. A diferença de leitura apresentada entre dois ou mais ciclos é a variação da histerese com a temperatura. O valor usualmente expressa a maior variação ocorrida, em termos da porcentagem em relação à saída apresentada à pressão/força máxima
- Derivação ou “Drift”: É a variação apresentada no sinal de saída de um dispositivo ao longo do tempo quando a entrada é nula e a temperatura é mantida constante.

2.3 O Sistema de Medição de Sinais Elétricos

As variações das resistências dos extensômetros são muito pequenas e não podem ser medidas diretamente. Desta maneira os extensômetros devem ser incluídos em um sistema de medição, conforme ilustra a FIGURA 2.7 a seguir.

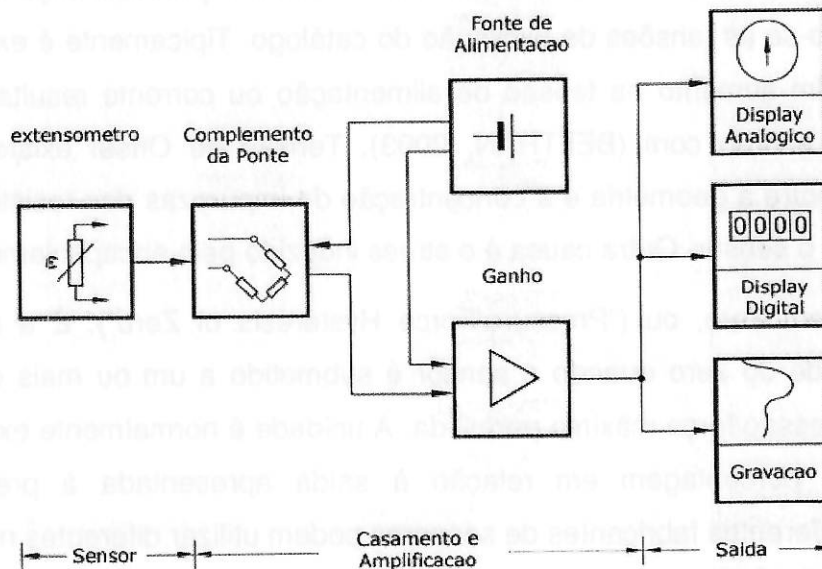


FIGURA 2.7 - Diagrama de um sistema de medição para extensômetros. [FONTE: HOFFMANN, (1989)]

A primeira parte do sistema (sensor) é formada pelo próprio extensômetro, que converte uma deformação mecânica em variação de uma resistência elétrica.

A segunda parte do sistema (Casamento e Amplificação) é composta pelo complemento da ponte de Wheatstone (tendo o extensômetro conectado ao braço livre da ponte), circuito de Amplificação do sinal da ponte (amplificação esta, ajustada através do Ganho) e fonte externa de alimentação. No sentido físico, os elementos extensômetro, complemento da ponte e circuito de amplificação são componentes passivos, de forma que é necessária a adição de uma fonte de alimentação para a obtenção de um sinal. Essa fonte é obtida a partir de uma fonte externa de tensão ou corrente constante que alimenta tanto o circuito em ponte quanto circuito de amplificação.

A terceira parte do sistema (Saída) é composta pelos displays, capazes de converter a saída do amplificador de uma forma que possa ser entendida pelo usuário e sistema de aquisição dos dados para gravação.

A descrição do sistema de medição acima destaca apenas os elementos essenciais. Na prática, freqüentemente são adicionados demais componentes como scanners, sistemas de gravação de picos e vales, limitadores de curso, sistemas eletrônicos de processamento de sinais, dentre outros.

Nos itens que se seguem os componentes do sistema de medição serão detalhados.

2.3.1 Circuito de Medição – Ponte de Wheatstone

Segundo (BECKWITH et al., 1995), uma das formas de efetuar a medição do valor da resistência de um extensômetro consiste na utilização de uma ponte de Wheatstone. A FIGURA 2.8 representa a ilustração elétrica da mesma.

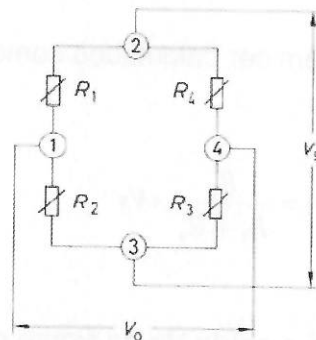


FIGURA 2.8 - Extensômetro em uma ponte de Wheatstone [FONTE: HOFFMANN, (1989)]

Esse circuito possibilita a medição da variação da resistência elétrica do extensômetro com grande precisão. Os quatro braços da ponte são formados pelas resistências R_1 a R_4 . Os pontos 2 e 3 da ponte se destinam a conexão da fonte de alimentação V_s , enquanto a tensão de saída, ou sinal de medição, é capturada entre os pontos 1 e 4.

Usualmente é utilizada uma tensão DC estabilizada como fonte de alimentação da ponte (V_s), porém existem métodos que utilizam fonte de tensão alternada ou aplicam uma corrente constante. A aplicação de uma tensão DC estabilizada é preferida pela característica de correção automática de desvios de linearidade dos extensômetros.

A tensão V_s aplicada aos pontos 2 e 3, eletricamente divide a ponte em duas partes, formadas por R_1 , R_2 e R_4 , R_3 , conforme a relação entre as resistências. Isto

significa que cada metade de ponte forma um divisor de tensões, a seguir, FIGURA 2.9.

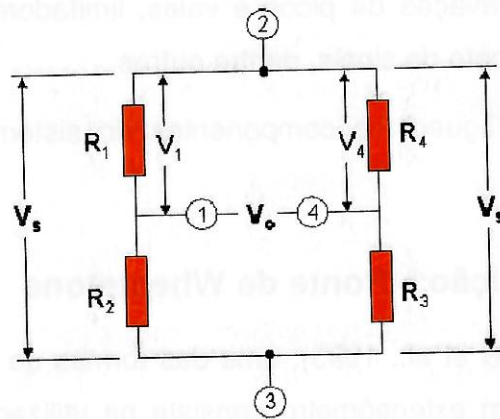


FIGURA 2.9 - Princípio de funcionamento de uma ponte de Wheatstone [FONTE: HELFRICK e COOPER, (1989)]

Os valores de V_1 e V_4 podem ser calculados como:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_s \quad \text{e} \quad V_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times V_s \quad \text{Equação 2.3}$$

A diferença entre V_1 e V_4 é a saída V_o da Ponte de Wheatstone:

$$V_o = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = V_s (V_1 - V_4) \quad \text{Equação 2.4}$$

Se o desbalanceamento da ponte é definido como V_o/V_s , temos:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \text{ou} \quad \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1 \times R_3 - R_2 \times R_4}{(R_1 + R_2) \times (R_3 + R_4)} \quad \text{Equação 2.5}$$

Desta forma, só existem duas condições em que $V_o=0$:

- Quando todos os resistores possuírem o mesmo valor
- Quando a relação entre R_1 e R_2 for igual à relação entre R_4 e R_3 .

Nessas condições, diz-se que a ponte está balanceada.

Se qualquer um dos quatro resistores sofrerem uma variação ΔR em sua resistência, a ponte estará desbalanceada e aparecerá uma diferença de potencial V_o entre os pontos 1 e 4.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \quad \text{Equação 2.6}$$

Qualquer condição da ponte pode ser calculada com base na equação acima independentemente do valor das resistências, porém, nas técnicas empregadas em extensômetros, todos os elementos da ponte devem possuir a mesma resistência elétrica ou, pelo menos, o braço formado por R_1 e R_2 e o braço formado por R_3 e R_4 devem possuir, na sua soma, o mesmo valor nominal.

Nos extensômetros elétricos de resistência, a variação da resistência elétrica é baixa, da ordem de $10^{-3}\Omega$. Dessa maneira, a aproximação proposta pela Equação 2.7 é bastante usada, promovendo resultados suficientemente acurados, (HELFRICK; COOPER, 1989):

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \left(\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) - \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right) + \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} \right) - \left(\frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right) \quad \text{Equação 2.7}$$

A equação acima mostra que a variação entre as resistências dos braços da ponte é o fator predominante do seu desbalanceamento, e não a variação absoluta da resistência. Além disso, a equação mostra que qualquer uma das resistências pode variar. Essa situação ocorre, por exemplo, nos transdutores de força. Em análises de deformação, isso dificilmente é utilizado e usualmente apenas alguns dos braços da ponte contém extensômetros ativos enquanto o restante da ponte é completado com resistores.

Da equação Equação 2.2 que define o fator de sensibilidade ("gage factor"), tem-se que:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \times \varepsilon \quad \text{Equação 2.8}$$

De forma que a Equação 2.7 pode ser escrita como:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad \text{Equação 2.9}$$

Desta forma, verifica-se que as mudanças de resistência e a deformação que as causam contribuem para o desbalanceamento da ponte e daí para o resultado da medição, com diferentes sinais. Na montagem de extensômetros visando à medição de deformações, os seguintes efeitos devem ser observados:

- A indicação será positiva se: $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ e/ou $\varepsilon_3 > \varepsilon_4$
- A indicação será negativa se: $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ e/ou $\varepsilon_3 < \varepsilon_4$

A magnitude das variações em extensômetros localizados em braços adjacentes da ponte é subtrativa se tiverem o mesmo sinal. Esse efeito é utilizado, por exemplo para a realização compensação térmica.

A magnitude das variações em extensômetros localizados nos braços adjacentes da ponte é somada se tiverem sinais opostos. Esse efeito é utilizado, por exemplo, em transdutores.

Abaixo, FIGURA 2.10, são apresentadas as diferentes formas de utilização de extensômetros nas pontes, bem como sua designação:

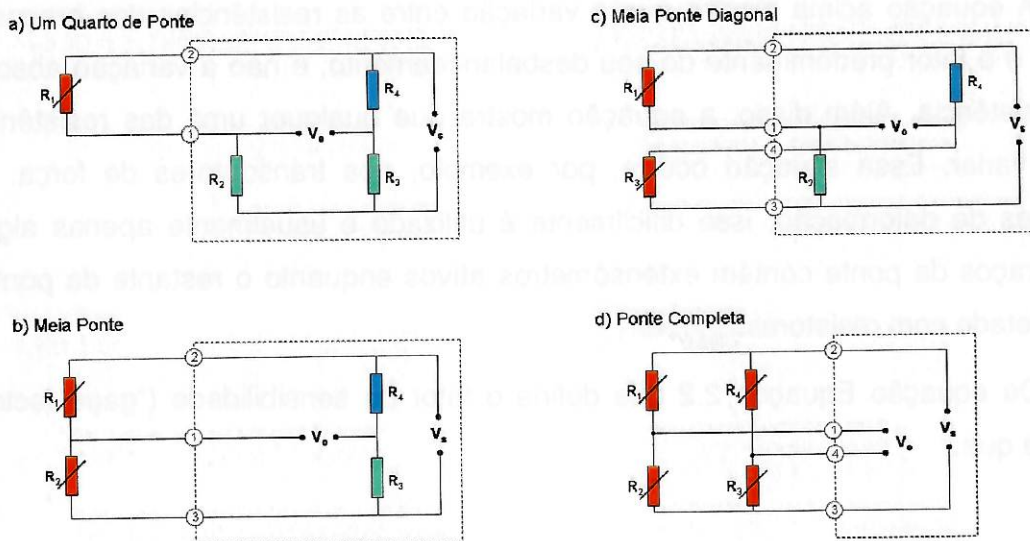


FIGURA 2.10 - Tipos de pontes de Wheatstone [FONTE: HELFRICK e COOPER, (1989)]

Para completar a ponte de Wheatstone, é necessária a adição de resistores com características como: grande estabilidade ao longo do tempo e insensibilidade a variações de temperatura. Resistências de filmes metálicos são componentes úteis nesses casos. Outro método bastante empregado em detrimento à adição de componentes passivos é a utilização de extensômetros de compensação no lugar das resistências. Inseridos estrategicamente, de modo a não sofrer alterações mecânicas, esses elementos estarão sujeitos às mesmas variações térmicas que o extensômetro de medição, agindo como elemento de compensação de variações de temperatura.

CHAVÉZ et al. (1997) afirmam que a configuração mais utilizada para a amplificação de sensores resistivos é em forma de ponte de Wheatstone. Desta maneira as resistências são colocadas de modo que duas aumentem o seu valor e as outras duas diminuam o seu valor com o aumento da deformação. O sinal de saída é a tensão diferencial à saída da ponte. De forma similar, pode se construir uma ponte ativa utilizando um amplificador operacional totalmente diferencial com a vantagem que a sensibilidade é o dobro da ponte de Wheatstone.

HABERKAMP (1993) afirma que a configuração de meia ponte também tem sido utilizada, com a desvantagem que a sensibilidade é a metade de uma ponte completa, embora seja empregada associada a configurações que permitem determinado grau de compensação. Tanto a ponte quanto a meia ponte podem ser alimentadas com tensão ou com corrente, dependendo do circuito de processamento do sinal e do tipo de compensação utilizada.

2.4 Amplificação da Tensão de Saída

De acordo com (SEDRA; SMITH, 2004), a função principal dos amplificadores é aumentar o valor apresentado na saída da ponte de Wheatstone (V_o) de alguns milivolts para valores em torno de alguns volts. O sinal amplificado deve, se possível, ser a reprodução “perfeita” da variável medida. Outras funções do circuito de amplificação são o ajuste do zero (“zero signal”), ajuste da tensão de fundo de escala (“full scale output”), compensação de temperatura, calibração e complementação do circuito da ponte.

Atualmente o método mais utilizado para a amplificação de sinais é a utilização de amplificadores operacionais.

Amplificadores operacionais, também referidos como “AmpOps”, são dispositivos extremamente versáteis, sendo aplicados vastamente na indústria eletrônica, cumprindo funções de condicionamento de sinais, funções de transferência especiais, instrumentação analógica, computação analógica e projeto de sistemas especiais. Estes circuitos são caracterizados pela sua simplicidade e precisão, (GEIGER; ALLEN; STRADER, 1990). O seu custo é baixo e, atualmente, são projetados tendo em vista a durabilidade: muitos são construídos com circuitos de proteção, de forma a suportar sobrecargas de corrente em suas saídas sem sofrer danos.

A origem do termo “amplificador operacional” remonta à época da computação analógica, quando estes circuitos eram utilizados para a realização de cálculos matemáticos. Dependendo da disposição de componentes elétricos externos (resistores, capacitores, indutores, etc.), conseguiam-se realizar operações de adição, subtração, média, e até mesmo integração e diferenciação de uma função. Isso tudo era viabilizado pelo uso da “realimentação negativa” do amplificador operacional, que, associado ao inerente alto fator de amplificação sem realimentação (open loop gain), era capaz de produzir um ganho finito em malha fechada (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

Hoje, mesmo com o advento da computação digital, a computação analógica ainda é bastante empregada para a realização de simulações em tempo real. Isto é possível devido à correlação de “fenômenos do mundo real” – elasticidade, inércia e amortecimento para sistemas mecânicos, por exemplo; inércia fluídica, capacitância fluídica e perda de carga para sistemas fluídicos e capacitância e resistência térmicas para sistemas térmicos – com os fenômenos básicos de indutância, capacitância e resistência elétrica. Além disso, obviamente, estes circuitos também são comumente utilizados para a amplificação de sinais elétricos em aplicações de instrumentação e controle de sistemas. Estas áreas utilizam-se de muitos sensores, que geralmente emitem saídas da ordem de milivolts, inadequados para a maioria dos sistemas de processamento existentes, usualmente compatíveis com tensões de 3,3 a 5 Volts.

2.4.1 Notação

O símbolo que identifica um AmpOp é um triângulo com seis terminais: há duas entradas de sinal – uma negativa, que inverte o sinal ligado a ela e outra positiva que mantém o sinal original. Além disso apresenta uma saída, um pino de referência (aterramento) e dois terminais de alimentação, geralmente ligados a +VCC e -VCC. Em um circuito sem realimentação, a saída do amplificador está em função da diferença de tensão entre as duas entradas.

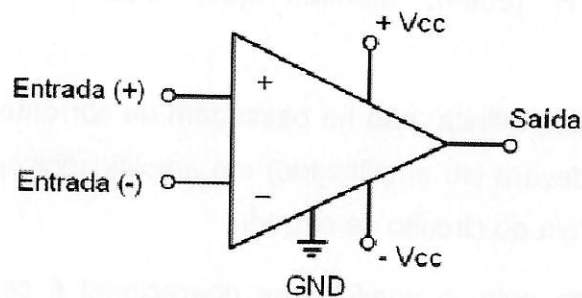


FIGURA 2.11 - Esquema básico de um amplificador operacional

Internamente, o circuito de um amplificador operacional é uma complexa associação de inúmeros componentes eletrônicos como transistores, resistores, capacitores e diodos. Entretanto, o estudo da aplicação destes dispositivos é simplificado através do modelo esquematizado abaixo, FIGURA 2.12:

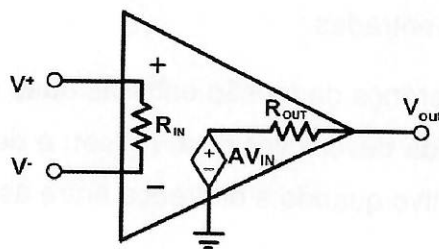


FIGURA 2.12 - Representação simplificada do circuito interno de um amplificador operacional.

Onde:

R_{in} = Resistência de entrada

AV_{in} = Ganho sem realimentação (open loop gain)

R_{out} = Resistência de saída

$V_{in} = (V^+ - V^-)$

Sendo V^+ e V^- , respectivamente, as entradas não inversora e inversora e V_{out} , a saída do amplificador operacional.

Assim, segundo (GEIGER; ALLEN; STRADER, 1990), tem-se:

$$V_{out} = A \cdot V_{in}$$

$$V_{out} = A \cdot (V^+ - V^-)$$

Equação 2.10

2.4.2 AmpOp Ideal

SEDRA e SMITH (2004), afirmam que, idealmente, um amplificador operacional possui:

- Resistência de entrada infinita: não há passagem de corrente entre o circuito de entrada (cujo sinal deverá ser amplificado) e o amplificador operacional, ou seja, não há fuga de energia do circuito de entrada.
- Resistência de saída nula: o amplificador operacional é capaz de suprir toda corrente demandada pelo circuito de saída (que receberá o sinal amplificado – um microcontrolador, por exemplo), sem que isto acarrete alterações no valor de V_{out} (representada pela queda de tensão em R_{out}).
- Ganho A infinito.
- Tempo de resposta nulo: a saída do amplificador varia imediatamente de acordo com mudanças nas suas entradas.
- Offset nulo: quando a diferença de tensão entre as duas entradas do amplificador operacional é nula, a saída deverá ser nula. (offset: é definido como o desvio no valor da saída do dispositivo quando a diferença entre as suas entradas é nula)

2.4.3 Realimentação Negativa: “Closed Loop Gain”

A linearidade e a flexibilidade dos amplificadores operacionais estão diretamente relacionadas ao seu uso com realimentação negativa. Neste caso, a saída do amplificador, V_{out} , estará em função de si mesma, sendo ligada, a V . Verifica-se que, matematicamente, a presença de V_{out} nas entradas gera um fator

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

com realimentação negativa “closed loop gain” finita e controlável, diferentemente do fator A infinito, nos circuitos “open loop”.

Em circuitos com realimentação negativa, o amplificador operacional controla V_{out} de forma que V sempre tenda para o valor de V^+ , minimizando a diferença de tensão entre as duas entradas do dispositivo.

A seguir, são apresentados os principais circuitos com realimentação negativa utilizando Amplificadores Operacionais.

2.4.4 Voltage Follower/Voltage Buffer (Seguidor de Tensão)

A principal função deste circuito é o isolamento entre entrada e saída do circuito. Devido à alta impedância de entrada do amplificador operacional, esse circuito apresenta baixa fuga de corrente do circuito de entrada.

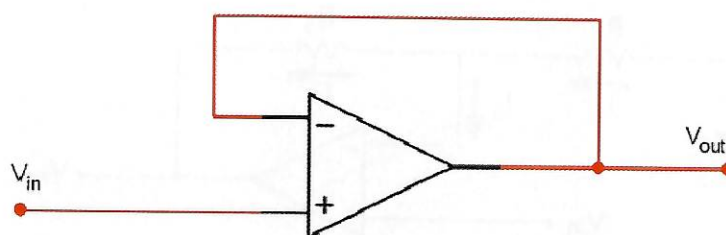


FIGURA 2.13 - Esquema do circuito seguidor de tensão.

A principal característica do circuito seguidor de tensão se deve ao fato de apresentar ganho unitário, ou seja, $V_{out}=V_{in}$.

2.4.5 Circuito Inversor

O circuito inversor apresenta na saída, o valor negativo da tensão de entrada, amplificada por um fator G determinado pelos resistores. Um problema deste circuito é drenar corrente do circuito de entrada, ligado a V_{in} , correspondente a I_1 .

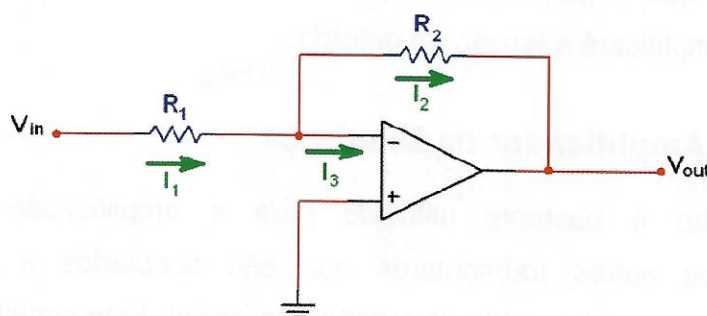


FIGURA 2.14 - Esquema do circuito inversor.

Devido à alta impedância de entrada do amplificador operacional, $I_3 \approx 0$, é possível determinar que:

$$V_{out} = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot V_{in}, \quad \text{ou seja,} \quad \left(G = -\frac{R_2}{R_1} \right) \quad \text{Equação 2.11}$$

2.4.6 Circuito não Inversor

O circuito não inversor amplifica a tensão de entrada por um fator G determinado pelos resistores, sem inverter o seu sinal.

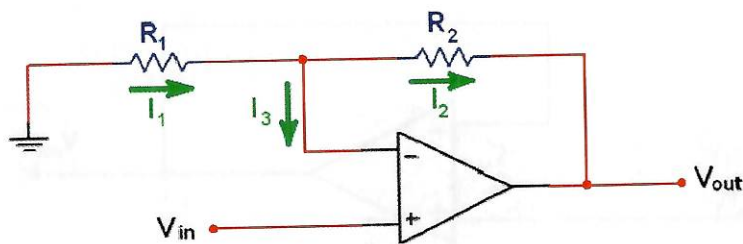


FIGURA 2.15 - Esquema do circuito não inversor.

Da mesma forma que o circuito inversor, tem-se que $I_3 \approx 0$, o que permite a determinação da tensão de saída V_{out} como:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot V_{in} \quad \text{Equação 2.12}$$

Observa-se que o ganho nunca poderá ser menor do que 1. Assim, este circuito sempre amplificará a tensão de entrada.

2.4.7 Circuito Amplificador da Diferença

Esse circuito é bastante utilizado para a amplificação de sinais de extensômetros ou outros transdutores que são acoplados a uma ponte de Wheatstone, por apresentar saída de tensão diferencial. Este circuito amplifica uma diferença de tensão. Entretanto, conforme se observa na FIGURA 2.16, há

drenagem de corrente do circuito de entrada, I_1 e I_3 , correspondentes às saídas do circuito de entrada ligadas a V_1 e V_3 , respectivamente.

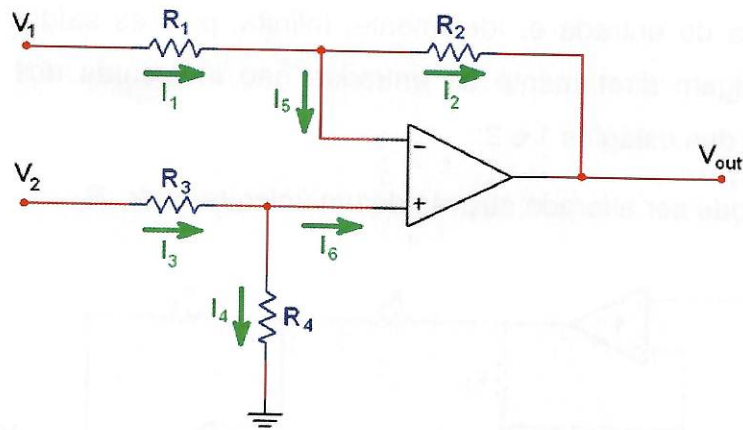


FIGURA 2.16 - Esquema do circuito de amplificação da diferença.

A equação geral que determina a tensão de saída V_{out} , para o circuito de amplificação da diferença é dada por:

$$V_{out} = \left[\frac{(R_1 + R_2) \cdot R_4}{(R_3 + R_4) \cdot R_1} \right] \cdot V_2 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot V_1 \quad \text{Equação 2.13}$$

Escolhendo os resistores de maneira que $R_1 = R_3$ e $R_2 = R_4$, diz-se que o circuito está equilibrado (*balanced differential amplifier*). Nestas condições, a equação que determina a tensão de saída, V_{out} , para o circuito de amplificação da diferença é dada por:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) \quad \text{Equação 2.14}$$

2.4.8 Amplificador para Instrumentação

O amplificador para instrumentação, assim como o amplificador de diferença, também apresenta na saída V_{out} a diferença de tensão em suas entradas multiplicada por um fator que é determinado por seus resistores. Entretanto, como

possui 3 estágios de amplificação, este circuito apresenta duas vantagens em relação ao anterior:

- A impedância de entrada é, idealmente, infinita, pois as saídas do circuito de entrada se ligam diretamente às entradas não inversoras dos amplificadores operacionais dos estágios 1 e 2;
- o ganho G pode ser alterado através de um único resistor, R_G .

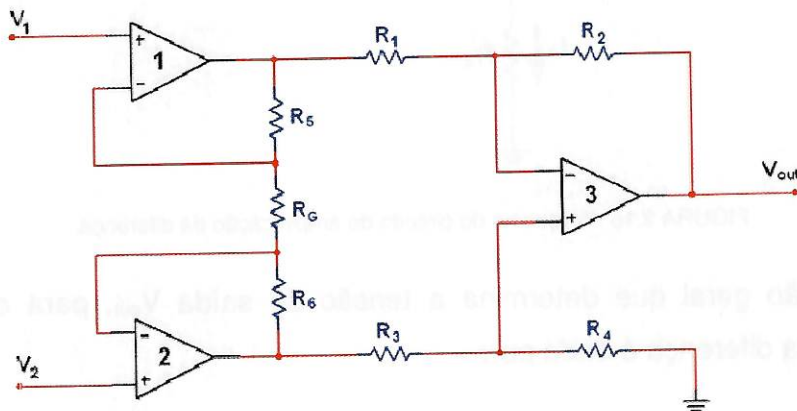


FIGURA 2.17 - Esquema do circuito amplificador para instrumentação.

A equação geral que determina a tensão de saída V_{out} , para o circuito de amplificação da diferença é dada por:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_5 + R_6}{R_G} \right) \cdot (V_2 - V_1) \quad \text{Equação 2.15}$$

Determinando-se que $R_5 = R_6$, tem-se que:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2 \cdot R_5}{R_G} \right) \cdot (V_2 - V_1) \quad \text{Equação 2.16}$$

Desta forma, fixando-se R_5 , pode-se variar G simplesmente mudando o valor de R_G , (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004).

2.5 Sensores de Pressão e Força Piezoresistivos

Segundo (EATON; SMITH, 1997), desde o descobrimento do efeito piezoresistivo em silícios na metade da década de 1950, sensores de pressão piezoresistivos foram amplamente produzidos. A tecnologia de micro-usinagem trouxe grandes benefícios para a indústria de circuitos integrados e, por esse motivo, os dispositivos MEMS capturaram grande parte do mercado de sensores e catalisaram o desenvolvimento de novos mercados.

Segundo (COOMBS, 2001), na fabricação de um sensor de pressão, a estrutura formada durante o processo de micro-usinagem é então colada em outra estrutura (também de silício ou pirex) para formar uma cavidade selada abaixo do diafragma, FIGURA 2.18, a seguir. Assim, o diafragma deflete em resposta a aplicação de pressão.

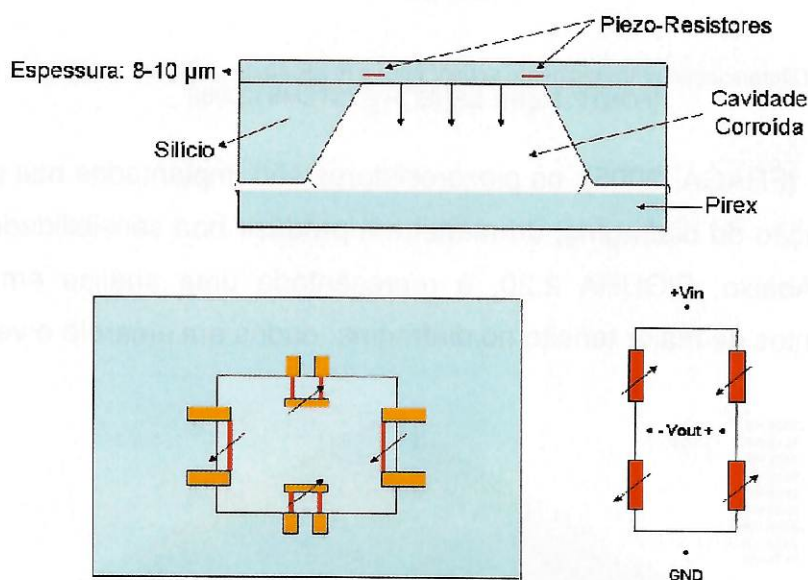


FIGURA 2.18 – Estrutura de um sensor de pressão Piezoresistivo. [FONTE: MIDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2008.]

Ainda como pode ser observado na FIGURA 2.18, após a micro-fabricação da cavidade, formando um diafragma de silício, quatro piezoresistores são formados e implantados nos pontos de máxima tensão do mesmo.

A deflexão gerada pela pressão aplicada irá causar uma variação na resistência dos piezoresistores. Tipicamente, esses resistores são implantados em pontos estratégicos do diafragma de silício, na forma de uma ponte de Wheatstone (dependendo do fabricante do sensor, são utilizados circuitos em um quarto de

ponte, meia ponte ou ponte completa) e a tensão aplicada entre os terminais 2 e 3 da ponte gera uma tensão diferencial a ser medida entre os terminais 1 e 4.

A base de pirex pode conter um furo central para medição de pressões diferenciais ou ser completamente selada para medição de pressões absolutas, FIGURA 2.19, a seguir.

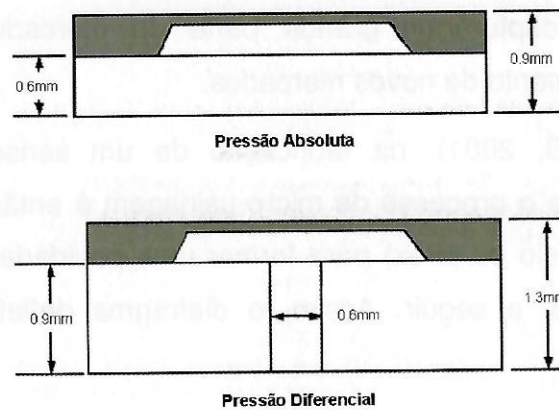


FIGURA 2.19 - Diferenciação entre elemento sensor para a medição de pressões absolutas e diferenciais. [FONTE: MERIT SENSOR SYSTEMS (2008)]

Segundo (FRAGA, 2005), os piezoresistores são implantados nas posições de maior deformação do diafragma, de maneira a produzir boa sensibilidade ao sensor de pressão. Abaixo, FIGURA 2.20, é representada uma análise em Elementos Finitos dos pontos de maior tensão no diafragma, dados em amarelo e vermelho:

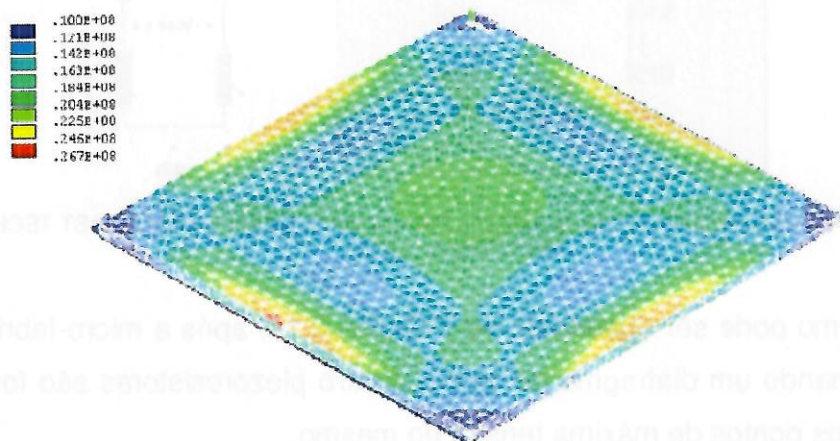


FIGURA 2.20 - Distribuição das tensões de Von Mises no diafragma de silício. [FONTE: FRAGA (2005)]

De acordo com (MAXIM, 2001), seguindo um processo de remoção anisotrópica do silício para a formação da cavidade (processo conhecido como

“anisotropic etching”), é possível criar diafragmas de formatos redondos ou quadrados com extremo controle da espessura final, que pode variar de 5 até 50 microns ± 1 micron e áreas de até 3mm x 3mm, conforme pode ser observado no corte lateral, FIGURA 2.21.

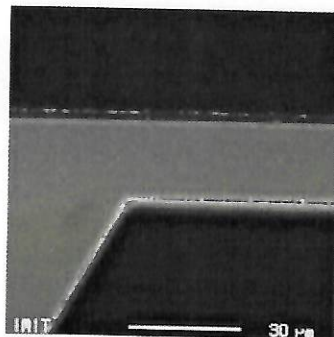


FIGURA 2.21 - Processo de remoção anisotrópica na fabricação de sensores de pressão piezoresistivos. [FONTE: MAXIM, (2001)]

Ainda segundo (MAXIM, 2001), a faixa de pressão suportada pelos sensores está diretamente ligada à espessura do diafragma, de forma que quanto mais espesso o diafragma, maior a pressão suportada antes da ruptura, menor a sensibilidade a pequenas variações de pressão e maior deve ser a utilização da estrutura para a fabricação de sensores de força.

Devido à utilização da tecnologia MEMS, atualmente os sensores de pressão e força são componentes extremamente integrados. Já são disponíveis comercialmente sensores amplificados, micro-controlados, com compensação de variações térmicas e condicionamento de sinais. A FIGURA 2.22 é uma mostra desta sofisticação. Além disso, o ajuste fino dos piezoresistores é feito eletronicamente a laser, promovendo medições que garantem 0,5% de erro máximo na leitura.

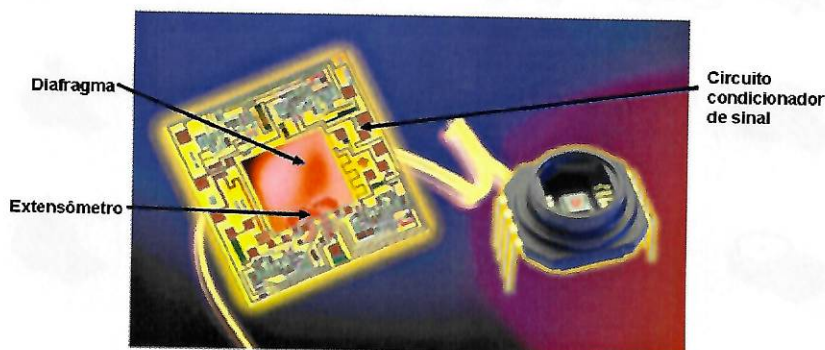


FIGURA 2.22 – Sofisticação e miniaturização dos sensores de pressão Piezoresistivos [FONTE: FREESCALE SEMICONDUCTOR, (2005)]

A FIGURA 2.23 representa o encapsulamento de um sensor de pressão piezoresistivo disponível comercialmente, bem como o esquema elétrico do mesmo:

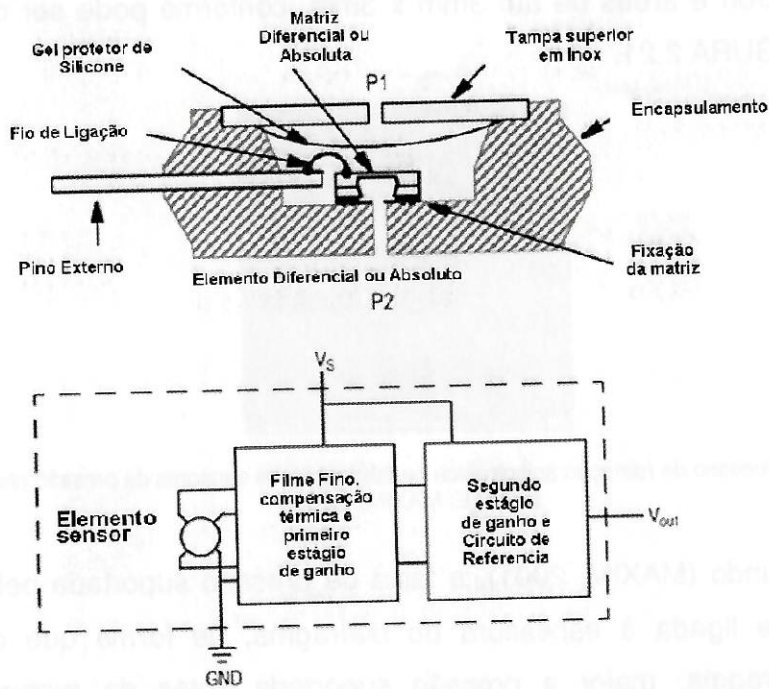


FIGURA 2.23 – Representação de um corte lateral realizado em um sensor de pressão diferencial. [FONTE: FREESCALE SEMICONDUCTOR, (2005)]

Tais sensores de pressão são disponíveis em diferentes modelos de encapsulamento para melhor adequação a diferentes aplicações. Abaixo, FIGURA 2.24, são exemplificados alguns dos encapsulamentos comercialmente disponíveis.

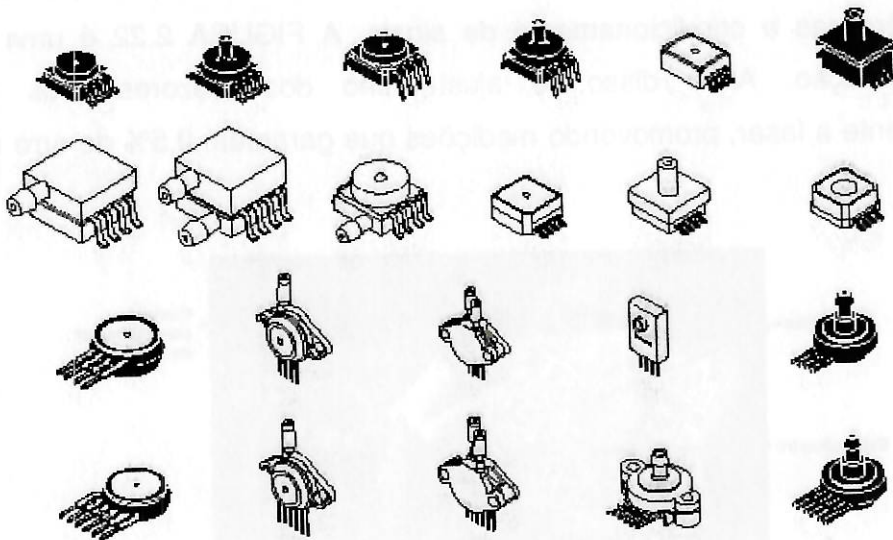


FIGURA 2.24 - Diferentes tipos de encapsulamento para sensores de pressão [FONTE: FREESCALE SEMICONDUCTOR, (2005)]

2.6 Sensores Táteis e de Toque

Segundo (CROWDER, 1998), sensores táteis e de toque são dispositivos que medem características do contato entre o sensor e um objeto. A interação obtida é confinada em uma região pequena e definida do sensor. Essa definição contrasta com a definição de sensores de força que medem a força total aplicada a um objeto. Com relação aos sensores táteis e de toque, as seguintes definições são comumente utilizadas:

- Sensoriamento do toque: É a detecção e medição da força de contato em um ponto definido. Um sensor de toque pode também se restringir a uma informação binária, denominada toque e “não toque”.
- Sensoriamento do tato: É a detecção e medição da distribuição de forças perpendiculares a uma área de sensoriamento pré-determinada e subsequente interpretação da informação espacial. Uma matriz de sensoriamento de toque pode ser considerada como um grupo coordenado de sensores de toque.
- Sensoriamento do escorregamento: É a detecção e medição de um movimento relativo entre a superfície do sensor e o objeto. Essa funcionalidade pode ser alcançada tanto com o desenvolvimento de sensores especiais quanto pela interpretação de dados advindos de um sensor de toque ou uma matriz tátil.

Segundo (CROWDER, 1998), não existe uma padronização de especificações para esses tipos de sensores, visto que poucas empresas os produzem em larga escala. Porém, os dados abaixo apresentam uma boa base para a definição das características de um sensor de toque adequado para aplicações industriais:

- Sensores de toque devem, idealmente, possuir apenas um ponto de contato. Na prática, uma área em torno de 2 mm^2 é considerada satisfatória, devido às dificuldades de fabricação do elemento sensor miniaturizado.
- A sensibilidade ao toque é dependente de uma série de fatores determinados pelas características físicas de construção dos sensores. Valores normalmente encontrados de sensibilidade se encontram na faixa de 0,4 a 10 N/mm^2 além da proteção contra sobrecargas.
- Apresentam tempo de resposta de, pelo menos, 10ms.

- As características do sensor devem ser estáveis e repetitivas, apresentando valores baixos de histerese. Uma saída linear não é absolutamente necessária, visto que técnicas de processamento de sinais podem ser usadas para compensar não-linearidades moderadas.
- Devem ser robustos e operar em ambientes hostis.

O uso de materiais que têm características de força/resistência definidas tem recebido considerável atenção na fabricação de sensores de toque e táteis. O princípio básico desse tipo de sensor é a medição da resistência elétrica de um elastômero condutivo ou espuma entre duas placas. A maioria dos sensores utilizam elastômero que consiste de borracha dopada em carbono. Aplicação de uma força sobre a superfície do sensor de toque gera um aumento da densidade de partículas condutivas, alterando o valor da resistência elétrica, FIGURA 2.25.

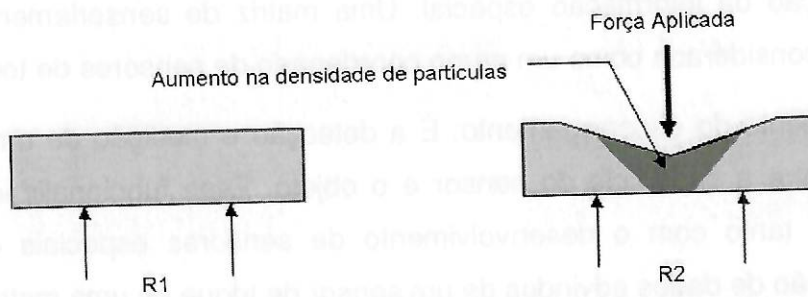


FIGURA 2.25 - Aplicação de uma força sobre a superfície do sensor de toque. [FONTE: CROWDER (1998)]

Se a medida da resistência é feita entre duas superfícies, os contatos superiores devem ser impressos em pasta condutiva flexível para permitir a movimentação sobre a aplicação de forças.

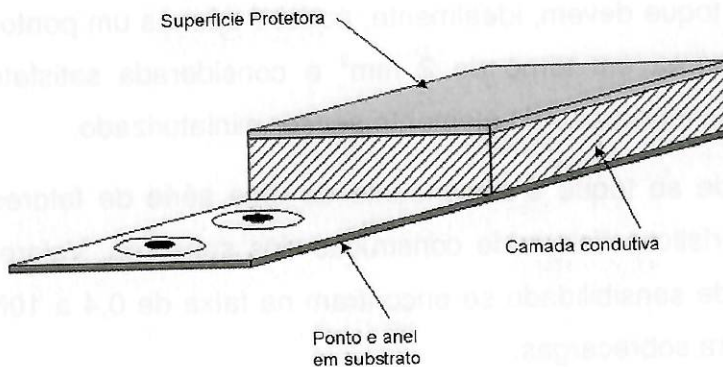


FIGURA 2.26 - Sensor de toque composto de duas placas paralelas e espuma condutiva. [FONTE: CROWDER, (1998)]

Sensores táteis formados por elastômero ou espuma condutiva, apesar de relativamente simples, apresentam inúmeras e significativas desvantagens:

- Elastômeros apresentam constante de tempo não linear. Adicionalmente, quando uma força é aplicada, essa constante difere daquela quando o sensor está sem carga;
- A relação força-resistência elétrica dos elastômeros em questão não é linear, o que demanda a aplicação de algoritmos de processamento eletrônico de sinais;
- Com o uso contínuo, os elastômeros sofrem fadiga e se deformam permanentemente. Isso gera uma baixa estabilidade do sensor ao longo de sua vida, o que pode requerer a troca do sensor.

Apesar das desvantagens apresentadas, a maioria dos sensores de toque analógicos se baseiam no princípio da variação da resistência elétrica. Isso se deve à simplicidade do seu projeto e interface simples.

Novas tecnologias possibilitam a fabricação de sensores de toque resistivos através da utilização de pastas de polímeros condutivos que variam a resistência elétrica de forma altamente previsível conforme há uma variação da força aplicada à sua superfície. São usualmente fornecidos em folhas que apresentam o filme sensível impresso. O filme sensível é constituído de partículas condutivas e não condutivas suspensas em uma matriz. O tamanho das partículas é da ordem de frações de um micron e são formuladas para reduzir a interferência da temperatura, maximizar propriedades mecânicas e durabilidade da superfície. A aplicação de uma força na superfície do filme sensível faz com que partículas toquem o eletrodo condutivo, mudando a resistência do filme.

Como exemplo de aplicação dessa tecnologia no dia-a-dia, temos equipamentos de análise da oclusão dental, FIGURA 2.27.

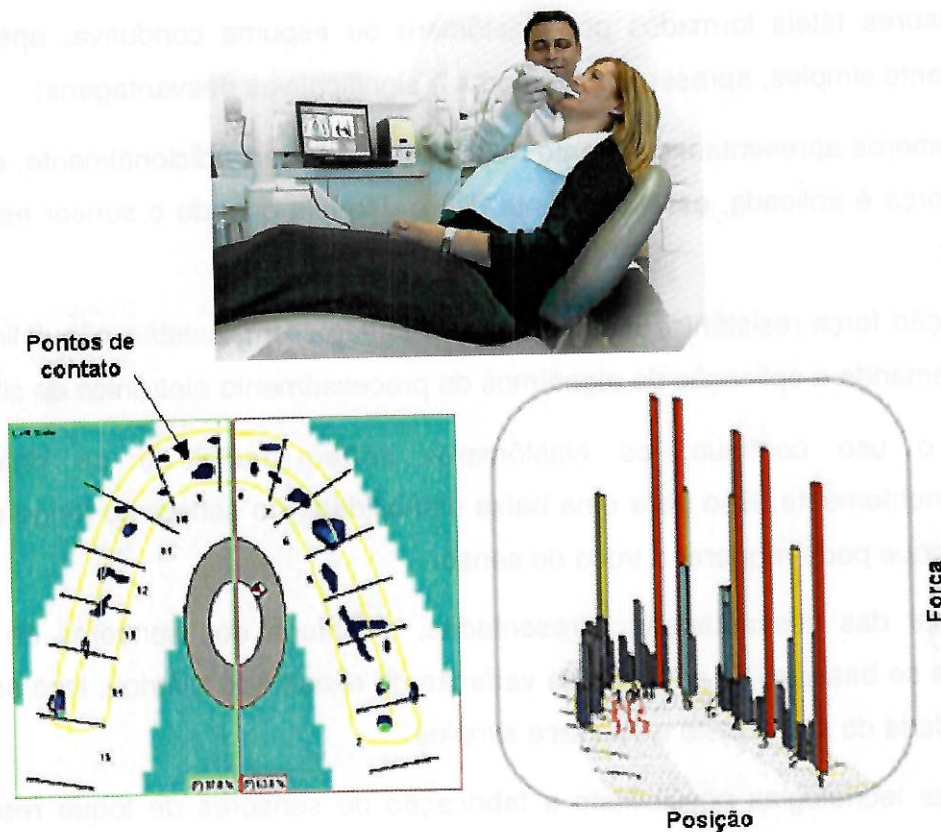


FIGURA 2.27 - Aplicação de sensores táteis na análise da oclusão dental. [FONTE: TEKSCAN, 2006]

Da mesma forma que os outros modelos de sensores de toque resistivos, esses sensores requerem uma interface eletrônica relativamente simples, e podem ser operados satisfatoriamente em ambientes hostis.

2.7 Os Apalpadores

O primeiro apalpador foi desenvolvido para solucionar um requisito particular de inspeção, mas acabou por revolucionar o uso das máquinas de medir a coordenadas (MMCs) para inspeção pós-processo de componentes manufaturados. No final dos anos 70, praticamente todas as MMCs eram vendidas com os apalpadores já acoplados. Posteriormente, com o avanço dos CNCs incluindo funções e rotinas específicas, e o uso de réguas ópticas de medição nos eixos das máquinas-ferramenta, seu uso se estendeu, tornando-se um componente vital nos processos de produção automatizados, permitido às indústrias, das automotivas às aeroespaciais, produzir componentes precisos, minimizando refugos e maximizando a produtividade, (RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION, 2008).

A tecnologia dos apalpadores tridimensionais foi desenvolvida em 1972 por David McMurtry enquanto trabalhava na fábrica da Rolls-Royce em Bristol, UK. Seu desafio era inspecionar tubulações de combustível das turbinas Olympus usadas no Concorde, tarefa que requeria cuidado especial no controle da deflexão dos tubos de 6mm de diâmetro. A solução encontrada por ele foi o "Touch Trigger Probe" (TTP), que utiliza um princípio simples para identificar o contato com a peça a ser medida. Após negociação da patente com a Rolls-Royce, surgiu a Renishaw, atual líder Mundial na fabricação e comercialização de tais equipamentos, tendo David como fundador e atual presidente. Desde então, a linha de produtos se expandiu para atender a demanda por alta flexibilidade e automação dos processos de medição. (RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION, 2008). Paralelamente, vários fabricantes surgiram, porém, com o princípio de funcionamento patenteado, diferentes tecnologias precisaram ser desenvolvidas.

2.7.1 Características Gerais dos Apalpadores

Independentemente da tecnologia utilizada, o princípio se baseia na geração (ou interrupção) de um sinal elétrico no momento em que ocorre o contato entre a haste do TTP e a peça a ser medida. Esse sinal, comumente denominado "trigger signal" ou sinal de disparo, é então enviado a uma interface que o converte em uma forma inteligível pelo CNC. Após a conversão, o sinal é transmitido ao CNC que capta instantaneamente os valores dimensionais dos eixos X, Y e Z da máquina-ferramenta e armazena-os para posterior leitura, cálculos ou geração de relatórios, FIGURA 2.28.

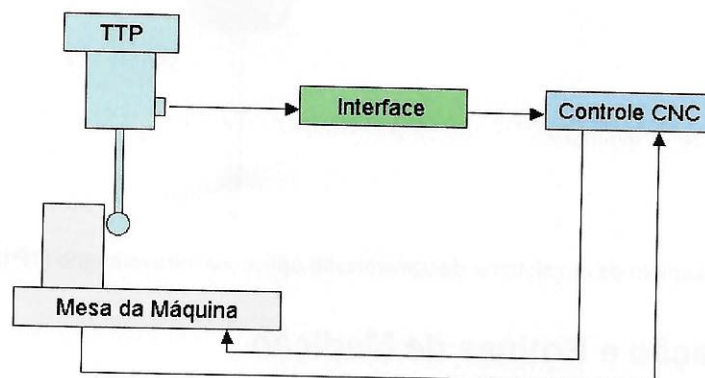


FIGURA 2.28- Esquema de funcionamento de um sistema de medição acoplado a um Centro de Usinagem

A transmissão do sinal de disparo do apalpador para a interface pode ser realizada basicamente através de três tecnologias distintas: infravermelho, cabo blindado ou via freqüências normalizadas de ondas de rádio. Geralmente se utiliza a transmissão via cabos blindados em apalpadores que ficam presos à mesa da máquina (em centros de usinagem e fresadoras), também chamados “toolsetter probes”, pois estes realizam pequena ou nenhuma movimentação, sendo que a ferramenta se movimenta para tocá-lo. Desse modo, o cabo pode ser adequadamente fixado à mesa e à estrutura da máquina, ficando livre de torções, eliminando riscos de danos provocados pelas ferramentas de corte.

A utilização da transmissão via ondas de rádio é indicada para máquinas de grande porte, pórticos ou então na inspeção de furos profundos, pois nesses casos o sinal infravermelho pode ser excessivamente atenuado, (TOOLING & PRODUCTION, 1999). Para aplicações convencionais, costuma-se utilizar a comunicação via infravermelho pela sua alta confiabilidade, velocidade de transmissão e alta imunidade a ruídos externos, FIGURA 2.29.

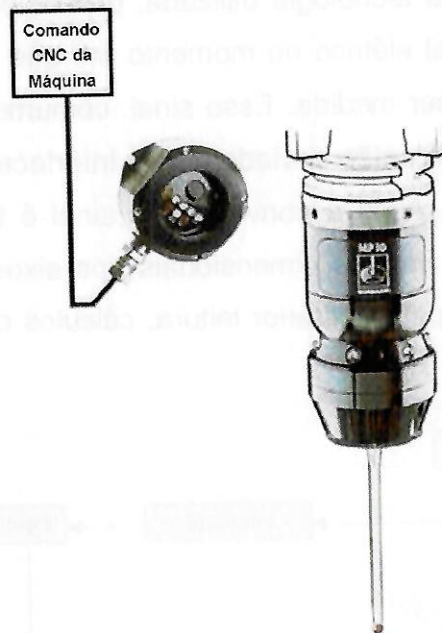


FIGURA 2.29 - Exemplo de um sistema de transmissão óptica via infravermelho (TP10 - Renishaw)

2.7.2 Programação e Rotinas de Medição

Poucos discutem os méritos dos apalpadores em relação à diminuição do tempo de preparação da máquina, inserção de dimensões das ferramentas e realização de medições na própria máquina. Porém, na prática, tais sistemas

freqüentemente são vistos como caros e difíceis de operar. Conseqüentemente, tem se tornado uma ferramenta usada exclusivamente por programadores experientes em ambientes de alta produtividade (MODERN MACHINE SHOP ON LINE, 2001). Com o intuito de tornar a utilização dos apalpadores mais efetiva e acessível a uma grande gama de usuários, os mais importantes fabricantes de CNCs como Fanuc, Heidenhain, Okuma, Cincinnati Milacron e Siemens têm empregado em seus comandos, softwares contendo interfaces gráficas amigáveis de fácil utilização, específicos para a realização de medições. O comando Heidenhain série TNC, por exemplo, é capaz de realizar medições tridimensionais automáticas ou manuais e possui funções de inspeção, como: checagem da qualidade dimensional de furos, identificação de desvios de tolerância e medição da geometria da peça pré-acabada, determinando a profundidade de corte e o sobre-metal restante para a operação de acabamento (ZHOU; HARRISON; LINK, 1996).

Atualmente, algumas máquinas-ferramenta modernas têm exatidão de posicionamento comparável as MMCs de mesmo porte. Acoplando-se a essas máquinas um sistema constituído por apalpadores e um software com as rotinas de medição adequadas, esta pode ser capaz de desempenhar algumas funções de uma MMC, reduzindo ou até mesmo eliminando, a necessidade de inspeções posteriores fora da máquina (MODERN MACHINE SHOP ONLINE, 2001). Tomando-se certos cuidados, atualmente não é mais necessária a utilização de uma máquina independente das utilizadas na fabricação para realizar a inspeção de uma peça, pois os fatores que geram os erros de medição e os que geram erros de corte são distintos, podendo ser rastreados e corrigidos separadamente (MODERN MACHINE SHOP ONLINE, 2001).

2.8 Tecnologias em Uso na Geração do Sinal de Disparo

Rigorosamente, o sinal de disparo não é gerado quando a haste do apalpador entra em contato com a peça. Como pode ser observado na FIGURA 2.30, o apalpador irá continuar seu movimento, haverá uma deflexão da haste até um valor mínimo necessário para ativar o sistema sensor do apalpador. A distância percorrida entre o instante do toque e a geração efetiva do sinal é chamada de "Folga de Percurso" ou ("pretravel"), (SHEN; MOON, 1996). Essa distância deve ser

minimizada ou, se possível, deve ser mantida constante, para efeitos de exatidão e repetitividade da medição.

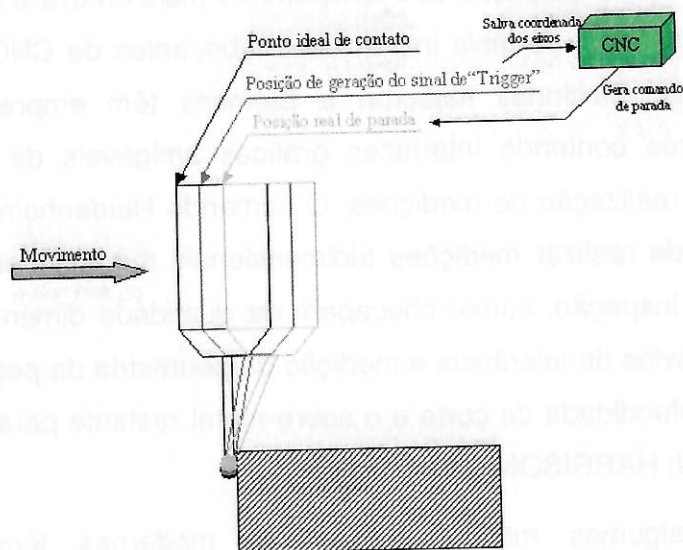


FIGURA 2.30 - Discrepância entre a posição de contato real e a percebida pelo CNC

Existem basicamente quatro princípios físicos distintos que são utilizados pelos diversos fabricantes de apalpadores para gerar o sinal que indica o contato com a peça. Esses princípios são: O contato elétrico, ou falta dele, ("Kinematic Contact"), Luz (Interferometria a laser), deformação (Strain-Gages) e o efeito Piezoelétrico.

2.8.1 O "Kinematic Contact"

Atualmente é o tipo de apalpador mais difundido mundialmente. Desenvolvido por David McMurtry, foi o princípio que revolucionou o uso das máquinas de medição por coordenadas. Conforme ilustrado na FIGURA 2.31, trata-se de um mecanismo cinemático formado por três pequenos cilindros que permanecem assentados sobre seis rolos, ou esferas, devido a pressão exercida pela mola sobre os cilindros. Uma corrente elétrica normalmente passa pelas seis esferas e os três cilindros em série. Quando ao contato com a peça a ser medida, a força sobre a haste ultrapassa a resistência da mola em manter o mecanismo na posição estável, os cilindros irão mover-se cortando a corrente elétrica que passava por eles, gerando o sinal de disparo. Depois de realizada a medição e afastando-se o apalpador da peça, a mola novamente força o mecanismo a posição inicial de estabilidade e restabelece a

corrente elétrica entre eles, (RENÉ et al., 1996). Segundo (REID, 1995), o sinal de disparo desse tipo de apalpador não só ocorre quando um dos contatos elétricos é interrompido, mas já tem início pela alteração da resistência elétrica do contato.

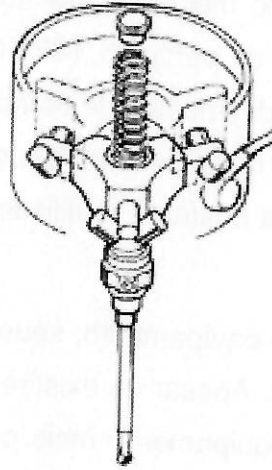


FIGURA 2.31 - Princípio de funcionamento de um "Kinematic touch trigger probe" [FONTE: TOOLING & PRODUCTION (1999)]

Dentre as vantagens apresentadas pelo uso do "Kinematic Contact", destaca-se: Princípio simples de funcionamento; robustez do conjunto eletro-mecânico; amplamente utilizado e pesquisado. Além disso, uma característica típica desse tipo de apalpador é que a exatidão da medição varia quando o mesmo se aproxima da peça em diferentes direções (REID, 1993). Isso se deve ao fato de que a força necessária para gerar o sinal de disparo é dependente da direção de aproximação, pois o mecanismo se apóia em três direções com um ângulo de 120° entre elas, conforme afirmam (KIM; CHUNG, 2001). Isso está ilustrado na FIGURA 2.32.

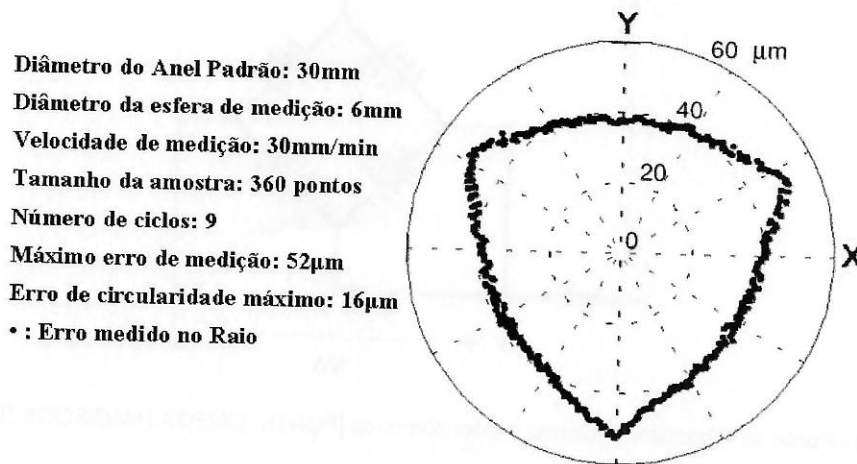


FIGURA 2.32 - Teste padrão da folga de percurso ou "pretravel" em XY de um Kinematic TTP [FONTE: KIM; CHUNG, (2001)]

Além disso, a força dinâmica necessária para abrir um dos contatos elétricos do apalpador é dependente da velocidade de aproximação, (MIGUEL; KING; ABACKERLI, 1998). Devido à fabricação e leves variações no processo de montagem, apalpadores do mesmo modelo e projeto podem apresentar diferenças quanto às características da folga de percurso, (SHEN; MOON, 1996). A magnitude dos erros varia quando são utilizadas hastes de comprimento superior a 30mm. Isso se deve ao fato da força de toque necessária para a geração do sinal de disparo ser relativamente alta, o que prejudica bastante a utilização de hastes longas causando grande deflexão.

Com relação à aquisição do equipamento, seus custos são relativamente altos se comparados a outros modelos. Apesar de existirem apalpadores mais precisos a um custo mais baixo, este é o equipamento mais conhecido e procurado, estando seu fabricante associado à alta confiabilidade, e apenas estes, por serem os detentores da patente do mecanismo, são autorizados a produzi-lo.

2.8.2 Extensômetros

Utiliza-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si segundo uma ponte de Wheatstone e o desbalanceamento da mesma, em virtude da deformação dos extensômetros, é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada FIGURA 2.33.

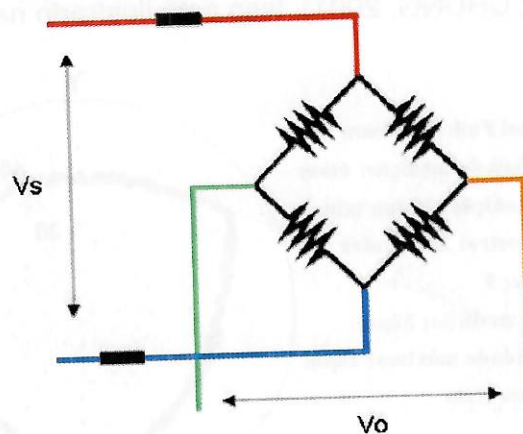


FIGURA 2.33 - Ponte de Wheatstone usando 4 extensômetros [FONTE: OMEGA HANDBOOK SERES, 1998]

Os extensômetros são colados a uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), denominada corpo da célula de carga e inteiramente solidários à sua

deformação. A força atua portanto sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medirão sua intensidade.

Diferentemente dos “Kinematic Probes” que lidam com uma informação: “contato aberto” ou “contato fechado” através da abertura ou fechamento de uma “chave” mecânica, os apalpadores por extensômetros tratam de informações analógicas advindas da variação de suas resistências quando a haste do apalpador toca a peça. O resultado advindo de três células de carga contendo micro-extensômetros de silício são combinados de maneira a gerar uma resultante.

Para que essa resultante seja capaz de gerar o sinal de disparo, é necessário que haja um tratamento eletrônico desse sinal procurando por um valor que exceda o limite determinado (“Threshold”), estabelecendo-se um limite a partir do qual é disparado o sinal.

Uma das grandes vantagens desse tipo de apalpador é a característica de possuir valores da folga de percurso muito inferiores a outros modelos, pois a própria deformação da haste é responsável por gerar o sinal de disparo, evento este que ocorre anteriormente à geração da força necessária para a abertura dos contatos elétricos, nos Kinematic probes. Por este motivo, podem ser extremamente sensíveis ao toque.

O ensaio de repetitividade unidirecional e de acordo com a norma ISO 10360-2 2D, conforme ilustrado na FIGURA 2.34, onde TP20 (vermelho) indica um apalpador do tipo “Kinematic Probe” e TP800 (azul) indica um apalpador que utiliza “Strain Gages”, verifica-se que esse último possibilita a utilização de hastes mais longas, da ordem de 200mm de comprimento, mantendo a repetitividade inferior a um micrometro.

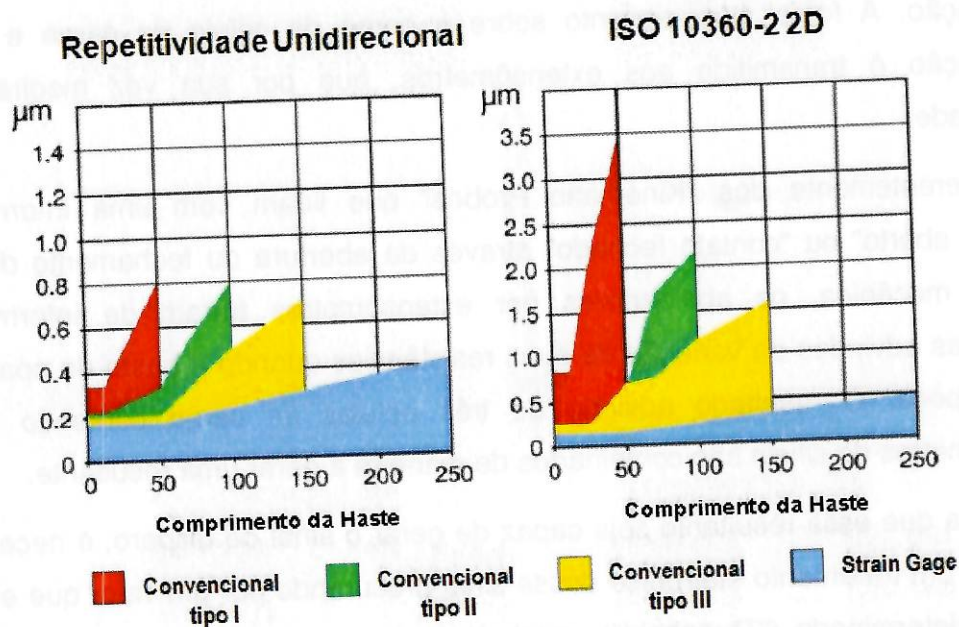


FIGURA 2.34 - Comparação dos valores da folga de percurso entre apalpadores convencionais e Apalpadores "Strain-Gages" [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION, 2008]

Os apalpadores do tipo Strain Gages utilizam eletrônica de estado sólido, proporcionando vida bastante longa e baixo desgaste. Por serem baseados em um princípio analógico, que pode ser devidamente calibrado, são capazes de detectar o contato através da aplicação de forças da ordem de 0,2N. Dentre as desvantagens desse tipo de equipamento destacam-se o preço elevado, utilização de tecnologia eletrônica extremamente avançada, o que torna o equipamento delicado e pouca literatura trata especificamente desses apalpadores.

2.8.3 Laser

Esse tipo de apalpador utiliza uma chave óptica como sensor para gerar o sinal de disparo. Um feixe de laser emitido por um LED é colimado por um sistema de lentes e emitido sobre uma célula diferencial fotovoltaica, passando pela haste de medição, conforme ilustra a seguir a FIGURA 2.35.

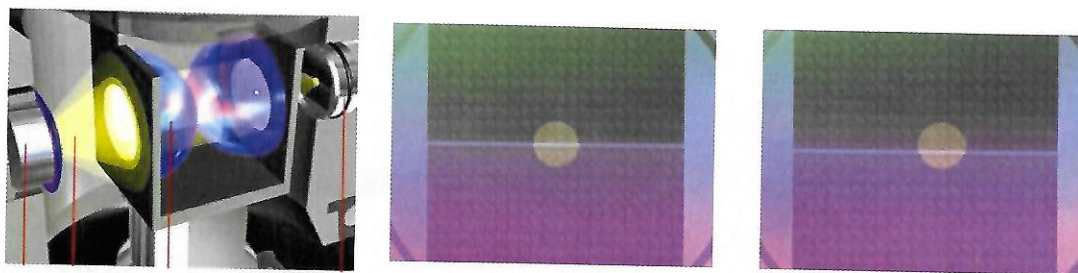


FIGURA 2.35 - Princípio de funcionamento dos "apalpadores a Laser" e a variação do ponto de incidência do feixe na fotocélula sensível quando há a deflexão da haste [FONTE: HEIDENHAIN, 2007]

No momento do contato, há uma deflexão da haste que gera uma mudança no ponto onde o laser incide sobre a superfície sensível. Quando essa variação ultrapassa uma tolerância pré-estabelecida, o sinal de disparo é então gerado.

Os apalpadores a laser são extremamente exatos e pouco suscetíveis a desgastes. Outra característica marcante desse equipamento é o seu preço, baixo se comparado a outros modelos similares. Nos "apalpadores a laser", para que haja uma variação no ponto de incidência do laser e conseqüentemente a geração do sinal de disparo, primeiramente a haste deve deformar, semelhantemente ao que ocorre nos "Kinematic Probes" para a abertura dos contatos elétricos. Por esse motivo, esses dois tipos de apalpadores possuem características semelhantes em relação à folga de percurso, como utilização não indicada para hastes maiores que 30mm e exatidão dependente da direção de aproximação com a peça.

2.8.4 Sensores Piezoelétricos

Baseia-se no princípio pelo qual ao se exercer uma pressão sobre um cristal piezoelétrico, este gera uma diferença de potencial entre as superfícies pressionadas. Utilizando-se dessa característica, é possível acionar o sinal de disparo a partir dessa diferença de potencial gerada no momento do toque da haste com a peça a ser medida, a seguir, FIGURA 2.36.

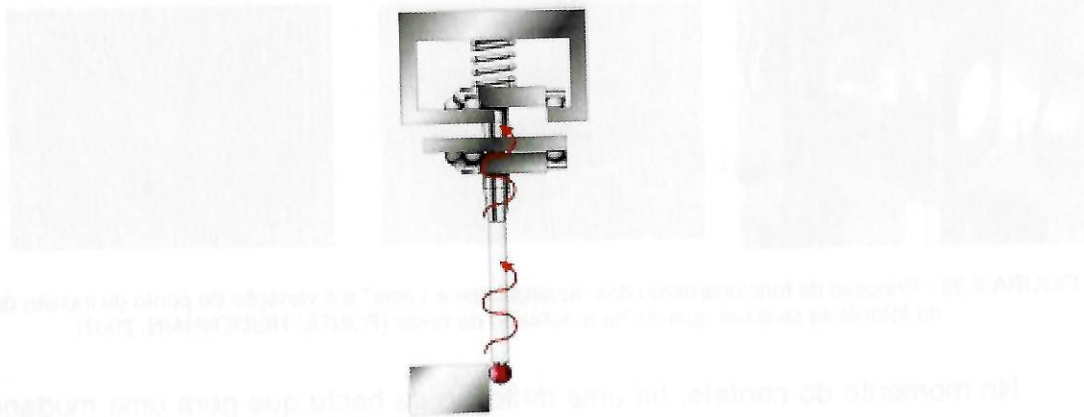


FIGURA 2.36 - Transmissão da força de toque para os sensores nos "piezo probes". [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION, 2008]

São extremamente exatos e repetitivos. Como os apalpadores "Strain gage", podem ser calibrados para serem capazes de acionar o sinal de disparo ao detectar forças da ordem de 0,2N.

Por serem extremamente sensíveis, podem sofrer interferência de ruídos de baixa frequência como pancadas, interferência da frequência da rede elétrica, acionamento de motores, dentre outros.

3 EXPERIMENTOS INICIAIS E ESCOLHA DOS SENSORES

Após realização de pesquisa bibliográfica a respeito dos temas relevantes ao projeto, partiu-se então para o planejamento dos trabalhos visando a proposição de um transdutor que se mostrasse adequado à geração do sinal de disparo em apalpadores comutadores. Para a visualização adequada do problema, mostrou-se apropriada a divisão do apalpador em subsistemas, cada qual com suas entradas, tarefas a serem executadas e saídas.

Assim, neste capítulo, são definidos os subsistemas que formam um apalpador comutador e propostos critérios de avaliação a partir dos quais cada transdutor será submetido. É apresentada a preparação da bancada de testes iniciais e são realizados ensaios para mensurar os critérios propostos. Ao final, aqueles transdutores que obtiveram os melhores resultados na avaliação passaram para a próxima etapa de experimentação.

3.1 Definição dos Subsistemas

A divisão do sistema apalpador foi realizada com o intuito de prover ao leitor um maior esclarecimento acerca da maneira como o elemento sensor (transdutor) pesquisado é usualmente inserido ao conjunto do corpo do aparelho apalpador comutador e sua interação com o ambiente externo. Tal definição não tem como objetivo entrar em detalhes sobre o funcionamento de cada um dos subsistemas. Trata-se de um elemento didático cujo objetivo é auxiliar na determinação do grau de adequação de cada um dos transdutores pesquisados ao corpo do apalpador comutador.

A FIGURA 3.1 na página seguinte representa esquematicamente o projeto de um apalpador convencional.

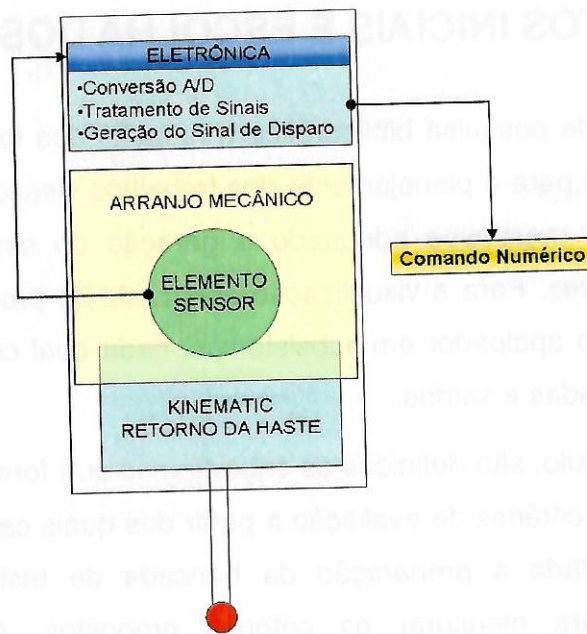


FIGURA 3.1 - Subsistemas propostos para o desenvolvimento do apalpador

Verifica-se que o mesmo é formado por três subsistemas cujas funções são detalhadas a seguir:

- MECANISMO DE RETORNO DA HASTE (KINEMÁTICO): Desempenha a função de ajuste e posicionamento mecânico da haste. Seu projeto deve ser tal que possibilite o re-posicionamento da haste após a ocorrência de um toque com a peça.
- ARRANJO MECÂNICO: Representa a solução eletromecânica empregada para unir o Elemento Sensor (transdutor pesquisado nessa Tese) ao Mecanismo de Retorno da Haste, possibilitando assim que movimentações da haste sejam captadas.
- ELETRÔNICA: É o subsistema responsável pelo processamento eletrônico do sinal que advém do elemento sensor e acionamento do sinal de disparo.

Verifica-se porém que o desempenho individual dos subsistemas interfere diretamente no desempenho final do apalpador. Isso fica evidente quando se observa, por exemplo, que a escolha do local de instalação do elemento sensor (projeto do arranjo mecânico) interfere diretamente no desempenho do Apalpador.

Do ponto de vista esquemático dos subsistemas propostos, o presente trabalho tem por objetivo discorrer a respeito dos elementos sensores mais adequados na geração de sinal de disparo em apalpadores comutadores. Por esse motivo, para a

segunda etapa, optou-se pela seleção e experimentação de dois sensores, que, no Capítulo 4 serão sistematicamente comparados ao sistema de acionamento do sinal de disparo por contato elétrico.

3.2 Critérios de Avaliação dos Transdutores

Com base na pesquisa bibliografia realizada, algumas considerações puderam ser feitas com relação à viabilidade de uso de cada uma das tecnologias para o propósito do presente trabalho.

Nessa primeira etapa, optou-se por analisar experimentalmente aqueles transdutores que se mostraram mais promissores. Para auxiliar nessa tarefa, foram criados parâmetros críticos e pesos (valor entre parênteses), de forma que quanto maior a nota final, mais adequado se mostra o transdutor. Abaixo são detalhados os parâmetros críticos utilizados:

- **MÉTODO INÉDITO (0 a 2):** Cada fabricante de apalpadores utiliza métodos próprios e, muitas vezes, patenteados para a geração do sinal de disparo. Nota zero é aplicada quanto o método é amplamente utilizado e devidamente patenteados, dificultando sua utilização por outros fabricantes. A nota 1 atribuída a esse critério significa que a tecnologia já é utilizada, porém é possível modificar o arranjo mecânico interno de maneira a não incorrer em problemas com patentes. Finalmente a nota 2 é aplicada quanto o método é realmente inédito.
- **SIMPLICIDADE (0 a 2):** O método adotado deve ser mantido simples, de forma que necessite do menor número possível de componentes e interfaces, causando impacto positivo nos itens Robustez, Custo e Consumo.
- **ROBUSTEZ (0 a 3):** Indica que interferências externas como ruídos elétricos, vibrações, variações de temperatura, pressão e umidade devem ter mínima interferência no desempenho do equipamento.
- **CONSUMO DE ENERGIA (0 a 3):** Como boa parte dos apalpadores são portáteis e funcionam à bateria, reduções de consumo que melhorem a autonomia do equipamento são de grande interesse para o projeto.
- **CUSTO (0 a 3):** Apesar não ser objeto de estudo desse trabalho, o custo dos equipamentos deve ser observado, mantido o mais baixo possível e compatível com os modelos disponíveis internacionalmente.

- **INTEGRAÇÃO AO PRODUTO (0 a 3):** O sistema desenvolvido, o qual será formado por sensores e circuitos elétricos de tratamento do sinal, deve ser miniaturizado o suficiente para poder ser montado internamente ao Apalpador. Além disso, a fixação do sensor e o seu posicionamento devem ser adequados.

Outro ponto importante diz respeito à repetitividade e a exatidão do sistema, porém esses parâmetros só podem ser analisados durante os ensaios finais, etapa essa posterior à escolha das tecnologias. Dessa maneira, optou-se pela pesquisa bibliográfica daqueles princípios que, em uma análise qualitativa, se mostraram promissores sobre esse aspecto.

Os ensaios com cada um dos sensores seguirá a seguinte seqüência:

- 1- Análise física, onde será verificado empiricamente a resistência mecânica dos sensores para a aplicação;
- 2- Avaliação de Integração ao Produto, onde serão verificados a forma e tamanho dos sensores para a aplicação;
- 3- Avaliação funcional em banco de ensaios, onde serão verificadas a Simplicidade, Robustez, Consumo e Custo.

3.3 Preparação dos Bancos de Ensaios Iniciais

Com o objetivo de completar a tabela de critérios de avaliação para cada um dos transdutores, foi necessária a preparação de ensaios compostos por sistema de fornecimento de níveis de tensão adequados, sistemas de amplificação de sinais e sistemas de aquisição e armazenamento de dados.

A seguir é descrito o desenvolvimento dos itens cujo desenvolvimento foi necessário para a aplicação dos ensaios iniciais.

3.3.1 Desenvolvimento de Interfaces Amplificadoras para Sensores de Força

De acordo com (FREESCALE, 2005), requisitos para o projeto de módulos de amplificação são determinados pelas características da saída dos sensores. Devido ao fato de sensores não amplificados apresentarem saída tipicamente da ordem de

algumas dezenas de milivolts em fundo de escala, é necessário amplificar o sinal, utilizando-se ganhos de 100 a 250 dependendo da voltagem aplicada ao sensor e da máxima pressão/força a ser medida. Além disso, é necessário realizar uma conversão diferencial para transformar a saída do sensor em um valor de tensão DC que varie de zero até alguns volts.

Adicionalmente, um ajuste é necessário para converter a saída a níveis apropriados de tensão, compatíveis com microcontroladores, módulos de aquisição de dados e computadores. Para entradas A/D de microcontroladores, geralmente valores de 0,5V para indicar o “zero” do sensor e valores em torno de 4,5V para indicar o fundo de escala são bastante apropriados.

O Valor de 0,5V para indicar o “zero” é necessário para garantir a saturação da tensão de saída de amplificadores operacionais que operam com alimentação simples ($V_{EE}=0$). Na outra extremidade, tensões em torno de 4,5V para indicar o fundo de escala, mantêm a saída com conversor A/D dentro de uma margem confortável para suportar a tolerância dos componentes.

Usando amplificadores operacionais de instrumentação, foram desenvolvidas interfaces para amplificação dos diferentes sensores, adequando-se a tensão de saída aos valores compatíveis com o módulo de aquisição de dados.

Para os dois modelos de transdutores de força piezoresistivos testados, escolheu-se o amplificador de instrumentação da Texas Instruments modelo INA121, capaz de prover um ganho G variando de 1 a 10000 V/V, cujo esquema é mostrado abaixo, FIGURA 3.2:

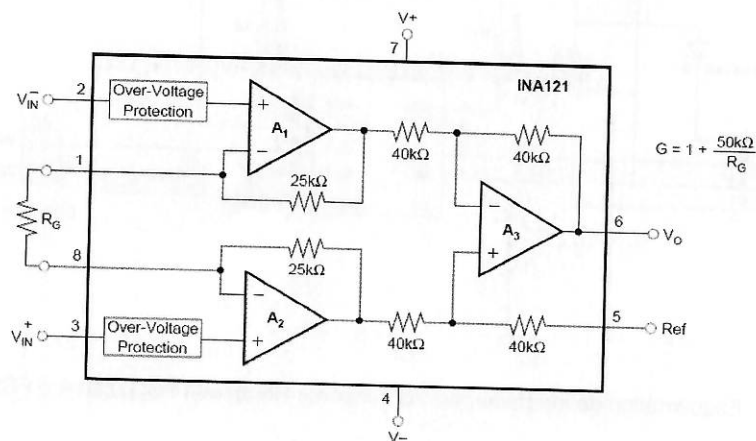


FIGURA 3.2 - Circuito interno do TI-INA121. [FONTE TEXAS INSTRUMENTS (2000)].

Entre as vantagens deste modelo de amplificador de instrumentação, está a baixa corrente quiescente (450 μA), representando baixo consumo, baixa tensão de "offset" na saída (200 μV) e baixo erro de não-linearidade (máximo de 0,001%).

A fórmula do ganho com realimentação deste circuito integrado é dada por:

$$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

Equação 3.1

Para ambos os sensores, FSG15N1A e FSS1500NSB, a amplitude de tensão diferencial é praticamente a mesma (142mV para o primeiro e 137mV para o segundo). Por esse fato, foram construídos dois circuitos de amplificação idênticos, com ganho $G = 30$.

Devido à faixa da saída diferencial não amplificada apresentada pelos sensores FSG15N1A e FSS1500NSB ser praticamente a mesma (quando alimentados em 11,3 V e sem carga aplicada e com carga máxima, temos uma faixa de 8 – 150 mV para o primeiro e 13,1 – 150 mV para o segundo), foram construídos dois circuitos de amplificação idênticos, com ganho $G = 30$.

Pode-se observar o esquema do circuito a seguir, FIGURA 3.3, montado no programa ExpressSCH[®]:

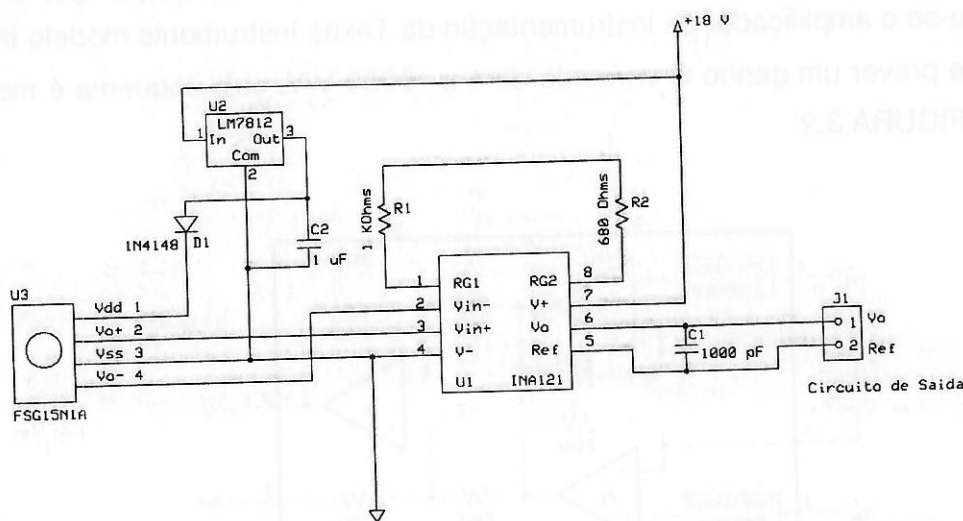


FIGURA 3.3 - Esquemático da interface para os sensores Honeywell FSG15N1A e FSS1500NSB.

Além do amplificador de instrumentação (U1) e do sensor (U3), foram incluídos alguns outros componentes semicondutores. A interface de amplificação foi

alimentada com +18 Volts, ligados diretamente aos pinos de alimentação do INA121. O regulador de tensão 7812 (U2) transforma a tensão de entrada no circuito para um nível compatível com a especificação máxima de alimentação do sensor, sendo que o diodo 1N4148 atua como uma segurança para que este não seja alimentado com mais de 12VDC. Os capacitores C1 e C2 são utilizados para dar estabilidade às saídas do amplificador e do regulador, respectivamente.

O diagrama da placa de circuito impresso confeccionado no ExpressPCB®, é mostrado a seguir, FIGURA 3.4:

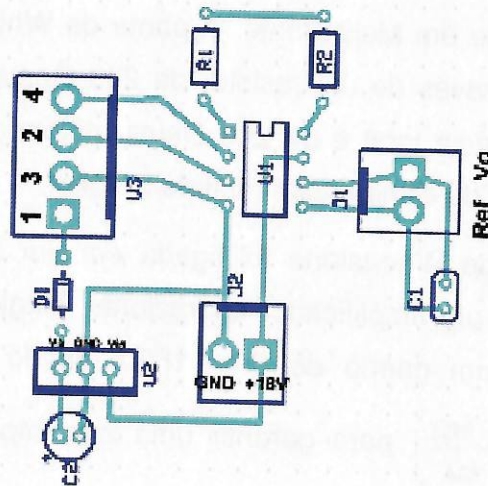


FIGURA 3.4 - Circuito da interface amplificadora dos sensores de força piezoresistivos

As placas foram confeccionadas manualmente, com o uso de uma caneta de ponta fina para acetato, desenhando-se o diagrama acima sobre placas de fibra de vidro recobertas com cobre e, posteriormente, mergulhadas em uma solução de perclorato de ferro, para corrosão. O resultado final é mostrado a seguir, FIGURA 3.5:

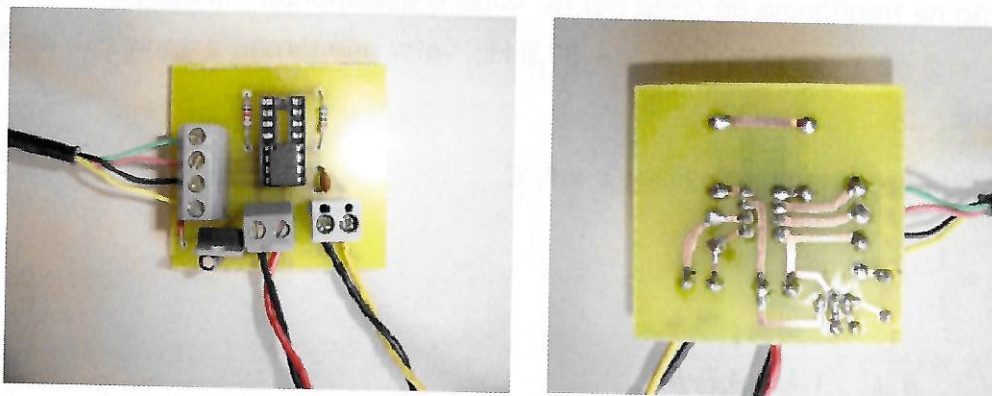


FIGURA 3.5 - Vistas superior e inferior das interfaces amplificadoras desenvolvidas para os sensores de força Piezoresistivos

3.3.2 Desenvolvimento de Interfaces Amplificadoras para Extensômetros

O extensômetro foi então conectado a uma ponte de Wheatstone, dotada não só de resistores, mas também de potenciômetros para permitir o ajuste fino das resistências que formam a ponte.

Inicialmente, montou-se uma ponte de Wheatstone (Um Quarto de Ponte), fixando-se somente um extensômetro na face superior da estrutura. Verificada a alta variação na saída devido a efeitos de variação térmica, decidiu-se pela utilização de um circuito de Wheatstone em Meia Ponte. A ponte de Wheatstone foi alimentada com 2,5 VDC, obtidos através de um resistor de 240 Ohms ligado em série a ela (dada que a sua impedância total é de 240 Ohms, obtendo-se, assim, um divisor resistivo para uma tensão de alimentação total de 5 Volts).

A saída da ponte de Wheatstone foi ligada em um circuito amplificador da diferença, com o uso de um amplificador operacional "single supply" da Microchip, modelo MCP604, com um ganho de $G = 1620$, obtido com valores altos de resistência $\left(G = \frac{R_2}{R_1} = \frac{16,2 \text{ M}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \right)$ para garantir uma alta impedância de entrada no circuito de amplificação. Desta forma, não se drena corrente do circuito da ponte de Wheatstone e a influência da amplificação na saída do circuito de entrada é minimizada.

Foi adicionado um filtro passivo passa-baixa na saída do circuito de amplificação, com o intuito de filtrar ruídos observados ao se ligar a saída do amplificador diretamente à placa de aquisição NI-6009. Para tanto, considerando a atenuação na frequência de corte (f_c) de -3 dB e escolhendo um capacitor de $4,7 \mu\text{F}$ e um resistor de $1 \text{ k}\Omega$, obteve-se $f_c = 33,9 \text{ Hz}$, valor que tornou a aquisição de dados satisfatória.

Constante de tempo do filtro: $\tau = R \cdot C$

$$f_c = \frac{1}{\tau}$$

$$\therefore f_c = \frac{1}{R \cdot C} = \frac{1}{1 \cdot \text{k}\Omega \cdot 4,7 \cdot \mu\text{F}}$$

$$\Rightarrow f_c = 33,86 \cdot \text{Hz}$$

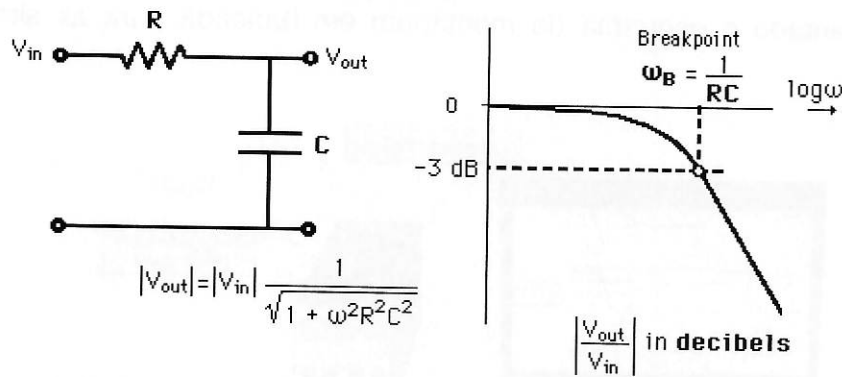


FIGURA 3.6 - Circuito do filtro passa-baixa passivo e diagrama de relação de amplitudes entre saída e entrada (Vout/Vin)

Abaixo é apresentado o esquema elétrico do circuito, composto pelos dois extensômetros, complemento da ponte de Wheatstone, circuito de amplificação e filtro passa-baixa.

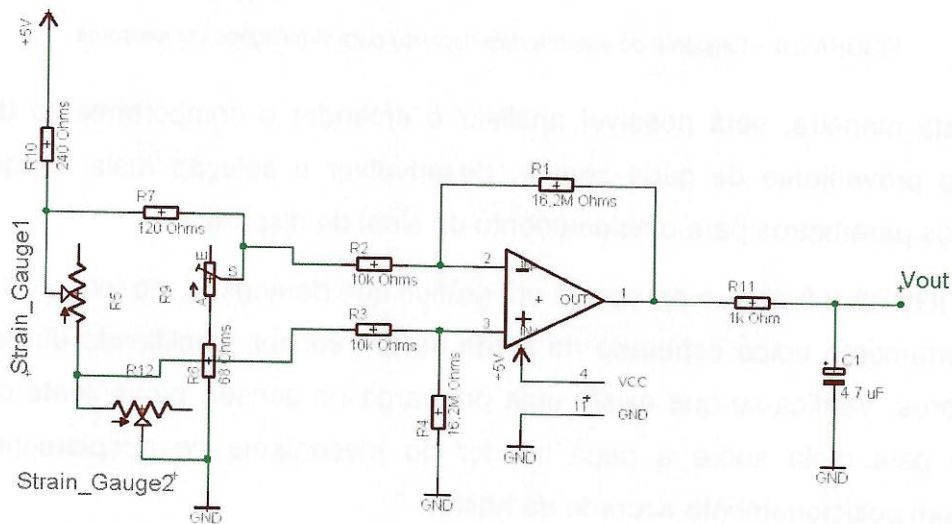


FIGURA 3.7 – Esquema do circuito elétrico desenvolvido pra testes dos extensômetros

3.3.3 Aquisição de Sinais Via LabView®

Os circuitos compostos por sensor e amplificador operacional foram montados em uma bancada. Cargas foram aplicadas sobre cada sensor, simulando o efeito do toque realizado pelo apalpador.

O circuito foi monitorado via software desenvolvido em LabView®, através da aquisição de dados do sinal analógico do sensor utilizando-se um módulo de aquisição de dados modelo NI USB-6009 da National Instruments. Abaixo, FIGURA

3.8, é apresentado o esquema da montagem em bancada para as simulações e análises:

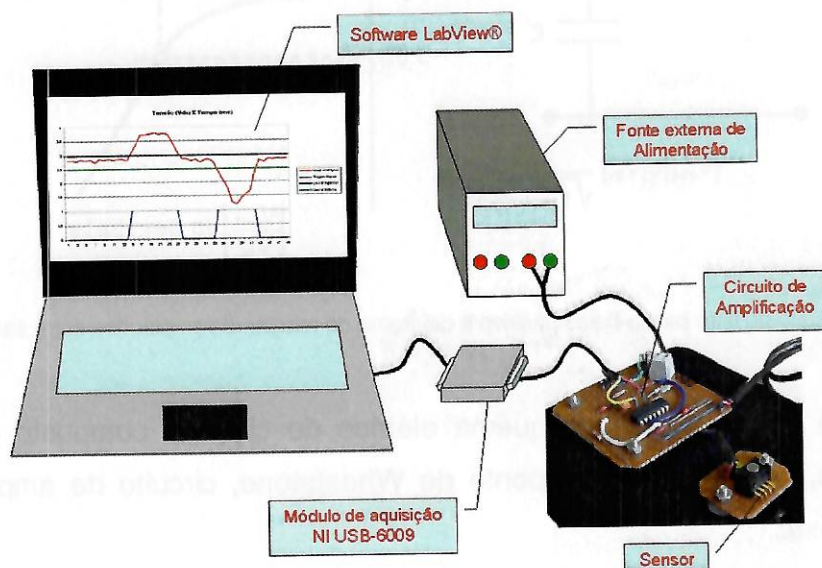


FIGURA 3.8 – Esquema do sistema desenvolvido para simulações em sensores

Desta maneira, será possível analisar e entender o comportamento do sinal analógico proveniente de cada sensor, desenvolver a solução mais adequada e otimizar os parâmetros para o acionamento do sinal de disparo.

A FIGURA 3.9 abaixo apresenta um gráfico que demonstra, ao longo do tempo, o comportamento típico esperado na saída de um sensor amplificado utilizado em apalpadores. Verifica-se que existe uma pré-carga no sensor, proveniente da força exercida pela mola sobre a peça inferior do mecanismo de acoplamento para garantir um posicionamento acurado da haste.

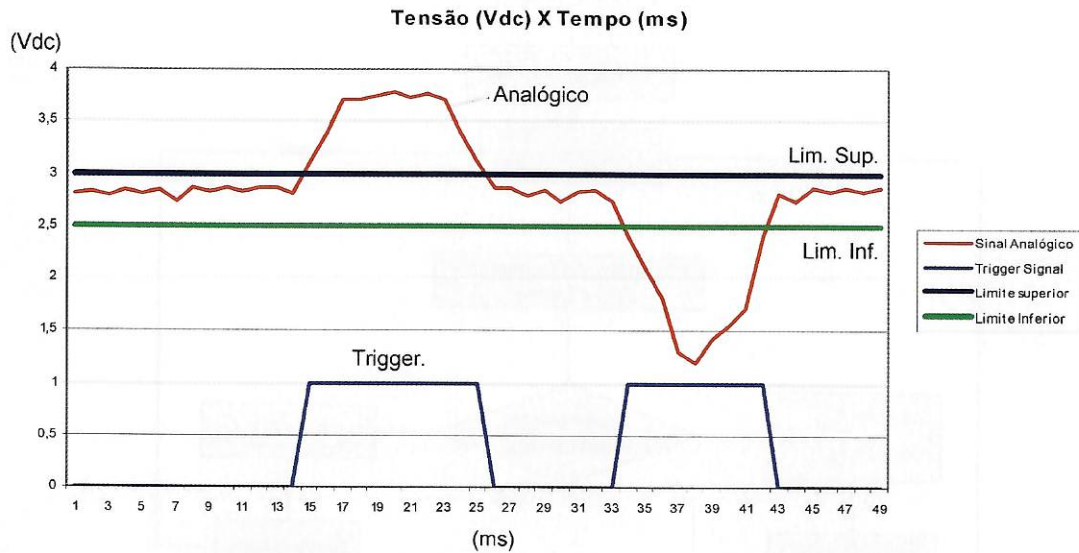


FIGURA 3.9 – Comportamento esperado na saída de um sensor amplificado e método adotado para acionamento do sinal de disparo.

Conforme se observa ainda na FIGURA 3.9, uma técnica possivelmente viável para o controle de um apalpador comutador com sensor analógico consiste na monitoração e comparação do valor do sinal analógico advindo do sensor (lido através de conversão A/D) com os limites superior e inferior de tolerância.

Desta forma, caso o valor do conversor A/D seja maior que o Limite Superior ou menor que o Limite Inferior, haverá o acionamento do sinal de disparo.

O fluxograma representativo dos processos e decisões factível de implementação em microcontrolador é apresentado a seguir, FIGURA 3.10.

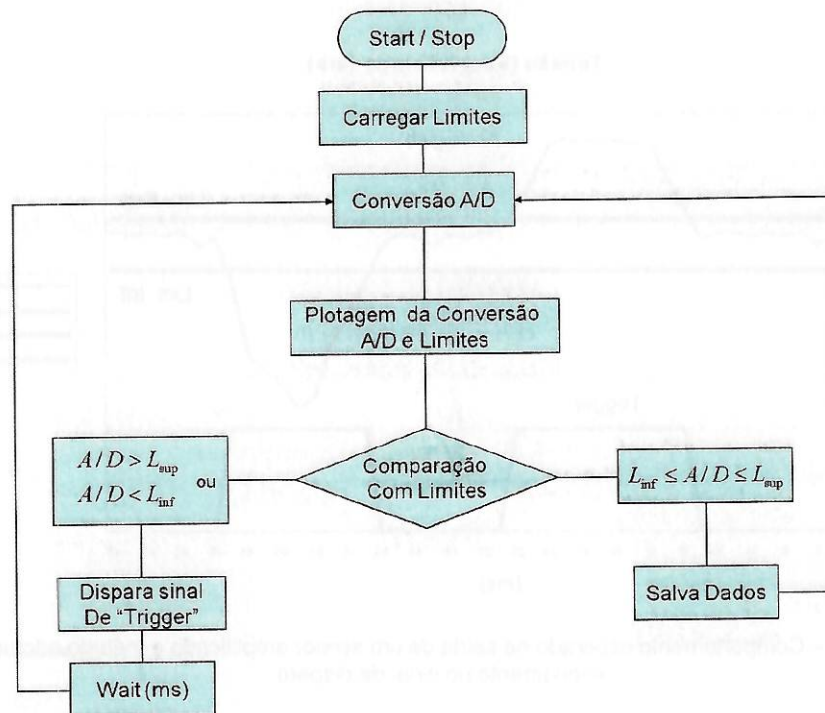


FIGURA 3.10 – Fluxograma representativo do software Labview®

Foi desenvolvido programa em LabView® para monitoramento do sinal dos sensores, tendo em vista o fluxograma apresentado acima.

As funcionalidades do programa desenvolvido em LabView® englobaram:

- Possibilidade de alteração do parâmetro Taxa de aquisição de dados e limites de tolerância Superior e Inferior;
- Possibilidade de salvar os dados obtidos durante todo o período de aquisição.

Pretende-se dessa forma propiciar uma ferramenta para experimentação dos sensores em bancada, proporcionando funcionalidades como, armazenamento eletrônico de dados para análise, fácil modificação de parâmetros e verificação de resultados, troca de sensores e interfaces amplificadoras.



FIGURA 3.11 - Módulo de aquisição de dados USB-6009, National Instruments

Com base no fluxograma proposto e funcionalidades requeridas, o software foi desenvolvido, sendo o diagrama de blocos desenvolvido em LabView® Versão 7.0 apresentado a seguir, FIGURA 3.12.

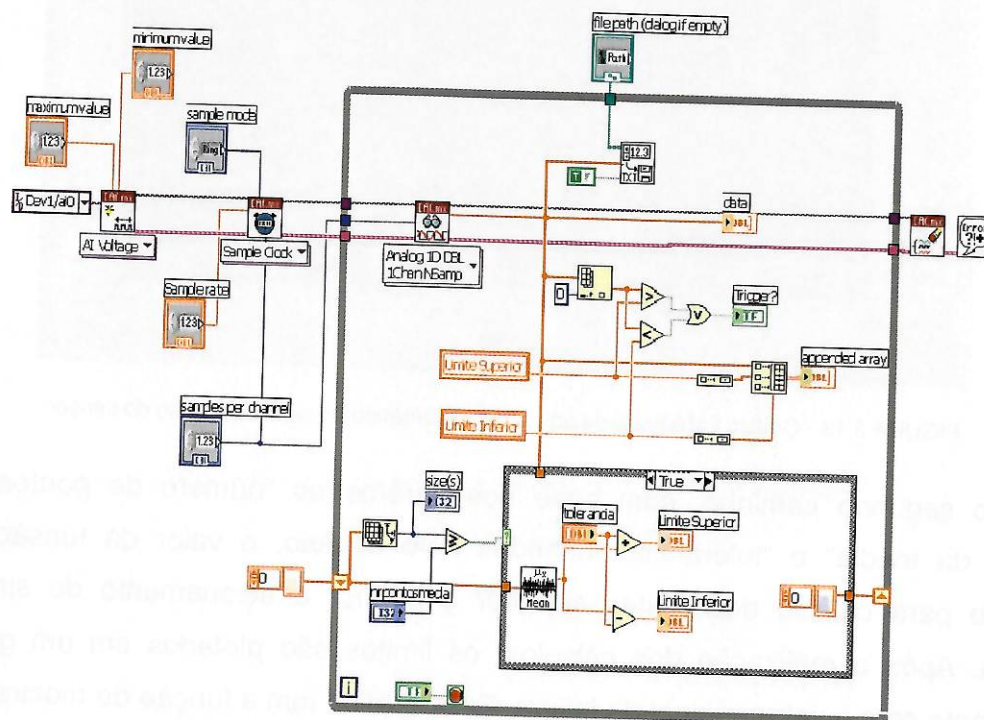


FIGURA 3.12 - Diagrama de blocos do simulador desenvolvido em LabView®

Uma breve descrição do funcionamento do programa é apresentada a seguir:

Inicialmente, é aberto um canal para aquisição de tensão e são especificados os parâmetros desse canal, como porta onde o módulo de aquisição esta instalado e valores máximos e mínimos de tensão.

Criado o canal de aquisição, o próximo passo é o ajuste da taxa e o modo de aquisição (aquisição contínua ou aquisição de um número finito de amostras). Esses

ajustes iniciais são realizados “off-line”, ou seja, antes de se iniciar a aquisição dos dados.

O valor de tensão entra então em uma seqüência repetitiva. A primeira tarefa realizada dentro da seqüência é a leitura do canal (conversão A/D). Após a leitura, o valor do sinal é plotado no gráfico, juntamente com os limites. Em seguida o sinal é comparado com os limites. Paralelamente, o valor original da leitura segue dois caminhos. No primeiro, é imediatamente plotado em um gráfico de ajuste dinâmico que mostra apenas as ultimas aquisições. Esse gráfico tem a função de “amplificar” visualmente o que acontece instantaneamente, ignorando a série histórica de dados,



FIGURA 3.13 - Gráfico LabView® da aquisição instantânea do sinal de tensão do sensor

No segundo caminho, com base nos parâmetros “número de pontos para cálculo da média” e “tolerância” inseridos pelo usuário, o valor da tensão será utilizado para cálculo dos limites superior e inferior e acionamento do sinal de disparo. Após a realização dos cálculos, os limites são plotados em um gráfico, juntamente com o valor original da leitura. Esse gráfico tem a função de mostrar uma série histórica de dados adquiridos de forma a explicitar tendências, FIGURA 3.14.

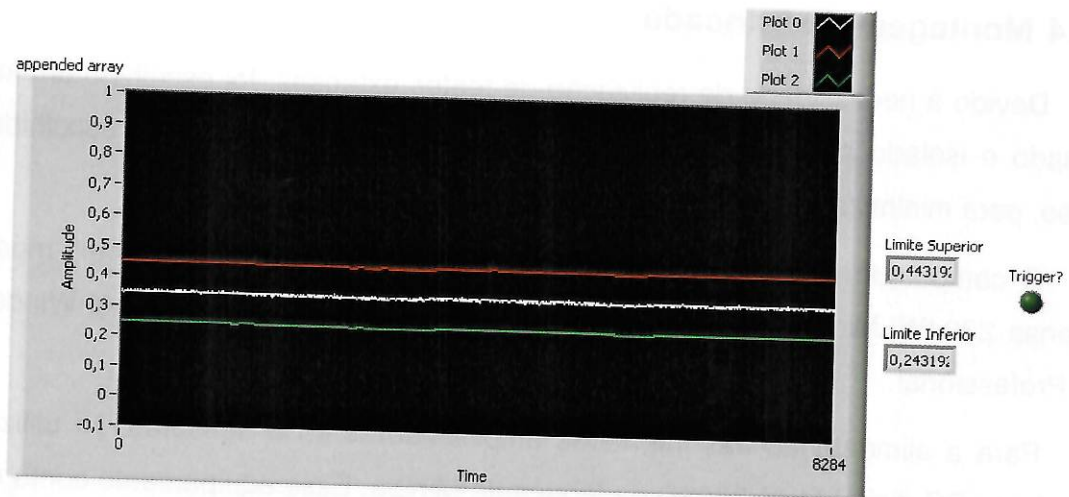


FIGURA 3.14 - Gráfico LabView® da série histórica de aquisição do sinal de tensão do sensor

Abaixo, FIGURA 3.15, é apresentada a tela frontal completa do programa desenvolvido, onde se pode visualizar todas as informações em uma mesma tela, trocar parâmetros como ajuste do canal, modo e taxa de aquisição de dados, valores máximos e mínimos de tensão da aquisição e selecionar o arquivo e diretório onde a série de dados é salva.

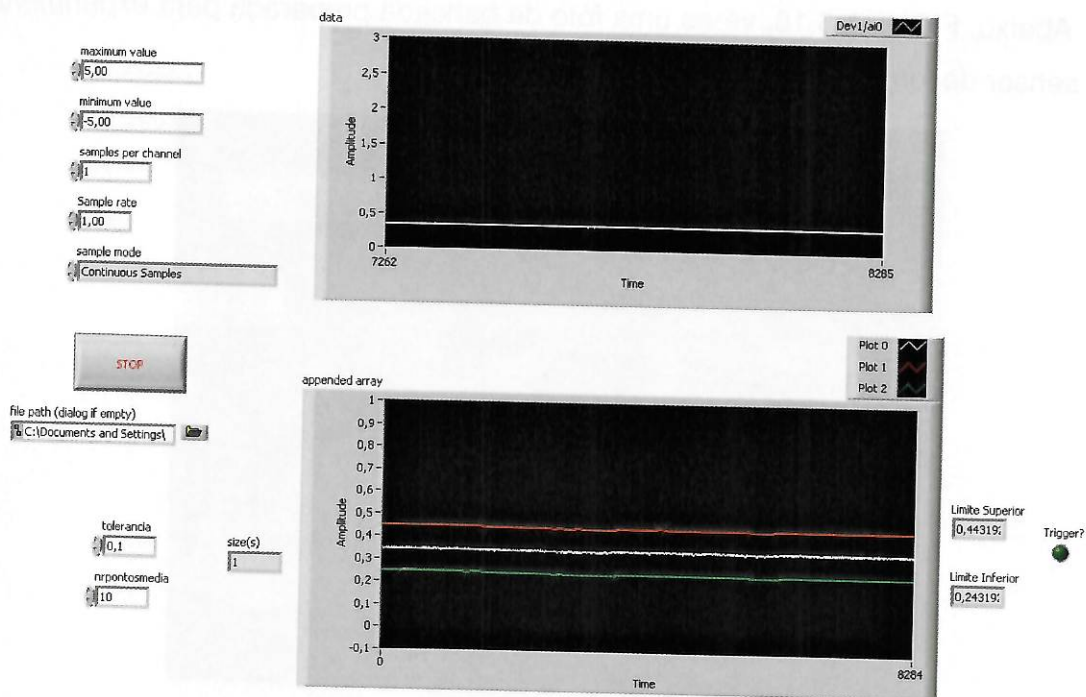


FIGURA 3.15 - Tela frontal do simulador desenvolvido para testes dos sensores

3.3.4 Montagem da Bancada

Devido à necessidade de realização de testes extensos, foi escolhido um local fechado e isolado para a instalação da bancada. Além disso, o local escolhido é térreo, para minimizar o efeito de vibrações.

O computador utilizado para rodar o simulador foi um Laptop Acer, modelo Extensa 2304WLMi, com 512Mb de memória RAM e sistema operacional Windows XP Professional.

Para a alimentação das interfaces amplificadoras e do sensores, foi utilizada uma fonte DC digital MPS-3003D da fabricante Minipa. Esse equipamento conta com display de 3 dígitos (tensão e corrente), é capaz de fornecer uma saída variável com tensão de 0 a 30V DC e corrente de 0 a 3A DC. Possui ajuste grosso e fino tanto para tensão como para corrente, além de proteção de sobrecarga e inversão de polaridade.

A bancada é composta também pelo sensor, circuito de amplificação, módulo de aquisição de dados USB, cabos elétricos e conexões.

Abaixo, FIGURA 3.16, vê-se uma foto da bancada preparada para experimento com sensor de força Honeywell modelo FSG15N1A

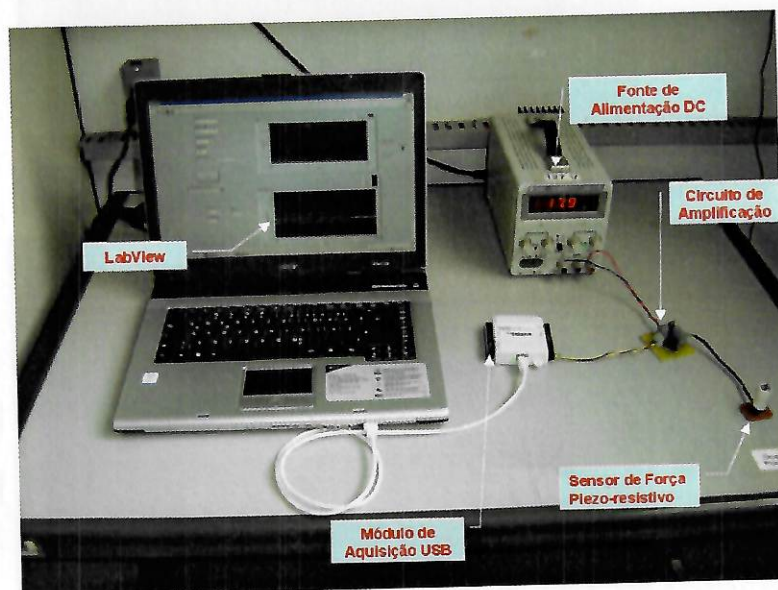


FIGURA 3.16 - Bancada para testes e simulações dos sensores

Algumas notações são feitas aqui para facilitar a comparação dos parâmetros entre os sensores:

I_n : Corrente nominal consumida pelo conjunto circuito de amplificação + sensor, expressa em milivolts.

V_{min} : Tensão apresentada na saída do sensor, após amplificação, quando nenhuma carga é aplicada sobre o mesmo, expressa em volts;

V_{max} : Tensão apresentada na saída do sensor, após amplificação, quando o mesmo é submetido à máxima carga suportada, expressa em volts;

C_{max} : Carga máxima suportada pelo sensor, expressa em gramas;

S_t : Sensibilidade teórica do sensor: definida como a razão $(V_{max} - V_{min}) / C_{max}$, expressa em milivolts/grama.

3.4 Extensômetros

Os Extensômetros são elementos bastante flexíveis, cuja utilização em sensoriamento e fabricação de células de carga é bastante conhecida e aplicada. Devido ao fato dos extensômetros serem extremamente pequenos, finos e sua aplicação se dar diretamente na superfície onde se deseja medir a deformação, tornam-se elementos naturais de escolha para a utilização no presente projeto, sendo o critério INTEGRAÇÃO um grande diferencial.

Apesar de não se tratar de um método inédito, a fabricante inglesa Renishaw utiliza essa tecnologia na fabricação de apalpadores comutadores para máquinas de medir por coordenadas e centros de usinagem, é possível projetar um arranjo de extensômetros de forma a não incorrer em violações de patentes.

Com base nas informações obtidas na revisão da literatura, a primeira conclusão que se chega é que a utilização de dois extensômetros em uma meia ponte e conseqüente amplificação (um dos métodos mais simples), teria um consumo excessivo para um sistema alimentado por pilhas ou baterias, visto que os apalpadores comutadores não possuem cabos conectando-os à máquina-ferramenta, tornando o critério CONSUMO um grave problema para a utilização dessa tecnologia.

Porém, a tecnologia avançou e atualmente já estão disponíveis comercialmente extensômetros cuja resistência elétrica atinge a casa de alguns milhares de ohms, com alto fator de sensibilidade, mantendo boa linearidade e baixa

variação térmica. No campo da eletrônica, já estão disponíveis comercialmente amplificadores operacionais de instrumentação, que consomem cerca de 0,5mA, frente aos 10mA consumidos por amplificadores operacionais padrão. Com o advento de conversores A/D de 24bit de resolução, poderão tornar possível a leitura direta dos valores de tensão do extensômetro caso seja necessário, eliminando completamente a etapa de amplificação, o que reduz a complexidade, custo e consumo do circuito elétrico.

Para a utilização de extensômetros resistivos como transdutores no projeto, buscou-se por um modelo que atendesse às seguintes exigências:

- Tamanho reduzido;
- Tensão de alimentação da ponte de até 5VDC;
- Alta resistividade ôhmica;
- Grande disponibilidade no mercado.

Após pesquisa por fornecedores e modelos mais adequados, levando-se em conta as exigências de projeto, optou-se pelo modelo 1-LY11-1.5/120 da empresa Alemã HBM, com representação em São Paulo.

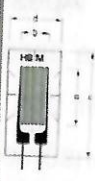
Tipos		Variações	Re-sis-tên-cia Nominal	Dimensões (mm) [1 inch = 25.4 mm]				Máxima tensão efetiva de alimentação da ponte	Term. de solda
Aço	Alumínio			Medidas do grid		Medidas Totais			
		Outros	Ω	a	b	c	d	V	
1-LY11-1.5/120			120	1.5	1.2	6.5	4.7	2.5	LS 7

FIGURA 3.17 – Modelo de extensômetro escolhido para experimentos

Parâmetros do extensômetro escolhido:

- Resistência Nominal: 120 Ω ;
- Dimensões externas (Largura x Altura): 4,7x6,5mm;
- Dimensões do "Grid" (Largura x Altura): 1,2x1,5mm;
- Tensão máxima de alimentação da ponte: 2,5 VDC.

Verificou-se que o parâmetro “Resistência Nominal” é proporcional ao parâmetro “Máxima tensão de alimentação da ponte”, de forma que não é possível encontrar um extensômetro com alta resistência nominal e baixa tensão de alimentação.

Como a potência consumida varia com o quadrado da tensão, ($P = \frac{U^2}{R}$), optou-se por um extensômetro com baixa tensão de alimentação e alta resistência, com o intuito de manter a potência consumida no menor nível possível.

Em uma placa de aço mola AISI-9255 de 2 mm de espessura, foi usinado um perfil em forma de U, constituindo assim uma estrutura em balanço, com 12 mm de comprimento, FIGURA 3.18. Sobre a extremidade livre da viga foi aplicada uma força para causar deflexão da mesma. Esta deformação é medida pelo extensômetro colado na extremidade engastada da viga.

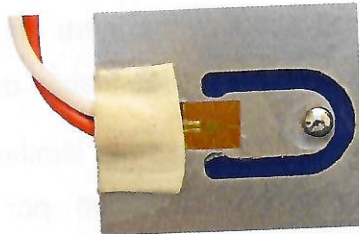


FIGURA 3.18 – Extensômetro colado em uma viga em balanço.

Conforme descrito no item 3.3.2, Desenvolvimento de Interfaces Amplificadoras para Extensômetros, os extensômetros foram conectados em uma Meia-Ponte de Wheatstone onde foram realizados experimentos iniciais.

O circuito foi então conectado ao sistema de aquisição de sinais via LabView, onde o sinal advindo dos extensômetros foi monitorado através do simulador desenvolvido para testes dos sensores.

Por meio da aplicação de pesos sobre a extremidade livre da viga em balanço, notou-se que o sinal dos extensômetros tinha relação direta com a força aplicada, apresentando boa linearidade. Porém, observou-se a ocorrência do fenômeno de histerese quando era invertido o sentido de aplicação da força, FIGURA 3.19.

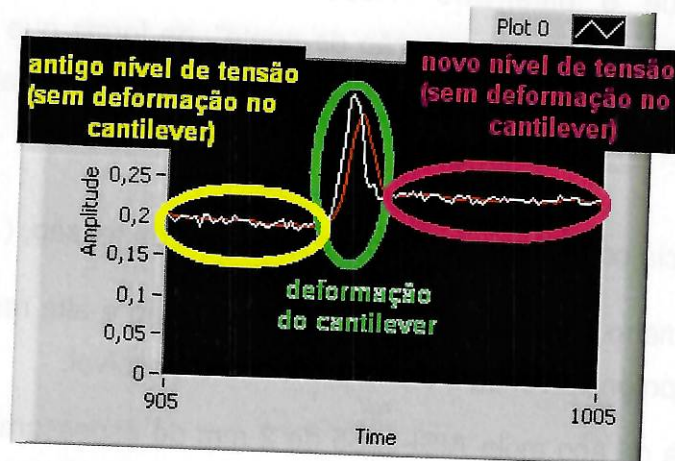


FIGURA 3.19 - Gráfico demonstrando a ocorrência do fenômeno de histerese.

3.5 Sensores de Força Piezoresistivos

Os sensores de força piezoresistivos são uma novidade no mercado, não sendo possível encontrar artigos acadêmicos, nem mesmo informações na mídia / Internet que tratem da sua utilização para a fabricação de apalpadores.

Seu princípio de funcionamento é bastante similar aos extensômetros, sendo que, internamente, os sensores são formados por elementos piezoresistivos montados em forma de uma ponte de Wheatstone. Desta maneira, a mesma aplicação desenvolvida para os testes com extensômetros pode ser diretamente transferida para os experimentos com os sensores de força piezoresistivos.

Tratando-se de um sensor formado por elementos semicondutores, sua resistência elétrica é da ordem de $5k\Omega$, o que proporciona um baixo consumo.

Durante o processo de pesquisa bibliográfica e busca por fornecedores, foi possível a localização de apenas um fabricante, a Honeywell, que disponibiliza comercialmente esses componentes em alto volume. Foram adquiridas amostras de dois de seus modelos para a realização de experimentações e testes.

Os sensores de força piezoresistivos comerciais são fornecidos em invólucros miniaturizados patenteados, em dois formatos diferentes, conforme FIGURA 3.20. As dimensões e encapsulamento não impedem sua inserção em apalpadores, porém a integração do transdutor com os demais subsistemas se mostra um problema.

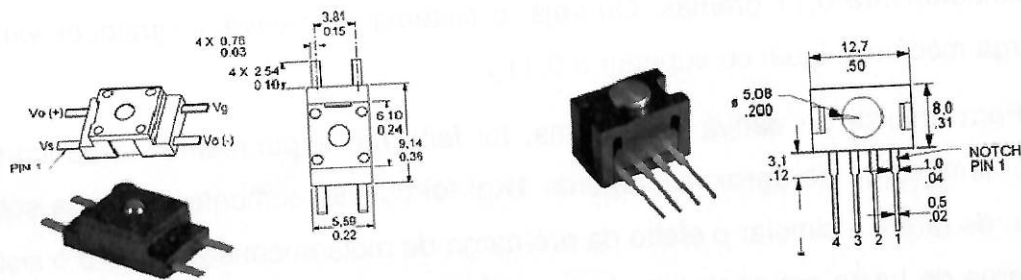


FIGURA 3.20 - Dois diferentes tipos de encapsulamento de sensores de força piezoresistivos. [FONTE: HONEYWELL (2008)]

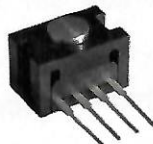
A seguir, são detalhados os resultados dos testes e simulações obtidos para os sensores de força piezoresistivos da Honeywell.

Conforme descrito anteriormente, dois modelos de sensores de força piezoresistivos foram pré-selecionados para a fase de testes e simulações.

Sensor de força Piezoresistivo modelo FSG15N1A:

Abaixo, TABELA 3-1, encontram-se os valores dos parâmetros obtidos para o sensor de força piezoresistivo modelo FSG15N1A.

TABELA 3-1 - Parâmetros obtidos para o sensor de força FSG15N1A



Parâmetros obtidos FSG15N1A	
I_n	8mA
V_{min}	0,34V
V_{max}	4,52V
S_t	2,786mV/g

Observa-se que a corrente nominal do circuito é de 8mA. A quase totalidade desse valor é consumida pelo regulador de tensão utilizado no circuito (LM-7812), ou seja, a substituição desse componente por um similar de baixo consumo irá baixar o valor para algo em torno de 3mA.

Utilizando-se o conversor A/D de 14bits do módulo de aquisição USB, teremos à disposição 16.383 divisões. Configurando o canal de aquisição de tensão para funcionar de 0 a 5V, teremos uma resolução do A/D de 0,305mV. Como a sensibilidade do sensor é de 2,786mV/g, o sistema terá uma resolução final de

aproximadamente 0,11 gramas. Ou seja, o sistema é sensível a qualquer variação de carga mecânica igual ou superior a 0,11g.

Para análise da deriva do sistema, foi feito um experimento na bancada de testes. Uma carga de aproximadamente 1Kgf foi cuidadosamente colocada sobre o sensor, de forma a simular o efeito da pré-carga da mola encontrada sobre o sistema de retorno da haste em apalpadores comutadores do tipo Kinematic Contact. Desta forma faz-se a simulação da troca de um dos três apoios cinemáticos pelo sensor de força, capaz de forças aplicadas sobre a haste em certas direções.

Foi realizada a captura de dados do sensor por um período de dois dias, desprezando-se as primeiras e as últimas 1,5 horas por motivo de aquecimento do sistema elétrico e presença física dentro da sala. Assim foram colhidos dados válidos de 45 horas consecutivas, a uma taxa de aquisição de um ponto por segundo e a gravação dos dados em um arquivo texto. A sala onde o experimento foi realizado permaneceu trancada durante todo o período para evitar ao máximo a influência de parâmetros alheios ao processo.

Após a coleta e armazenamento, os dados foram transferidos para o software ORIGIN[®] devido à quantidade de pontos ser superior a 32.000 (valor máximo permitido para tratamento no Excel[®]). A seguir, FIGURA 3.21, é apresentado o gráfico que representa o processo durante o período analisado:

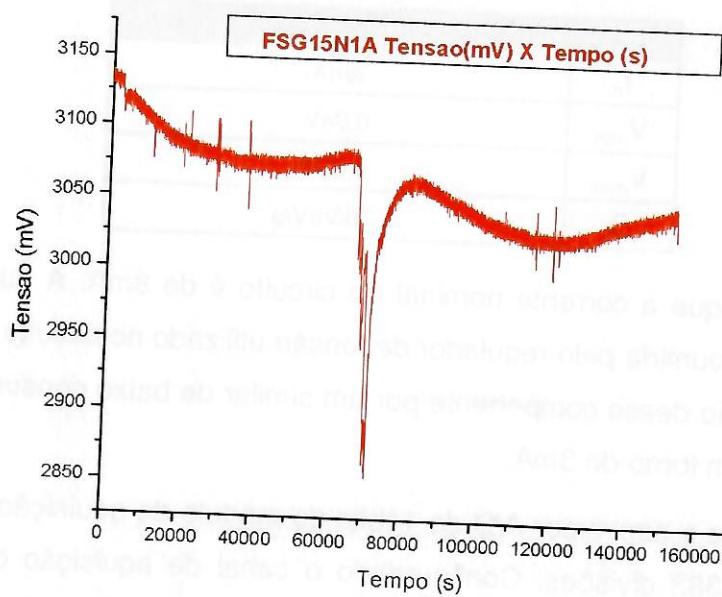


FIGURA 3.21 -Aquisição de dados do sensor FSG15N1A pelo período de 45 horas

Para análise do gráfico, foi realizada uma divisão do mesmo em 3 partes que serão tratadas distintamente a seguir:

Primeiros 60.000 segundos (aproximadamente 17 horas)

Durante esse período, o gráfico apresenta um comportamento bem definido, com um inicial decaimento do sinal (deriva de 55mV) e posterior estabilização. No final desse período, uma pequena recuperação do sinal é observada.

De 60.000 a 81000 segundos (aproximadamente 6 horas)

Inicialmente ocorre uma abrupta queda do sinal de tensão advinda do sensor (queda de 220mV), aparentemente indicando que algum fator externo (causa especial de variação) influenciou na medida obtida. Essa variação pode ter sido causada por uma repentina queda de tensão na rede elétrica, trincas no cristal piezoresistivo, acomodação da carga sobre o sensor, dentre outros.

Após, verifica-se uma recuperação do sinal, indicando que o sistema tenta se estabilizar a valores próximos aos obtidos anteriormente à incidência da causa externa de variação.

De 81000 segundos em diante (aproximadamente 20 horas)

Inicialmente observa-se uma queda gradual da tensão advinda do sensor seguida de estabilização, similarmente ao ocorrido no início do experimento. Após esse período, verifica-se uma recuperação do sinal até o fim do experimento.

Considerações sobre os resultados obtidos

O experimento demonstrou a ocorrência de uma causa especial de variação atuando sobre o sistema, cuja fonte não pode ser determinada com exatidão.

O sensor não apresenta um comportamento estável e linear, variando a saída em cerca de 5% no decorrer do experimento, desprezada a causa especial de variação. Observa-se que esse experimento fornece informações sobre a faixa de tolerância a ser adotada para acionamento do sinal de disparo, caso fosse usado esse sensor para disparo do apalpador comutador.

Com base na variação do sinal advindo do sensor, desprezando-se o vale gerado pela causa especial de variação, se verifica que sua amplitude de variação se encontrou na faixa de 150mV.

Para inferirmos a respeito da resolução desse transdutor, caso o apalpador utilizasse diretamente este sensor para “sentir” o toque com a peça, podemos definir uma tolerância igual a duas vezes a amplitude verificada (desprezando-se o vale gerado pela causa especial de variação) como limite para acionamento do sinal de disparo. Utilizando a relação de 2,786mV/g do sensor, o apalpador teria uma sensibilidade para disparo do sinal de aproximadamente 8,4N, podendo gerar “pré-travel” muito grande, especialmente para o uso de hastes longas.

Sensor de força Piezoresistivo modelo FSS1500NSB:

A seguir, TABELA 3-2, encontram-se os valores dos parâmetros obtidos para o sensor de força piezoresistivo modelo FSS1500NSB da Honeywell.

TABELA 3-2 - Parâmetros obtidos para o sensor de força FSS1500NSB



Parâmetros obtidos FSS1500NSB	
I_n	8mA
V_{min}	0,38V
V_{max}	4,43V
S_t	2,70mV/g

Observa-se que a corrente nominal do circuito também é de 8mA devido à utilização do regulador de tensão LM-7805, ou seja, a substituição desse componente por um similar de baixo consumo poderá baixar o valor para algo em torno de 3mA.

Como a sensibilidade do sensor é de 2,70mV/g, de maneira análoga ao realizado para o sensor FSG15N1A, o sistema terá uma resolução final de aproximadamente 0,11grama. Ou seja, o sistema é sensível a qualquer variação de carga mecânica igual ou superior a 0,11g.

Diferentemente da família FSG de sensores de força piezoresistivos da Honeywell, a família FSS não apresenta o disco circular para aplicação direta de carga, mas sim uma pequena esfera de aço temperado, sobre a qual a carga deve ser aplicada.

Por esse motivo, um dispositivo para simular o efeito da pré-carga da mola foi desenvolvido, FIGURA 3.22. Esse dispositivo é útil também para simular a aplicação de uma força constante sobre o sensor e determinar o comportamento do sinal ao longo do tempo.

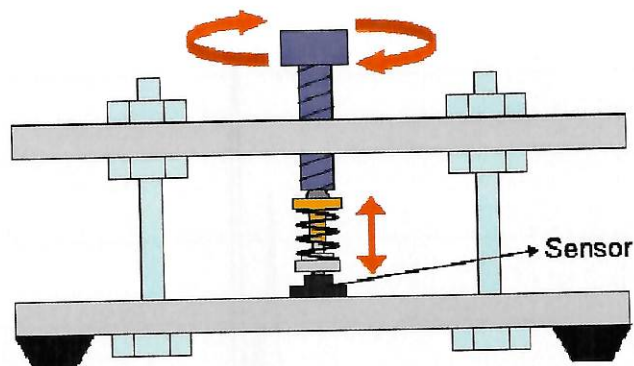


FIGURA 3.22 - Ilustração do dispositivo para simulação de efeito de pré-carga no sensor FSS1500NSB

A rotação do parafuso central do dispositivo acarreta uma variação na compressão da mola, que conseqüentemente, exerce maior ou menor carga sobre o sensor. Para a realização das simulações, a compressão da mola foi ajustada de forma que a saída do sensor fosse de 3080mV, valor que representa a aplicação de uma carga de 1Kgf sobre o sensor.

Abaixo, FIGURA 3.23, é apresentada uma foto do dispositivo fabricado.

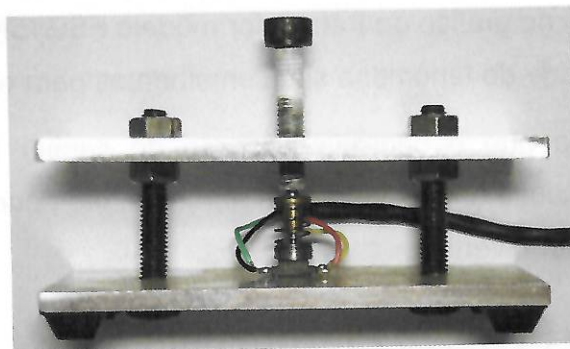


FIGURA 3.23 - Foto do dispositivo para simulação de efeito de pré-carga no sensor FSS1500NSB

De maneira análoga, foi realizada a captura de dados do sensor por um período de aproximadamente 45 horas consecutivas, a uma taxa de aquisição de um ponto a cada segundo e a gravação dos dados em um arquivo texto. A sala onde o experimento foi realizado permaneceu trancada durante todo o período para evitar ao máximo a influência de parâmetros alheios ao processo.

A seguir, FIGURA 3.24, se apresenta o gráfico que representa o processo durante o período analisado:

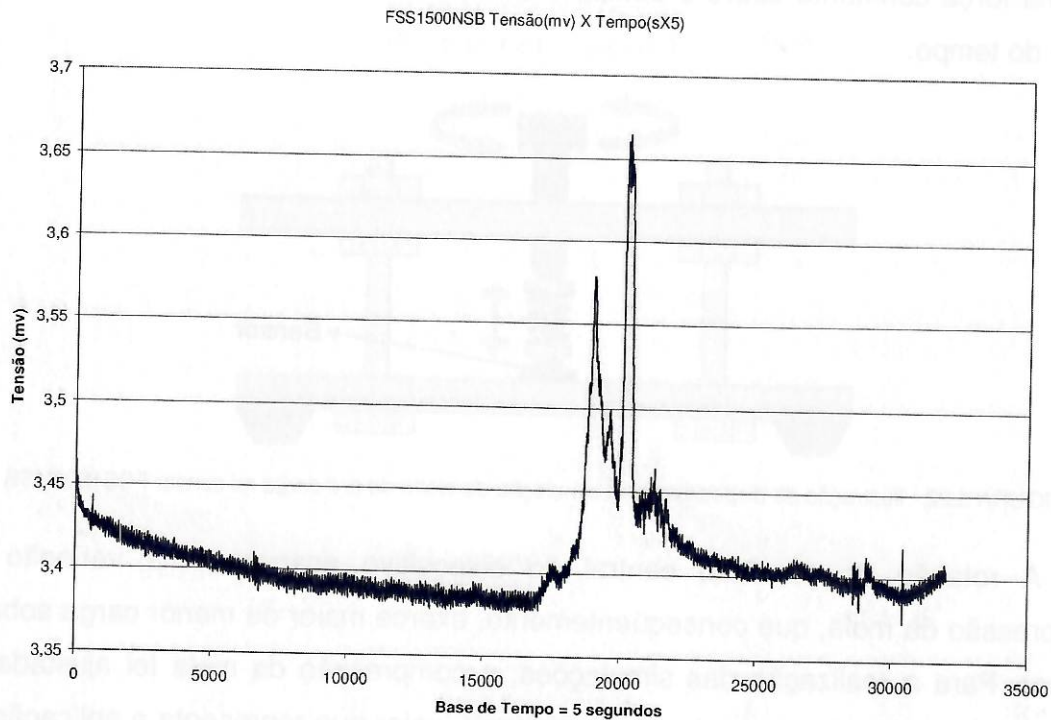


FIGURA 3.24 - Aquisição de dados do sensor FSS1500NSB pelo período de 45 horas

Verifica-se a ocorrência de uma causa especial de variação atuando no sentido contrário ao observado no gráfico do transdutor modelo FSG15N1A. Observa-se que a duração e a intensidade do fenômeno são semelhantes para os dois sensores.

Da mesma forma que o ocorrido no caso do sensor FSG15N1A, não foi possível determinar a causa de tais variações abruptas, tão pouco o motivo pelo qual o sentido de variação ser invertido.

3.6 Sensores de Pressão Piezoresistivos

Conforme descrito anteriormente, sensores piezoresistivos de pressão são fabricados desde meados da década de 1950, sendo amplamente utilizados na indústria. Os métodos de fabricação, fusão de conectores, implantação de piezoresistores e técnicas de encapsulamento são bastante conhecidos e há um constante aprimoramento visando redução de custos de fabricação e aumento da qualidade dos componentes fabricados.

Existem comercialmente dezenas de fabricantes de sensores de pressão piezoresistivos, disponíveis em diversos tipos de encapsulamento, sendo que existe ainda a possibilidade de aquisição apenas do elemento sensor, ou “chip”, contento a membrana e os piezoresistores, sem encapsulamento.

Da mesma forma que os sensores de força piezoresistivos, por se tratar de transdutores formados por elementos semicondutores, sua resistência elétrica é da ordem de 5kohms, o que proporciona um baixo consumo.

Durante o trabalho de pesquisa e busca por fornecedores, foi possível estabelecer uma boa relação com os fabricantes Freescale, USA e Merit Sensors Systems, Canadá, sendo que o primeiro nos forneceu amostras de vários sensores nos diversos encapsulamentos e faixas de pressão e o segundo nos auxiliou tecnicamente na busca por uma solução que pudesse viabilizar a implantação de sensores de pressão nos apalpadores, além de fornecer sensores com encapsulamento cerâmico e elementos sensores para testes.

O grande desafio do uso de sensores de pressão nos apalpadores se encontra na integração do sensor ao mecanismo de posicionamento da haste. Por mais sensível que seja o sensor de pressão, de algum modo deve-se construir um êmbolo capaz de transformar a movimentação da haste em variação de pressão para o sensor.

Após vários esboços e contatos realizados com os fornecedores, não foi possível encontrar uma solução razoável que possibilitasse a inserção direta dos sensores de pressão ao equipamento de forma a garantir exatidão das medições e durabilidade, visto que membranas flexíveis e compartimentos totalmente selados deveriam ser projetados. Esses elementos tenderiam a perder suas características de flexibilidade e vedação com o passar do tempo.

Desta forma partiu-se para a tentativa de excitar direta e mecanicamente o diafragma de silício do elemento sensor, visto que isso abriria algumas possibilidades para a utilização do sensor.

Foram testados diferentes tipos de sensores que suportavam diferentes faixas de pressão. A seguir, FIGURA 3.25, é apresentada uma foto obtida pelo sistema de captura de imagens Zeiss AxioCam MRc e microscópio Zeiss modelo Stemi 2000-C do elemento sensor do sensor de pressão Freescale modelo MPXM2010D, capaz de

suportar 1,45PSI (o maior valor suportado pelos modelos desse fabricante é de 150PSI).

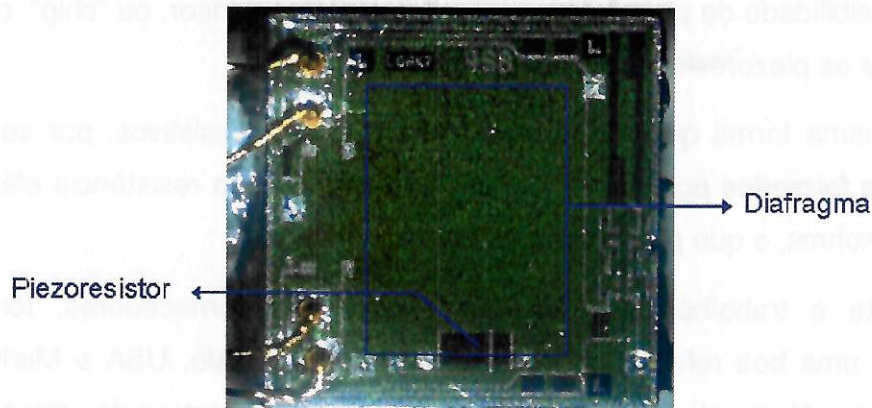


FIGURA 3.25 - Foto obtida em microscópio do diafragma de um sensor de pressão antes do teste de excitação mecânica direta.

Para ter acesso ao diafragma, foi necessária a remoção parcial do encapsulamento, de modo a garantir que o “chip” continuasse fixo à base e com os fios e conectores intactos, fornecendo um ambiente propício para a realização dos experimentos, FIGURA 3.26:



FIGURA 3.26 - Remoção da tampa superior do sensor de pressão para acesso ao diafragma

A excitação sobre os diafragmas foi realizada manualmente, através de um fio de cobre flexível de 1mm de diâmetro com cobertura de borracha de 2mm de diâmetro externo.

De acordo com (MAXIM, 2001), a espessura do diafragma dos sensores de pressão piezoresistivos disponíveis comercialmente fica na faixa de 5 a 50 micrometros. Assim, a escolha pela excitação via fio de cobre flexível com encapsulamento de borracha é adequada para testes iniciais, visto que a cobertura de borracha tende a proteger o diafragma contra riscos.

Conforme é observado na FIGURA 3.27, o resultado preliminar, puramente exploratório, demonstra que o diafragma dos sensores de pressão piezoresistivos é extremamente delicado e não suporta a aplicação direta de uma força mecânica.

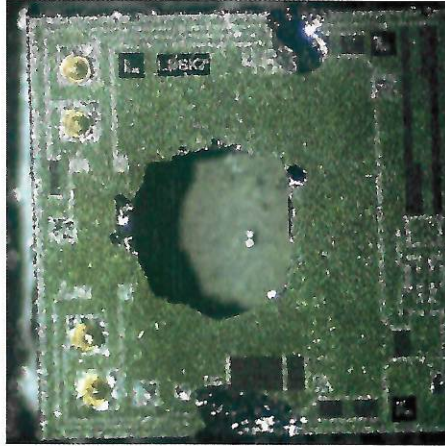


FIGURA 3.27 - Espessura reduzida e fragilidade dos cristais impedem excitação direta do diafragma de sensores de pressão piezoresistivos.

Observa-se ainda que o simples contato com o fio de teste foi capaz de destruir as conexões elétricas e danificar a matriz de silício em vários pontos.

Esse experimento preliminar foi replicado para sensores com diferentes faixas de pressão, encapsulamentos, e fabricantes, sendo observado resultados similares em todos os casos.

3.7 Sensores de Toque Resistivos

Novos materiais e técnicas empregadas na fabricação de sensores táteis e de toque possibilitam a obtenção de sensores que apresentam excelentes características. A utilização de pastas e tintas resistivas de polímeros e prata, juntamente com técnicas avançadas de impressão, possibilita a construção de sensores de toque extremamente finos, flexíveis, robustos e duráveis, sendo que alguns fabricantes garantem funcionamento estável de seus sensores até 5.000.000 de ciclos e suportar pesos de até 25Kgf.

A interface necessária para aquisição dos sinais dos sensores é relativamente simples, composta apenas por amplificadores operacionais e alguns resistores. A resistência elétrica desses sensores é extremamente alta, na casa de $20M\Omega$ sem carga e $20K\Omega$ à carga máxima, tornando-os bastante apropriados para aplicações que requerem baixo consumo.

A busca por fornecedores retornou dois fabricantes que atendem às especificações preliminares de miniaturização, flexibilidade e faixa de medição. Optou-se pela escolha do fornecedor americano Tekscan, que fornece uma linha de sensores de toque analógicos denominada FlexiForce, FIGURA 3.28.



FIGURA 3.28 - Sensor de toque analógico FlexiForce A201. [FONTE: TEKSCAN, (2006)]

De acordo com TEKSCAN (2006), esses sensores são extremamente finos, impressos em um circuito flexível. São construídos em duas camadas, em filmes de poliéster e poliamida. Em cada camada, um material condutivo (prata) é aplicado, seguido por uma camada de tinta sensível à pressão. Em seguida, as duas camadas são coladas para formar o sensor. A área sensível é definida pelo círculo prateado. O circuito impresso em prata se estende até os conectores do sensor, formando as trilhas que conduzirão o sinal.

Abaixo, TABELA 3-3, são apresentadas as principais características dos sensores FlexiForce A201:

TABELA 3-3 - Detalhamento das características dos sensores FlexiForce A201. [FONTE: TEKSCAN, (2006)]

Sensor A201	
Propriedades Físicas	
Espessura	0,208mm
Largura	14mm
Área sensível	Circular: Diâmetro de 9,53mm
Performance	
Erro de Linearidade	<+/-5%
Repetibilidade	<+/-2,5% em fundo de escala
Histerese	<4,5% do fundo de escala
Drift	<5% por escala de tempo logarítmica
Tempo de resposta	<5 microsegundos
Temperatura de operação	(-9°C a 60°C)
Faixa de Força	(0 a 110 N)
Variação Térmica	Saída varia até 0,6% por °C

O sensor A201 foi devidamente conectado a uma entrada analógica do módulo de aquisição de dados USB-6009. Sobre o sensor foram sendo adicionadas pequenas esferas de chumbo, cujo peso era anteriormente medido em uma balança digital com resolução de 0,1 grama. Os pesos foram adicionados até se atingir 1Kgf e posteriormente foram sendo retirados na ordem inversa em que foram inseridos.

Os dados obtidos mostraram uma amplitude de variação de 0,25VDC entre a aplicação de zero e 1Kgf. Esses dados nos permitem verificar que o sensor é capaz de resolver 0,25mV/g. Segundo dados do catálogo, esse sensor apresenta inda erros de linearidade, repetitividade, histerese e drift, que podem adicionar maior incerteza a resolução do sensor.

3.8 Resultado da Escolha dos Transdutores

A seguir são apresentados os resultados obtidos da avaliação dos transdutores.

3.8.1 Extensômetros

Avaliando o desempenho do circuito através do software de aquisição de dados desenvolvido no LabVIEW, descrito no Item: Aquisição de Sinais Via LabView®, observou-se claramente a ocorrência do fenômeno de histerese entre a “ida” e a “volta” do sinal quando uma força é aplicada à extremidade livre da viga em balanço

Foi então desenvolvido um novo algoritmo mais robusto para compensação da histerese e “drift”. O modelo foi implementado, demonstrando a versatilidade e possibilidades de tratamento de sinais analógicos via software.

Porém, o tratamento desses fenômenos pode acabar por maquiar problemas mecânicos reais como uma colisão do apalpador com a peça. Por esse motivo, o tratamento de fenômenos como histerese e “drift” por software não é adequado para a aplicação em questão.

Ponderando todos os dados obtidos nessa avaliação inicial, tem-se a matriz de avaliação para o uso dos extensômetros, TABELA 3-4.

TABELA 3-4 - Avaliação sobre o uso de extensômetros no projeto

TECNOLOGIA \ CRITÉRIO	Método Inédito (0 a 2)	Simplicidade (0 a 2)	Robustez (0 a 3)	Consumo (0 a 3)	Custo (0 a 3)	Integração (0 a 3)	TOTAL
Extensômetros	1	1	2	1	3	3	11

3.8.2 Sensores de Força Piezoresistivos

Após a realização dos experimentos e familiarização com a utilização desse tipo de transdutores, algumas conclusões puderam ser levantadas no que tange sua utilização:

1- Nos transdutores de força piezoresistivos experimentados, a força é aplicada diretamente sobre o diafragma cristalino. Por esse motivo, tais sensores possuem um parâmetro de especificação denominado “overforce” que indica a força máxima que pode ser exercida sobre o cristal antes da sua ruptura. Nos modelos testados o valor do parâmetro “overforce” é especificado em 4,5Kgf.

Esse fato se mostrou negativo ao projeto, pois a aplicação de mais de 4,5Kgf causa dano irreversível ao sensor. Analisando a aplicação, verifica-se que raramente esse valor será atingido em condições normais de trabalho, mas qualquer queda ou mesmo uma leve colisão do apalpador com a máquina irá danificá-lo severamente.

Inicialmente esse fator havia sido negligenciado, (na matriz de avaliação da tecnologia, havida sido dada nota 2 (Máxima 3) ao parâmetro robustez). Porém, com os experimentos, verificou-se que o limite “overforce” é um fator crítico para o projeto.

2- Apesar de pequenos (os menores existentes comercialmente na época em que essa tese foi elaborada), os sensores de força piezoresistivos selecionados não puderam ser alocados de forma satisfatória a se integrar com o arranjo mecânico de um apalpador sensível às 3 direções. Mostrou-se necessária a utilização de pelo menos 3 sensores, o que inviabiliza sua utilização pelos critérios custo e tamanho do produto final.

3- Como seria necessário utilizar 3 sensores, o consumo nominal do circuito seria de, no mínimo 5mA (utilizando um regulador de tensão SMD e consumo de

1mA por sensor). Utilizando uma bateria com capacidade de 100mAh, a autonomia do apalpador seria de apenas 20 horas.

4- Os experimentos de aquisição de dados por um tempo prolongado demonstraram que a saída dos sensores apresentaram variações abruptas da ordem de 5% do fundo de escala sem que nenhum fator externo fosse inserido ao sistema além da natural variação térmica da sala onde os testes foram realizados. Fica evidente que esse comportamento não é esperado do transdutor mais adequado ao projeto. Mesmo utilizando-se da correção do “drift” por software, esse fato é negativo e prejudica a utilização dos sensores de força piezoresistivos nos apalpadores.

Ponderando todos os dados obtidos, tem-se, TABELA 3-5, a matriz de avaliação para o uso dos sensores de força piezoresistivos:

TABELA 3-5 - Avaliação sobre o uso de semicondutores piezoresistivos de força no projeto

TECNOLOGIA \ CRITÉRIO	Método Inédito (0 a 2)	Simplicidade (0 a 2)	Robustez (0 a 3)	Consumo (0 a 3)	Custo (0 a 3)	Integração (0 a 3)	TOTAL
Semicondutores Piezoresistivos (Força)	2	1	2	2	1	2	10

De posse dessas considerações, decidiu-se que a tecnologia, apesar de promissora, ainda se encontra em fase incipiente de desenvolvimento sendo, no momento, pouco adequada ao propósito desse trabalho. No futuro, com uma maior miniaturização dos sensores, robustez e confiabilidade, certamente sua utilização deverá ser reconsiderada.

3.8.3 Sensores de Pressão Piezoresistivos

Até a data de impressão desta Tese, não foi possível identificar patente ou sistema comercialmente disponível que utilizasse sensores de pressão piezoresistivos em apalpadores comutadores.

Esses transdutores são bastante simples e relativamente fáceis de serem utilizados, sendo que muitos deles possuem módulos de amplificação acoplados. Além disso, são transdutores baratos devido a sua produção em larga escala

Por outro lado, sua utilização no projeto de um apalpador comutador de alto desempenho se mostrou impraticável devido à impossibilidade de integração do

transdutor com o sistema apalpador. A excitação direta do diafragma se mostrou inviável devido a sua fragilidade.

Os fatos observados proporcionaram o levantamento da matriz de avaliação dos sensores de pressão piezoresistivos para o uso em apalpadores, cujo resultado é apresentado a seguir, TABELA 3-6:

TABELA 3-6 - Avaliação sobre o uso de semicondutores piezoresistivos de pressão no projeto

TECNOLOGIA \ CRITÉRIO	Método Inédito (0 a 2)	Simplicidade (0 a 2)	Robustez (0 a 3)	Consumo (0 a 3)	Custo (0 a 3)	Integração (0 a 3)	TOTAL
Semicondutores Piezoresistivos (Pressão)	2	1	1	2	2	0	8

3.8.4 Sensores Toque Resistivos

Os dados de catálogo mostram que o sensor apresenta erros de linearidade, repetitividade, histerese e drift. Inicialmente esses erros não impedem sua utilização para acionamento do sinal de disparo, porém existiria a necessidade de tratamento de sinal por software, caso contrário a estabilidade do sistema fica completamente comprometida, visto que os erros apresentados pelo sensor podem gerar falsos acionamentos ou então esconder problemas e falhas reais decorrentes de colisões do apalpador.

O custo de aquisição desses sensores se compara ao custo de extensômetros simples. Não existem fabricantes ou representantes no Brasil, sendo necessária a importação direta da matriz nos Estados Unidos.

Apesar de serem maleáveis e possuírem aplicações bastante vastas, sendo facilmente implantados no local onde se deseja realizar a medição da força, a integração desse transdutor aos demais subsistemas do apalpador se mostrou pouco vantajosa. Por serem sensíveis apenas a forças pontuais e normais ao plano do disco sensor, não foi possível identificar uma forma de integrá-lo ao apalpador sem prejudicar demasiadamente a integração com o arranjo mecânico e o mecanismo de retorno da haste.

Ponderando todos os dados obtidos, tem-se, TABELA 3-7, a matriz de avaliação para o uso dos sensores de toque resistivos modernos:

TABELA 3-7 - Avaliação sobre o uso de sensores de toque resistivos no projeto

TECNOLOGIA \ CRITÉRIO	Método Inédito (0 a 2)	Simplicidade (0 a 2)	Robustez (0 a 3)	Consumo (0 a 3)	Custo (0 a 3)	Integração (0 a 3)	TOTAL
Sensores de Toque Resistivos	2	1	1	2	2	1	9

3.8.5 Compilação dos Dados

Com base nos critérios estipulados e nas análises preliminares, foi montada a seguinte matriz de avaliação:

TABELA 3-8 - Matriz geral de avaliação dos sensores

TECNOLOGIA \ CRITÉRIO	Método Inédito (0 a 2)	Simplicidade (0 a 2)	Robustez (0 a 3)	Consumo (0 a 3)	Custo (0 a 3)	Integração (0 a 3)	TOTAL
Extensômetros	1	1	2	1	3	3	11
Semicondutores Piezoresistivos (Força)	2	1	2	2	1	2	10
Semicondutores Piezoresistivos (Pressão)	2	1	1	2	2	0	8
Sensores de Toque Resistivos	2	1	1	2	2	1	9

Iniciando-se pelos extensômetros, esse transdutor obteve avaliação final 11, sendo o mais pontuado. Os parâmetros custo e, principalmente, a flexibilidade de instalação desses transdutores (podendo ser fixados em praticamente qualquer peça mecânica, facilitando a integração de subsistemas) foram definitivos para sua escolha. Outro fator levado em consideração é a recente disponibilidade comercial de extensômetros piezoresistivos, que, por apresentarem resistência elétrica cerca de 100 vezes maior, vem a somar pontos no critério “consumo”, sem prejudicar demasiadamente os demais critérios.

A matriz de avaliação indica que a tecnologia de sensores de força Piezoresistivos se mostra promissora. Mas ainda necessita de desenvolvimentos nos quesitos miniaturização e fragilidade mecânica.

Desta forma, conforme a Matriz de Avaliação optou-se pela experimentação com extensômetros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Decorrida a etapa de estudos e pré-escolha de sensores, partiu-se para a etapa de projeto, construção e avaliação dos sistemas baseados em extensômetros e comparação com o sistema de acionamento do sinal de disparo via contato elétrico.

Conforme determinado no capítulo anterior, os seguintes transdutores foram escolhidos para prosseguir os trabalhos:

Extensômetro Resistivo:

- Modelo: 1-LY11-1.5/120;
- Fabricante: HBM;
- Resistência Nominal: 120 Ω ;
- Dimensões externas (Largura x Altura): 4,7x6,5mm;
- Dimensões do "Grid" (Largura x Altura): 1,2x1,5mm;
- Tensão máxima de alimentação da ponte: 2,5 VDC;
- Fator de sensibilidade: 2.

Extensômetro Piezoresistivo:

Decidiu-se avaliar também o desempenho de extensômetros piezoresistivos, visto que teoricamente, o mesmo apresenta vantagens sobre os extensômetros resistivos, tal como maior resistência elétrica, que proporciona baixo consumo. Outro fator positivo se deve ao fato de que o "gage factor" de extensômetros piezoresistivos chega a ser 100 vezes o valor de extensômetros resistivos, proporcionando alto ganho de sensibilidade.

Foram adquiridos através de importação Extensômetros piezoresistivos cujas características são descritas abaixo:

- Modelo: SS-060-033-1000PB-SSGH;
- Fabricante: Micron Instruments, USA;
- Resistência Nominal: 1050 Ω ;



- Dimensões externas (Largura x Altura): 3x10,7mm;
- Tensão máxima de alimentação da ponte: 2,5 VDC;
- Fator de sensibilidade: 155.

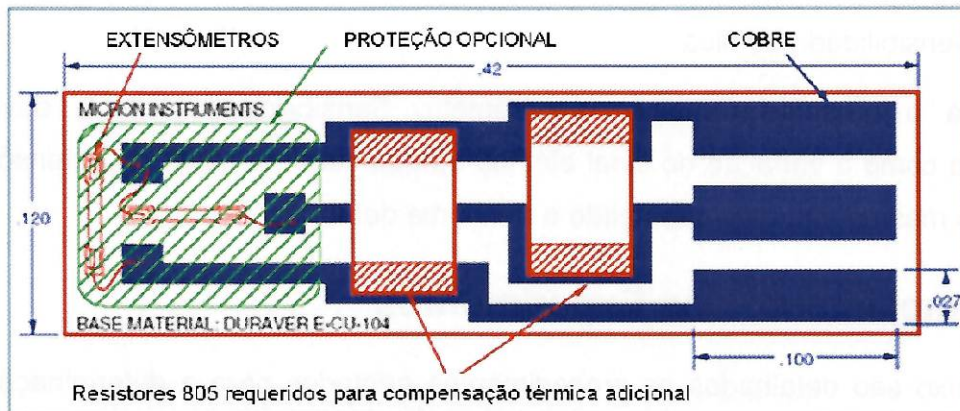


FIGURA 4.1 – Extensômetro piezoresistivo com compensação térmica

O transdutor é fornecido já montado, conforme FIGURA 4.1, com dois piezoresistores (longitudinal e transversal) termicamente casados montados em uma base de Duraver E-CU-104 e resistores para complemento da ponte.

4.1 Definição dos Parâmetros de Comparação

A seguir são definidos os parâmetros de comparação entre os extensômetros. Como parâmetro que possibilite a análise comparativa com o sistema de acionamento do sinal de disparo por contato elétrico, a Repetitividade foi escolhida.

1- Nível de Ruído

No desenvolvimento de um apalpador comutador de alto desempenho, espera-se que seu sistema de sensoriamento seja capaz de determinar um toque e diferenciá-lo de ruídos, naturais em qualquer sistema analógico de aquisição de dados.

Fisicamente, a aplicação de uma força advinda do toque do apalpador deve gerar no extensômetro uma deformação e conseqüentemente um sinal elétrico diferente daquele de ruído branco ou ruído de fundo. Quanto maior essa diferenciação, mais eficiente é o sistema de detecção de toque desenvolvido.

2- Repetitividade

A repetitividade aqui se refere à variação da saída do extensômetro quando solicitado várias vezes com a mesma deformação. Essa característica é de extrema importância, pois garante o bom funcionamento do equipamento sem a necessidade de “zeramento” e correções eletrônicas.

3- Sensibilidade térmica

Para o presente trabalho, o parâmetro Sensibilidade térmica, deve ser entendido como a variação do sinal elétrico apresentado na saída do extensômetro quando o mesmo não está submetido a nenhuma deformação.

4.2 Planejamento dos Experimentos

Abaixo são detalhados os procedimentos adotados para a determinação das características dos extensômetros e contato elétrico quanto à sua utilização como técnica de disparo do sinal de (“Trigger”) em apalpadores comutadores.

4.2.1 Extensômetros

A utilização de vigas em balanço ou (“cantilevers”) se mostrou bastante adequada para a experimentação com extensômetros. A utilização de três vigas em balanço a 120° no interior de um apalpador tendo o sistema de retorno da haste apoiado sobre as extremidades livres das vigas em balanço através de um acoplamento cinemático formaria um arranjo mecânico capaz de realizar perceber forças aplicadas na haste de toque em qualquer sentido e direção.

Através de ensaios utilizando um apalpador comutador modelo TP-10 da Renishaw e uma balança, levantou-se que a força média necessária para vencer a pré-carga aplicada pela mola sobre pelo menos um dos 3 apoios cinemáticos e ativar sinal de disparo é de 0,3Kgf.

Desta forma, decidiu-se pela colagem de extensômetros na região de maior deformação de vigas em balanço e aplicação de deslocamentos sobre a extremidade livre das vigas para gerar uma variação na resistência elétrica dos extensômetros.

Os transdutores eram então conectados a um circuito de amplificação para posterior leitura e armazenamento dos dados.

Utilizando-se o mesmo circuito de amplificação para os extensômetros resistivos e piezoresistivos, têm-se as seguintes variáveis possíveis de alteração no sistema eletro-mecânico:

- Tensão de Alimentação do Amplificador operacional;
- Tensão de Alimentação da Ponte de Wheatstone;
- Ganho do Amplificador Operacional;
- Comprimento do Cabo;
- Blindagem do Cabo;
- Deformação aplicada sobre o extensômetro;
- Temperatura do ambiente.

Para uma análise comparativa entre os dois transdutores, é necessário controlar o maior número de variáveis possível, variando somente aquela cujo efeito se quer observar.

Abaixo são detalhadas as abordagens utilizadas para tratamento de cada uma das variáveis.

Tensões de alimentação:

Tanto a tensão de alimentação do amplificador operacional quanto a tensão de alimentação da ponte de Wheatstone serão estabilizadas e referenciadas, de forma a garantir uma alimentação confiável ao sistema, independentemente de flutuações na rede elétrica.

Ganho do Amplificador Operacional:

Foi aplicado um método para determinação do ganho do amplificador operacional a ser utilizado em cada sistema.

Mantendo-se a tensão de alimentação constante e referenciada, utilizando-se o mesmo sistema de amplificação, cabos e blindagem, é possível variar o ganho dos amplificadores operacionais a fim de equalizar a amplitude do sinal dos dois sistemas mediante a aplicação da mesma deformação, FIGURA 4.2.

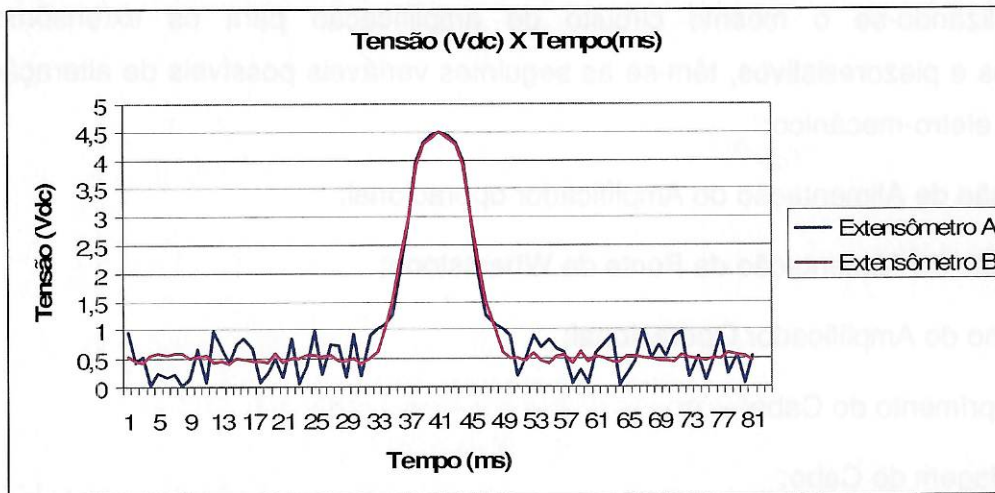


FIGURA 4.2 – Ilustração de ajuste do ganho para casamento da amplitude do sinal

Desta forma, tem-se a variável (amplitude de sinal) determinada e igualada nos dois sistemas. A partir daí, aplicando-se a mesma deformação nos dois extensômetros, é possível verificar as características de cada um deles, levantando a curva de resposta à deformação aplicada. É possível também comparar o nível de ruído presente em cada sistema.

O resultado da aplicação desse método é parte integrante do Capítulo-5.

Comprimento e blindagem do cabo:

Os cabos que conectam os extensômetros à interface de amplificação serão blindados para reduzir a sensibilidade do sistema a ruídos e será utilizado o mesmo comprimento para os dois cabos.

Deformação aplicada sobre o extensômetro:

Para um melhor entendimento do fenômeno, bem como a região ideal para colagem do extensômetro, foi realizada uma análise em software de elementos finitos, simulando a aplicação de uma força normal ao plano formado pela superfície superior da viga, aplicada sobre uma esfera rígida posicionada na extremidade livre, FIGURA 4.3.

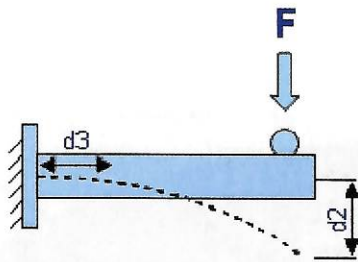


FIGURA 4.3 – Aplicação de força na extremidade livre de uma viga engastada

O software utilizado para a simulação foi o Abaqus® Versão:6.5.1 e o material utilizado para a viga foi o Aço Mola AISI-9255. A viga em balanço foi projetada utilizando as mesmas medidas daquela que se deseja ensaiar nos experimentos físicos reais. As dimensões da viga em (mm) são apresentadas a seguir, FIGURA 4.4

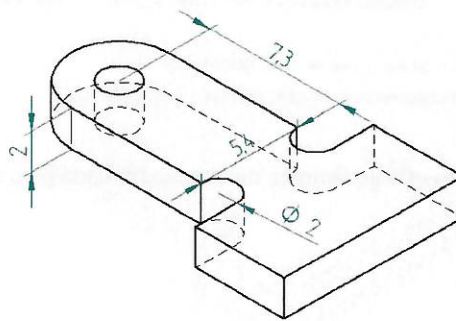


FIGURA 4.4 – Dimensões em (mm) da viga para simulação

O desenho foi então exportado para o software Abaqus®. A região anterior da viga foi engastada, de forma que a aplicação da força de 0,3Kgf na extremidade oposta gere uma deflexão da viga. Abaixo, FIGURA 4.5 e FIGURA 4.6, são apresentados os resultados da simulação.

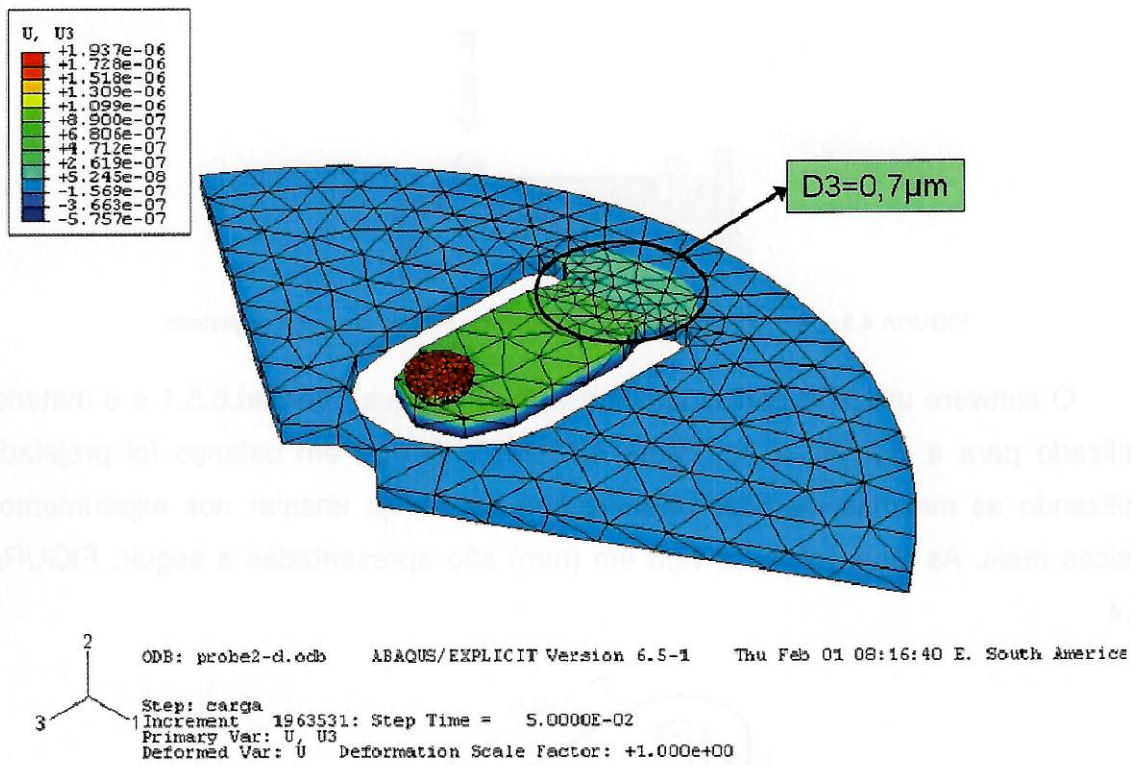


FIGURA 4.5 – Deslocamento na direção (3) dada pelo software

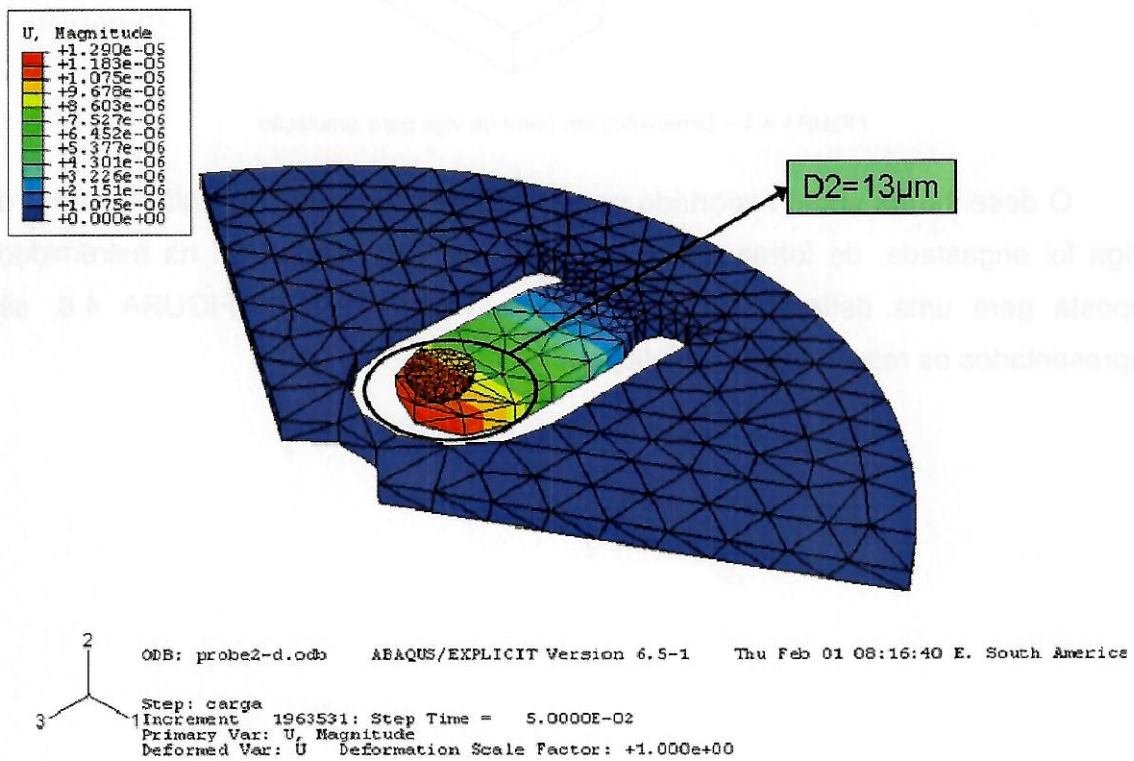


FIGURA 4.6 – Deslocamento na direção (2) dada pelo software (sentido negativo)

Verifica-se que a aplicação de 0,3Kgf à extremidade livre da viga teve como resultado uma deformação elástica de aproximadamente $0,7\mu\text{m}$ na direção (3), concentrada na região logo após o engaste da viga, FIGURA 4.5. Medições realizadas no software mostram que a região onde se concentra a deformação tem 2,2mm de comprimento na direção (3). Outro efeito observado quando da aplicação da força se dá pelo deslocamento de $13\mu\text{m}$ da extremidade livre da viga na direção (2) (sentido negativo), FIGURA 4.6. Ressalta-se que as direções (1, 2 e 3) são nomeadas pelo software, sendo as direções 1 e 3 no plano da folha e a direção 2 atravessando a mesma perpendicularmente.

Como resultado da simulação foi possível estabelecer o local mais adequado para instalação dos extensômetros bem como determinar a grandeza dos deslocamentos e deformações presentes no material quando da aplicação uma força de 0,3kgf.

Após a fixação dos extensômetros no local determinado pela simulação, a viga deverá ser fixada em um suporte, conforma a ilustração a seguir, FIGURA 4.7.

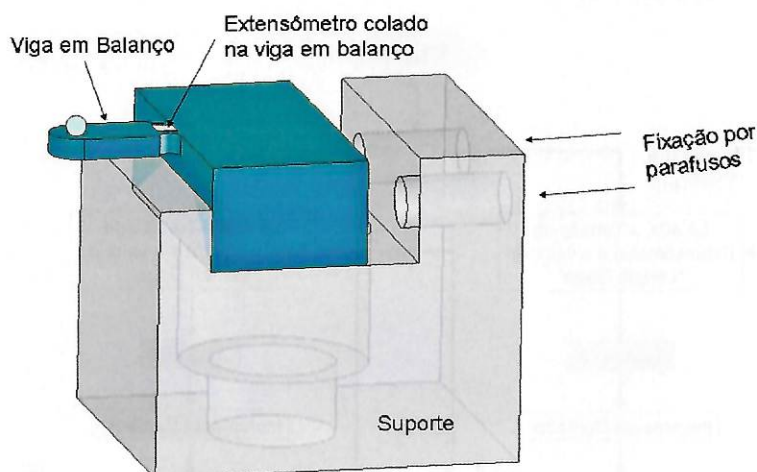


FIGURA 4.7 – Viga em balanço fixada à suporte

A fixação da viga ao suporte é feita por meio de dois parafusos inclinados que empurram a peça contra o batente localizado na região oposta.

O suporte deve então ser fixado à base de um Centro de Usinagem com capacidade de deslocamento sub-micrométrico no eixo Z. Um pino guia acabando em uma superfície plana retificada e polida será fixado em cone HSK E32 no eixo árvore. O pino será posicionado sobre a extremidade livre da viga em balanço e será

aplicado deslocamento em “Z” a fim de defletir a extremidade livre da viga e gerar deformação nos extensômetros.

Para o monitoramento da temperatura, um sensor térmico deve ser inserido próximo ao sistema, de forma a monitorar a temperatura no decorrer de toda a experimentação.

4.2.1.1 Ensaio de Ajuste do Ganho e Equalização de Amplitudes

Com base nos dados obtidos da simulação em elementos finitos, optou-se pela aplicação de um deslocamento de $4\mu\text{m}$ em “Z” com incrementos de $0,2\mu\text{m}$. Esse valor se mostrou mais adequado dado o alto fator de sensibilidade dos extensômetros piezoresistivos, rapidamente saturando o sinal de saída da interface amplificadora. Após cada deslocamento foram capturadas 40 amostras do canal analógico referente ao sinal do extensômetro e 40 amostras da posição do eixo “Z” provenientes da comunicação serial com a interface ND 280. O fluxograma da interação é apresentado a seguir, FIGURA 4.8.

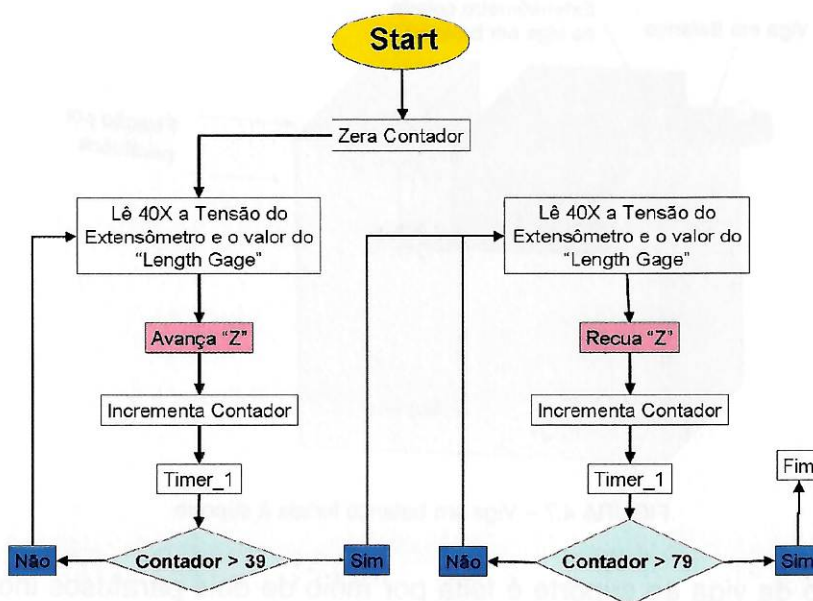


FIGURA 4.8 – Fluxograma do procedimento de deslocamento incremental do eixo árvore e medição da tensão do extensômetro e valor do MT 1201

Desta forma partiu-se para os ensaios de ajuste do ganho para os extensômetros.

- **Extensômetro Resistivo**

Foram selecionados três ganhos distintos para a realização do ensaio: $G_{1r}=10.000$, $G_{2r}=7.900$ e $G_{3r}=1.715$. A máxima amplificação permitida para o amplificador operacional selecionado é de 10.000 vezes, FIGURA 4.18, página 121. Desta forma, este ganho foi selecionado com a finalidade de se verificar a máxima amplificação possível para extensômetros resistivos cujo Fator de Sensibilidade é igual a 2.

O ganho G_{2r} foi selecionado de forma a se obter uma amplificação próxima a 80% do valor máximo permitido para o amplificador operacional. Esse valor foi denominado “valor máximo seguro” pelo fato de minimizar erros de linearidade e instabilidade presentes quando o valor de ganho utilizado se aproxima do máximo permitido. Os erros de linearidade e instabilidade decorrem do fato dos valores da resistência R_G se tornarem muito pequenos para amplificações da ordem de 10.000 vezes, fazendo com que a própria resistência elétrica dos fios finos, trilhas e soldas influenciem substancialmente no resultado da medição.

O ganho G_{3r} foi selecionado com a finalidade de se obter informações a respeito do comportamento desses extensômetros quando se utiliza amplificação próxima de 20% do valor máximo seguro.

- **Extensômetro Piezoresistivo**

Com base nos ganhos estipulados para os extensômetros resistivos, foram realizados os cálculos para se obter a amplificação teórica necessária para o extensômetro piezoresistivo a fim de se obter a mesma relação tensão X deformação dos extensômetros resistivos com $G=7.900$.

Como o “Gage Factor” dos extensômetros convencionais é 77,5 vezes menor que o “Gage Factor” dos extensômetros piezoresistivos selecionados, estes apresentam relação tensão X deformação 77,5 vezes maior. Desta forma, o ganho teórico é calculado dividindo-se G_{2r} pelo valor do Fator de Sensibilidade do extensômetro piezoresistivo, GF_p , Equação 4.1.

$$G1_p = \frac{G2_r}{\frac{1}{2} \times GF_p} = \frac{7.900}{77,5} = 102$$

Equação 4.1

Calculado $G1_p$ teórico, foram selecionados outros 2 ganhos distintos para verificar o desempenho dos extensômetros piezoresistivos com ampliações cinco e dez vezes maiores que $G1_p$. Utilizando-se resistores comerciais, foi possível ajustar os 3 ganhos de forma que $G1_p = 110$, $G2_p = 508$ e $G3_p = 873$.

4.2.1.2 Levantamento das Curvas de Calibração e Cálculo da Repetitividade

Com base na configuração proposta, foi realizado o seguinte experimento:

Fixando-se o sistema à mesa do Centro de Usinagem, o eixo árvore foi posicionado sobre a esfera fixada na extremidade livre da viga em balaço e foram aplicados deslocamentos incrementais de $0,2\mu\text{m}$ no eixo (Z), na direção (-) até a detecção da menor deformação do extensômetro, indicando que a superfície plana do pino guia fixado no cone do eixo árvore tocou o ponto mais alto da esfera. Neste momento a coordenada do eixo (Z) é zerada.

Em seguida, serão aplicados deslocamentos incrementais de $0,2\mu\text{m}$ no eixo (Z), na direção (-). Completando o deslocamento de $16\mu\text{m}$, será realizado o percurso de volta. O valor de deslocamento de $16\mu\text{m}$ foi determinado como sendo o inteiro mais próximo daquele observado na simulação, FIGURA 4.6, acrescido de 25%.

Para medir o deslocamento em (Z) a cada incremento do eixo árvore, um sistema de medição de comprimento ("Length Gage") da empresa Heidenhain®, modelo METRO CT 6000 com exatidão de $0,01\mu\text{m}$ (após inserção da curva de calibração fornecida pelo fabricante no Indicador Digital ND 280) foi posicionado na base do Centro de Usinagem de forma que a ponta de medição meça o deslocamento do eixo árvore.

Desta forma, a cada incremento, o valor de tensão da saída do Amplificador Operacional foi coletado, bem como o valor de deslocamento indicado no indicador digital do ("Length Gage").

O procedimento foi repetido 80 vezes, totalizando um deslocamento teórico de 16 μ m na extremidade livre da viga, deslocamento este, compatível com a deformação gerada pela pré-carga aplicada sobre cada um dos três cilindros dos apalpadores comutadores do tipo Kinematic Contact somada à deformação gerada por um toque.

Em seguida o procedimento foi aplicado na direção inversa, aliviando a deformação sobre o extensômetro.

O fluxograma da interação é apresentado na FIGURA 4.9.

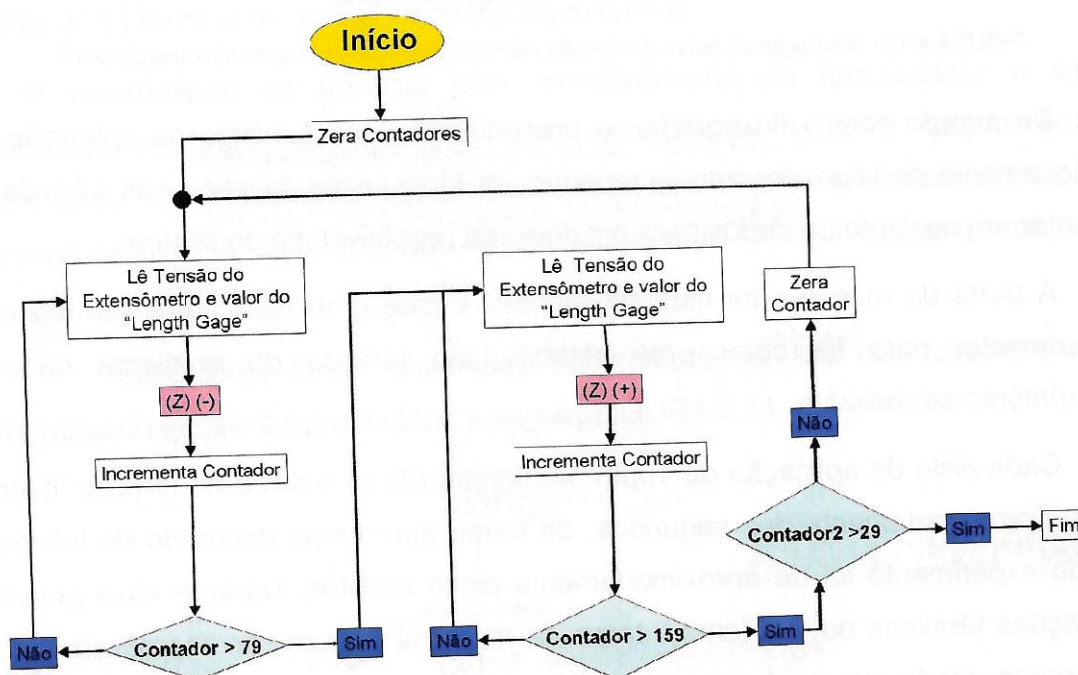


FIGURA 4.9 – Fluxograma do procedimento de deslocamento incremental do eixo para levantamento de curva sinal X deslocamento.

O resultado da interação é o levantamento da curva Tensão (VDC) X Deslocamento (μ m) aplicado na extremidade livre da viga a uma dada temperatura, conforme ilustra a FIGURA 4.10.

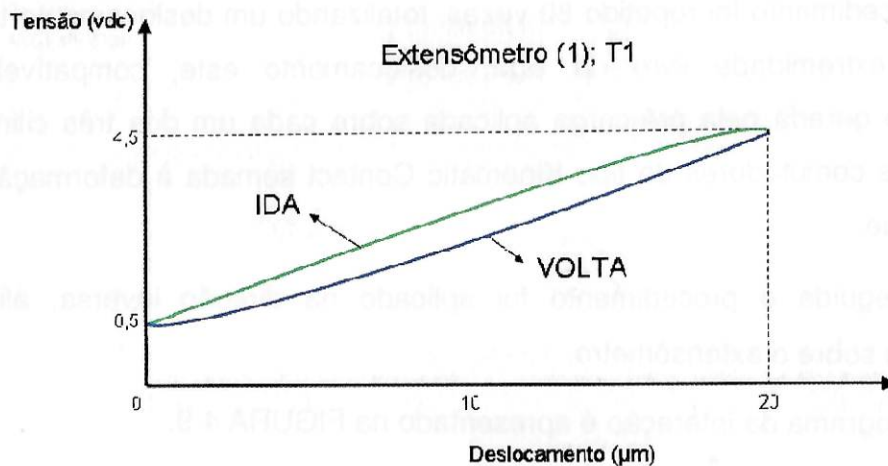


FIGURA 4.10 – Ilustração da curva de Tensão (VDC) X Deslocamento (μm) à temperatura T1

De acordo com o fluxograma, o procedimento que consiste na aplicação do deslocamento de $16\mu\text{m}$ descrito foi repetido por trinta vezes consecutivas a fim de se levantar um conjunto de dados para o cálculo da repetitividade do sistema.

A porta da máquina foi mantida fechada desde uma hora antes do início do experimento, para se obter uma estabilização térmica do ambiente onde o experimento se realizará.

Cada ciclo de aplicação de $16\mu\text{m}$ na direção (Z) (-) e alívio na direção inversa levou aproximadamente dez segundos, de forma que tempo decorrido do início ao fim do experimento foi de aproximadamente cinco minutos. Durante esse período, alterações térmicas do ambiente interno da máquina podem ser desprezadas com segurança desde que nenhuma causa especial de variação térmica haja durante o experimento.

4.2.1.3 Levantamento da Resposta dos Transdutores a Variações

Térmicas

O seguinte método foi aplicado para determinação da curva de resposta dos transdutores com relação à variação térmica do ambiente, (Sinal(VDC) X Temperatura($^{\circ}\text{C}$)).

Um sensor de temperatura foi instalado próximo aos extensômetros dentro da máquina, de forma a monitorar a temperatura do ambiente do transdutor. Para evitar

variações bruscas de temperatura, a porta da máquina foi mantida fechada por todo o período de experimentação.

Para o experimento em questão, o Centro de Usinagem foi utilizado apenas como ambiente para a execução do experimento, visto que é o local onde os apalpadores são instalados.

O eixo árvore do centro de usinagem foi afastado do sistema, ou seja, os extensômetros trabalharam sem nenhuma deformação durante todo o experimento, de forma que a principal fonte de alteração no sinal proveniente desses transdutores foi a variação térmica do ambiente dentro da máquina.

O experimento se traduziu pelo monitoramento da temperatura e sinal proveniente de cada extensômetro pelo período de vinte e quatro horas consecutivas. Os dados foram capturados a cada dez minutos e armazenados para posterior análise. A cada medição foram capturados o valor da temperatura e quarenta amostras do valor do sinal do extensômetros.

Os Transdutores foram ensaiados separadamente, em dias diferentes. O fluxograma do ensaio é apresentado a seguir, FIGURA 4.11.

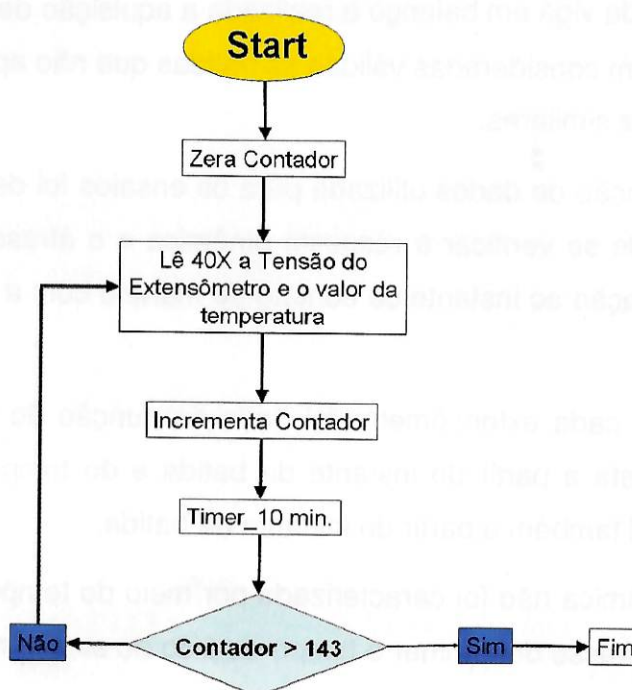


FIGURA 4.11 - Fluxograma do procedimento adotado para monitoramento da variação sinal do extensômetro em função da temperatura dentro da máquina.

4.2.1.4 Levantamento da Resposta Dinâmica dos Transdutores a Aplicação de um Deslocamento em Degrau

O seguinte método foi realizado para determinação da resposta dos transdutores com relação à aplicação de um deslocamento em degrau à extremidade livre da viga em balanço, de forma a se obter uma curva Sinal(VDC) X Tempo(ms).

Um fio elétrico foi conectado a um pequeno martelo metálico normalmente utilizado em análise dinâmica de estruturas. A outra extremidade do fio foi conectada aos 5VDC da fonte de alimentação por meio de uma resistência elétrica de $1K\Omega$ e a uma entrada analógica do módulo de aquisição de dados, de forma que toda vez que o martelo (metálico) entrasse em contato com a esfera fixada na extremidade livre da viga em balanço (também metálica) conectada ao terra, haveria uma passagem de corrente elétrica pela resistência, fazendo com que o sinal adquirido caísse de 5VDC para 0VDC.

Foram então aplicadas 30 pequenas batidas com o martelo sobre a esfera fixa na extremidade livre da viga em balanço e realizada a aquisição de dados do evento. Nesse processo, foram consideradas válidas as batidas que não apresentem rebotes e tivessem amplitudes similares.

A taxa de aquisição de dados utilizada para os ensaios foi de 10.000 amostras por segundo, a fim de se verificar a resposta dinâmica e o atraso da resposta dos transdutores com relação ao instante de contato do martelo com a esfera da viga em balanço.

A avaliação de cada extensômetro foi dada em função do tempo necessário para início da resposta a partir do instante da batida e do tempo necessário para atingir o pico do sinal também a partir do instante da batida.

A resposta dinâmica não foi caracterizada por meio do tempo de resposta (T_s) padrão pois é de interesse determinar o tempo do pico do sinal e não 63,2% do sinal total como determina esse padrão de análise.

4.2.2 Contato Elétrico

Diferentemente dos sistemas desenvolvidos para experimentação dos extensômetros, a técnica de geração do sinal de disparo por contato elétrico se vale apenas da passagem ou interrupção de passagem de corrente elétrica quando ocorre o fechamento ou abertura de uma chave elétrica.

Desta forma, foi desenvolvido um dispositivo eletromecânico com a finalidade de gerar o sinal de disparo quando houvesse o contato entre uma esfera metálica, fixa em uma base de referência, e um plano retificado e polido, caracterizando um contato pontual. O plano era então deslocado sobre a esfera repetidamente e a posição do plano no momento do contato elétrico era capturada.

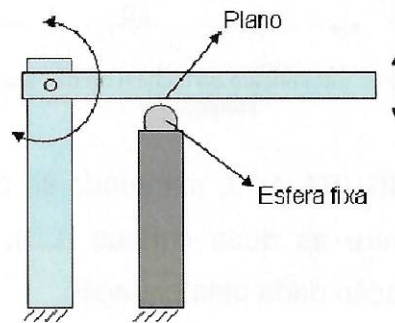


FIGURA 4.12 – Ilustração do mecanismo de contato entre plano e esfera.

A configuração de contato pontual entre plano e esfera proposta simula o contato que ocorre nos acoplamentos cinemáticos existentes nos apalpadores comutadores do tipo Kinematic Contact e tem por finalidade inferir a respeito da repetitividade na geração do sinal de disparo de sistemas baseados em contato elétrico.

Como nos extensômetros, o experimento se baseou na utilização de um Centro de Usinagem com capacidade de deslocamento sub-micrométrico no eixo vertical (Z), onde um pino guia acabando em uma face plana retificada foi fixado em cone HSK E32 no eixo árvore. Foram então aplicados deslocamentos em (Z) a fim fechar o contato elétrico entre o plano e a esfera de referência.

O dispositivo eletromecânico, além de chave elétrica, fez o papel de divisor de deslocamento. Conforme ilustra a FIGURA 4.13, fixando-se as duas peças na base do centro de usinagem, aproximando-se o eixo árvore sobre a esfera da direita e aplicando-se um deslocamento em (Z) na direção negativa na esfera, a viga se

deflete, sendo que o deslocamento vertical verificado na extremidade livre da viga é maior que aquele verificado sobre a esfera da esquerda.

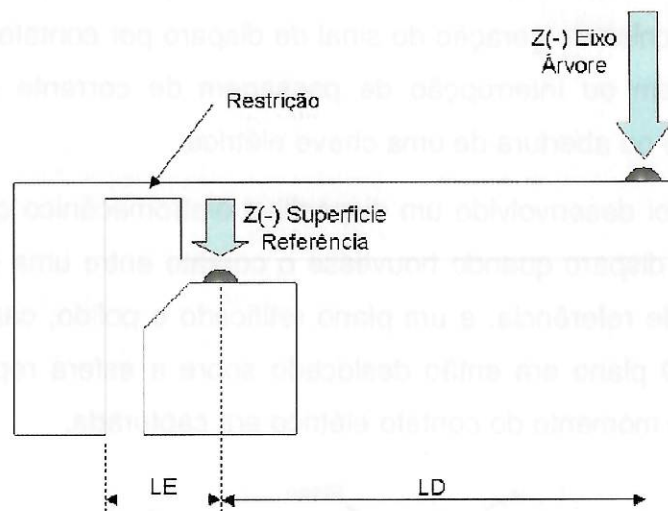


FIGURA 4.13 – Ilustração do mecanismo para ensaio da técnica de disparo do sinal de (“Trigger”) por contato elétrico.

Ainda com relação à FIGURA 4.13, mantendo-se a distância (LE) constante, quanto maior a distância entre as duas esferas (LD), maior será a divisão de deslocamento, segundo a relação dada pela equação:

$$R = \frac{LE + LD}{LE}$$

Equação 4.1

Onde:

LD= distância entre o ponto de contato com a esfera de referência na superfície de referência e o centro da esfera da direita.

LE= distância entre o ponto de contato com a esfera de referência na superfície de referência e o ponto de restrição da viga;

O mecanismo proposto foi fixado por meio de parafusos a um suporte de material isolante e todo o conjunto foi fixado à mesa do Centro de Usinagem. Sob a viga, foi fixada uma estrutura que serviu de suporte e fixação para a esfera de referência da esquerda. Quando houvesse deflexão da barra, a esfera entraria em contato com a face inferior da barra, fechando o contato da chave elétrica. A seguir, FIGURA 4.14, tem-se uma ilustração do mecanismo montado.

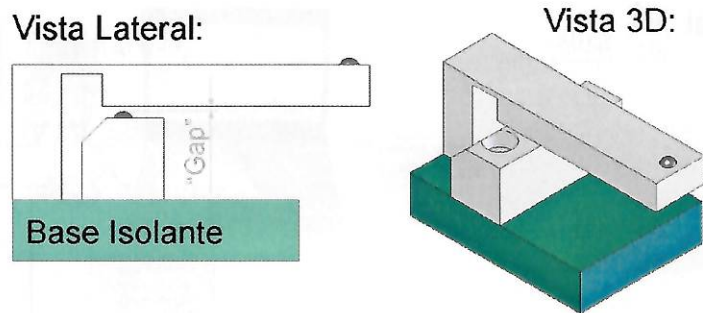


FIGURA 4.14 – Ilustração do sistema de teste de repetitividade do contato elétrico

Devido ao material isolante da base, o contato elétrico entre as duas peças (viga central e peça de referência) só é possível através do contato mecânico entre a esfera da esquerda no suporte e a superfície inferior retificada e polida da peça da viga.

O sinal elétrico foi monitorado por meio de uma entrada analógica (“single supply”: GND e +5VDC) do módulo de aquisição de dados. O pólo positivo proveniente da fonte de alimentação interna do módulo foi conectado diretamente ao pólo correspondente da entrada analógica, enquanto o pólo (GND) da fonte foi conectado à viga central do sistema de medição e uma outra conexão foi feita entre a peça referência e o pólo GND do módulo de aquisição.

Desta forma, não havendo contato entre a face inferior da viga e a esfera da esquerda na peça referência, a Diferença de Potencial (DDP) presente na entrada analógica é nula, pois o circuito está aberto. Quando houver o contato, a entrada analógica do módulo de aquisição de dados é provida de dois pólos com tensões distintas. Com o auxílio do software de aquisição de dados, é possível, por exemplo, armazenar os dados ou criar o gráfico da DDP x Tempo na tela do computador. A seguir, FIGURA 4.15, é apresentado o esquema proposto para a aquisição do sinal elétrico do contato.

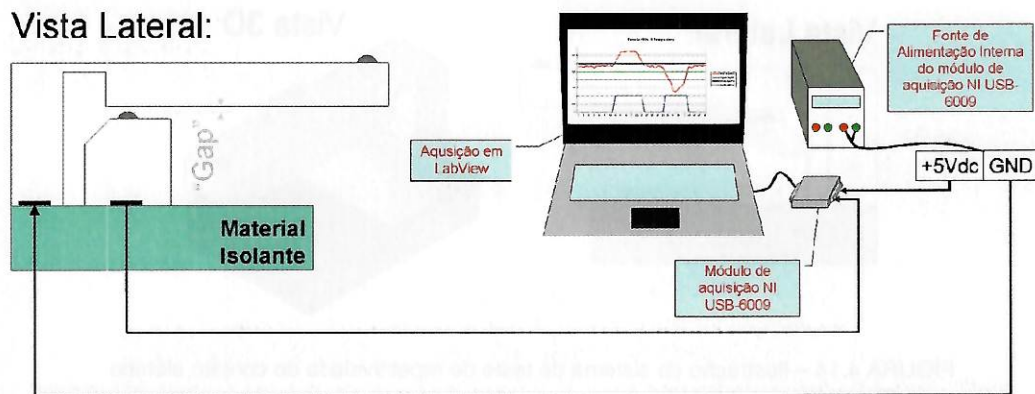


FIGURA 4.15 – Sistema de aquisição de dados do experimento de repetitividade de contato elétrico.

De posse dos materiais, métodos e dispositivos, o seguinte experimento foi realizado:

O pino fixado ao cone e este, por sua vez, fixado ao eixo árvore, foi posicionado sobre a esfera da direita e foram aplicados deslocamentos incrementais de $0,2\mu\text{m}$ em “Z” (-), fazendo com que a face inferior da viga sobre a esfera da esquerda também se desloque em “Z” (-) aproximando-se da esfera da esquerda, sendo esta relação entre os deslocamentos dada pela Equação 4.1.

Para medir o deslocamento em “Z” a cada incremento do eixo árvore, um sistema de medição de comprimento (“Length Gage”) da empresa Heidenhain®, modelo METRO CT 6000 com exatidão de $0,01\mu\text{m}$ (após inserção da curva de calibração fornecida pelo fabricante no Indicador Digital ND 280) foi posicionado na base do Centro de Usinagem de forma que a ponta de medição meça o deslocamento do eixo árvore.

O procedimento foi repetido até se verificar, pelo software de aquisição, que houve o contato permanente entre a esfera e a superfície de referência. Defini-se como contato estabelecido, o momento em que não existam mais ruídos de fechamento de contato elétrico, FIGURA 4.16.

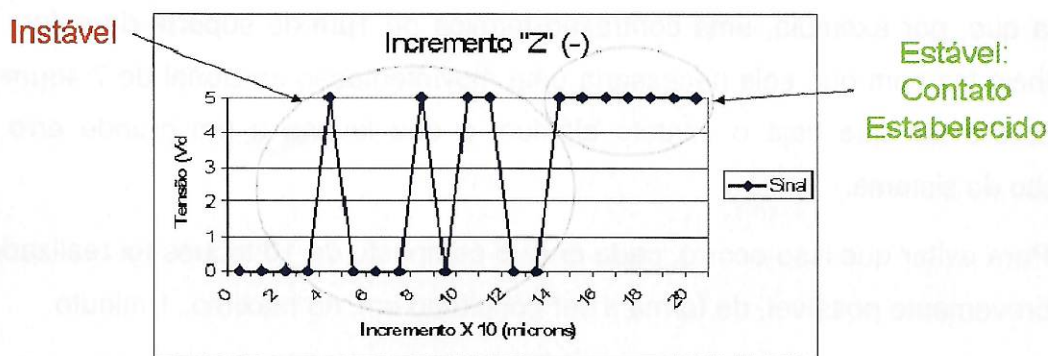


FIGURA 4.16 – Estabelecimento do contato elétrico

O eixo árvore era afastado mais $2\mu\text{m}$ (Z+) e o procedimento repetido por 10 vezes, sempre anotando o valor do indicador digital do “Length Gage” quando houvesse o contato. Ao final do experimento, obtinha-se um conjunto de dados com 10 valores referentes à coordenada “Z” do instante em que houve o contato elétrico. A FIGURA 4.17 abaixo, ilustra o resultado esperado para um conjunto de 10 interações.

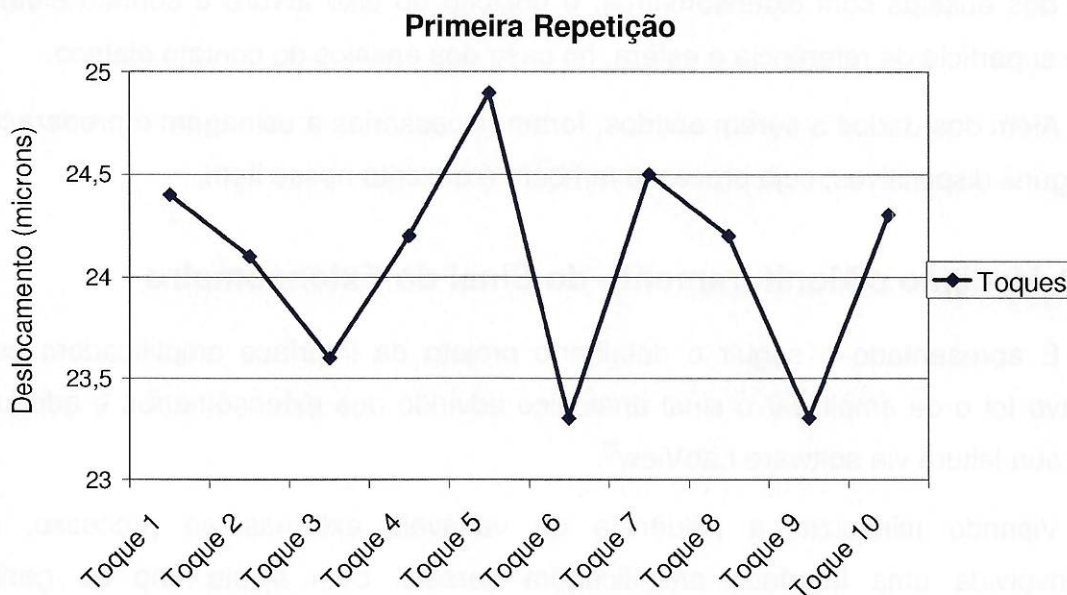


FIGURA 4.17 –Variabilidade da posição da perda do Contato Elétrico medida pelo (“Length Gage”).

Para a obtenção da variabilidade real do deslocamento observado sobre a esfera da direita, os valores de variabilidade obtidos através do (“Length Gage”) devem ser divididos pelo parâmetro “R” obtido pela Equação 4.1.

Devido à instalação da barra divisora de deslocamento, o sistema como um todo se tornou bastante sensível a variações térmicas. A relação entre LD e LE nos

mostra que, por exemplo, uma contração térmica de $1\mu\text{m}$ do suporte da esfera de referência faz com que seja necessária uma movimentação adicional de $7,48\mu\text{m}$ do eixo árvore até que haja o contato elétrico, o que levaria a um grande erro de medição do sistema.

Para evitar que isso ocorra, cada ensaio composto de 10 toques foi realizado o mais brevemente possível, de forma a ser concluído em, no máximo, 1 minuto.

Com base no conjunto de dados, é possível o cálculo da repetitividade do sistema de acionamento do sinal de disparo por contato elétrico, possibilitando a comparação com os resultados obtidos para os extensômetros.

4.3 Bancos de Ensaio

A instrumentação do Centro de Usinagem teve por objetivo realizar a aquisição das principais variáveis que se desejam medir: Posição/Deslocamento do eixo árvore, tensão (VDC) referente à deformação dos extensômetros e temperatura, no caso dos ensaios com extensômetros, e posição do eixo árvore e contato elétrico entre superfície de referência e esfera, no caso dos ensaios do contato elétrico.

Além dos dados a serem obtidos, foram necessárias a usinagem e preparação de alguns dispositivos, cujo processo também é descrito nesse item.

4.3.1 Medição e Monitoramento do Sinal do Extensômetro

É apresentado a seguir o detalhado projeto da interface amplificadora cujo objetivo foi o de amplificar o sinal analógico advindo dos extensômetros e adequá-los à sua leitura via software LabView[®].

Visando minimizar a influência de variáveis externas ao processo, foi desenvolvida uma interface amplificadora versátil, com ajuste fino do ganho realizado por resistores e conector para fácil troca dos extensômetros.

No projeto do circuito foi utilizado amplificador de instrumentação, modelo INA-125 da Burr-Brown, FIGURA 4.18. Trata-se de um amplificador de baixo consumo, que fornece tensões referenciadas de alta precisão (2,5, 5 e 10 VDC) para a alimentação da ponte de Wheatstone. O ganho, variável de 4 a 10.000, pode ser ajustado através de um único resistor.

Desta forma, a tensão de alimentação estabilizada para a ponte de Wheatstone foi fornecida pelo próprio amplificador operacional, o qual foi alimentado pelo módulo de aquisição de dados.

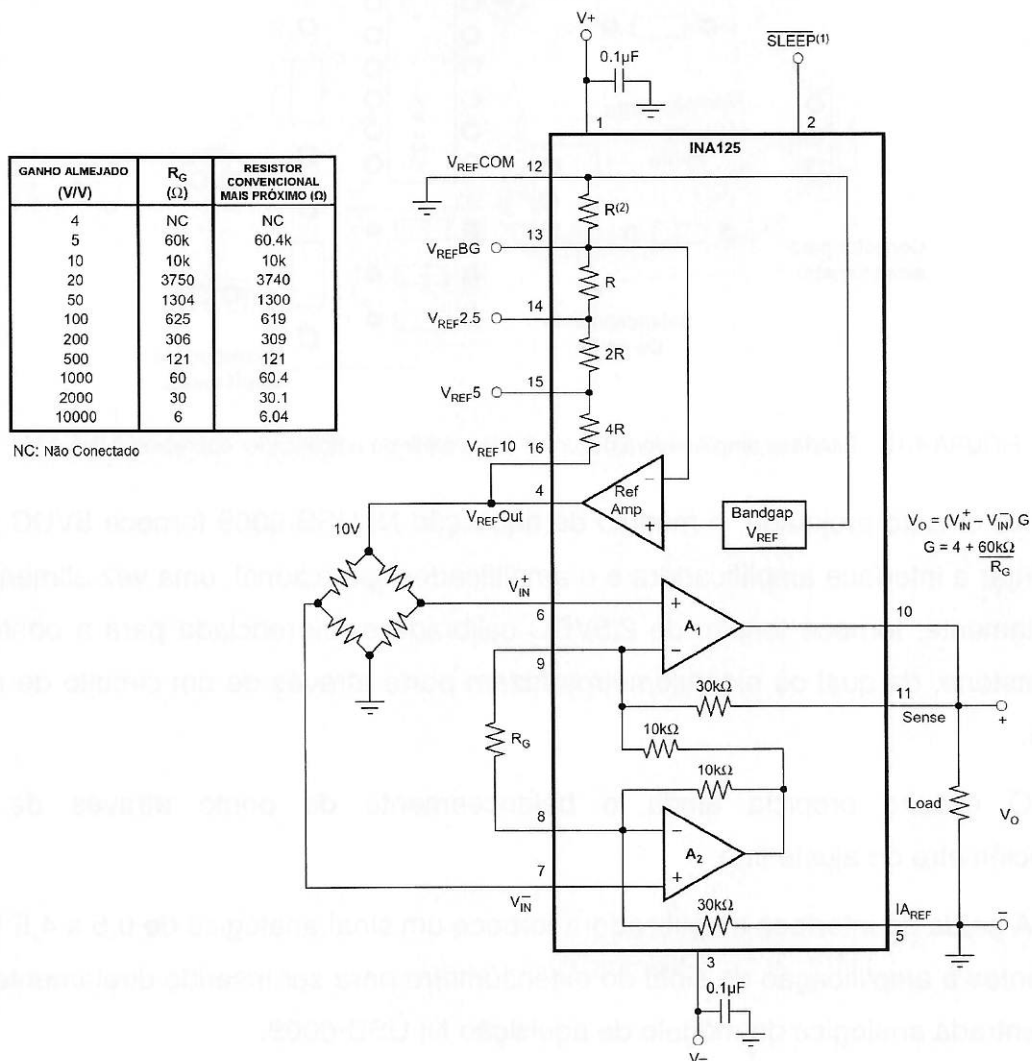


FIGURA 4.18 – Conexão básica do INA-125 para amplificação de sinal proveniente de Ponte de Wheatstone.

A FIGURA 4.19 mostra o esquema da interface amplificadora desenvolvida.

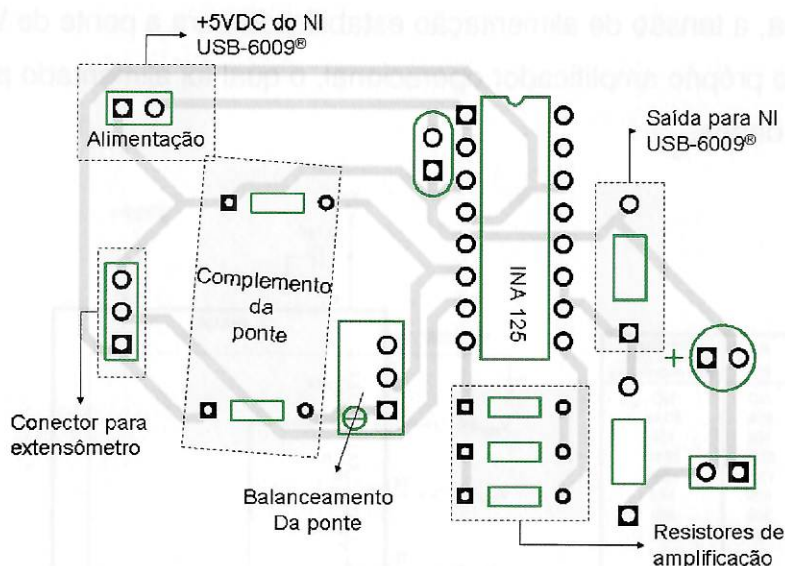


FIGURA 4.19 – Interface amplificadora desenvolvida a partir do amplificador operacional INA 125

No circuito projetado, o módulo de aquisição NI USB-6009 fornece 5VDC para alimentar a interface amplificadora e o amplificador operacional, uma vez alimentado corretamente, fornece tensão de 2,5VDC calibrada e referenciada para a ponte de Wheatstone, da qual os extensômetros fazem parte através de um circuito de meia ponte.

O circuito propicia ainda o balanceamento da ponte através de um potenciômetro de ajuste fino.

A saída da interface amplificadora fornece um sinal analógico de 0,5 a 4,5 VDC referentes à amplificação do sinal do extensômetro para ser inserido diretamente em uma entrada analógica do módulo de aquisição NI USB-6009.

4.3.2 Medição e Monitoramento de Temperatura

Para a medição da temperatura durante os experimentos com extensômetros, foi utilizado um sensor de temperatura modelo LM35DH da National Semiconductor com encapsulamento metálico TO-46. O sensor apresenta saída a tensão proporcional à temperatura em Graus Celsius e linear na faixa de +2°C à +150°C quando alimentado com uma tensão (“Single Supply”) entre +4 e +30VDC, FIGURA 4.20.

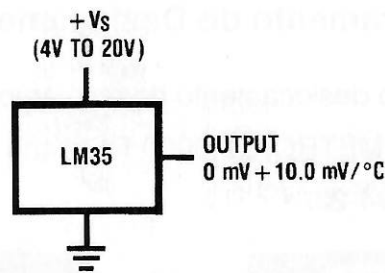


FIGURA 4.20 – Conexão básica do sensor de temperatura

Foi utilizado um amplificador operacional de ganho unitário na saída do sensor para isolar a impedância do circuito de entrada. Optou-se pela utilização de ganho unitário para evitar distorções de amplificação. Como o sensor fornece uma variação de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, a resolução dos conversores A/D do módulo de aquisição é suficiente para resolver até $0,05^{\circ}\text{C}$ sem a necessidade de amplificação. Desta forma, o sinal proveniente o Amplificador Operacional de ganho unitário foi diretamente conectado a uma entrada analógica do módulo de aquisição de dados.

Como proteção e vedação dos cabos elétricos e sensor, visto que a imersão em água se fez necessária para o banho, o sensor foi envolto em um tubo de silicone, de forma que apenas a ponta do sensor fosse exposta ao banho, FIGURA 4.21.



FIGURA 4.21 – Vedação do sensor de temperatura para imersão em água.

Decidiu-se pela realização da calibração do sensor através de banho termostático para garantir boa exatidão das medidas, cujo procedimento e resultado é apresentado como Anexo.

A curva de calibração do sensor foi então inserida no software Labview[®], obtendo-se diretamente na tela o gráfico da temperatura calibrada do sensor ao longo do tempo.

4.3.3 Medição e Monitoramento do Deslocamento do Eixo Árvore

Para o controle exato do deslocamento do eixo árvore na direção “Z”, o sistema de medição de comprimento METRO CT 6000 foi fixado ao eixo árvore por meio de um suporte usinado, FIGURA 4.22.

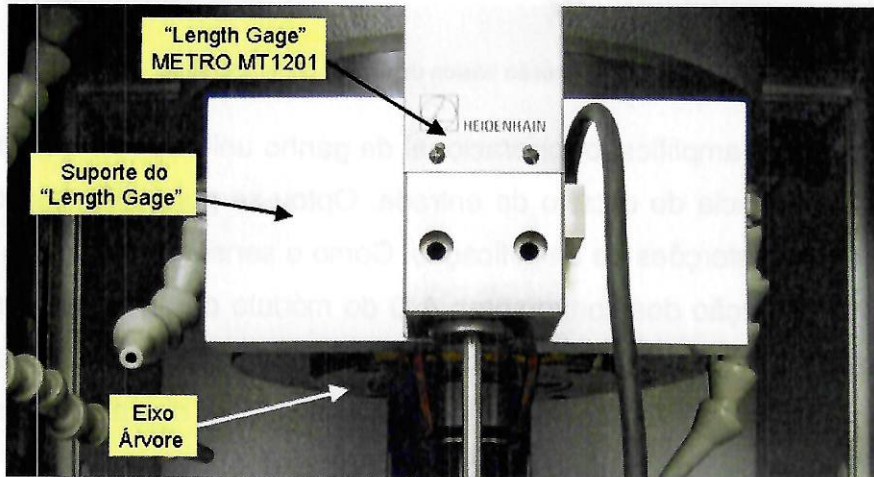


FIGURA 4.22 – Fixação do sistema de medição ao eixo árvore

Desta forma, deslocamentos do eixo árvore podiam ser lidos diretamente no display digital de posição, modelo ND 280 da Heidenhain, FIGURA 4.23.

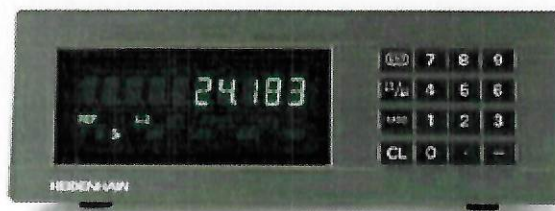


FIGURA 4.23 - Display digital de posição modelo ND 280

Para possibilitar a visualização e o armazenamento dos dados de posição no computador, foi realizada comunicação serial entre o display ND 280 e o PC.

4.3.4 Sistema de Aquisição de Dados

Para monitoramento dos três sinais (Sinal analógico amplificado do extensômetro, sinal analógico de temperatura e posição “Z”), visualização na tela e gravação dos dados em arquivos Excel[®] foi desenvolvida um painel de instrumentação virtual em LabView[®], FIGURA 4.24.

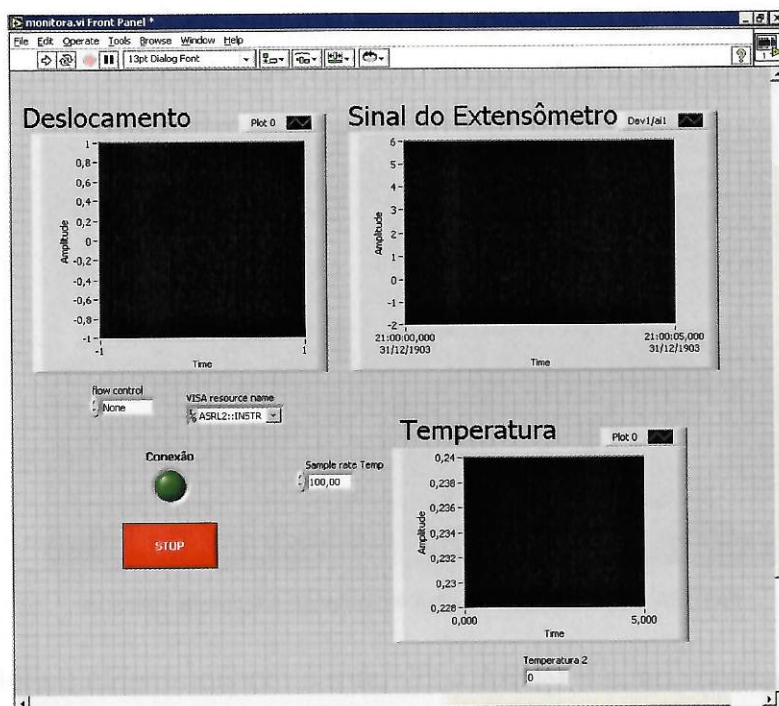


FIGURA 4.24 – Tela frontal do painel de instrumentação virtual desenvolvido em LabView®.

Tanto o sinal do extensômetro quanto a temperatura foram adquiridas por meio da utilização de duas entradas analógicas do módulo de aquisição de dados modelo NI USB-6009 da National Instruments.

A aquisição da posição do (“Length Gage”) modelo METRO MT 1201 foi realizada via comunicação serial entre o indicador digital ND 280 e o LabView®.

Para realizar o sincronismo de ações entre o sistema de aquisição de dados e o programa CNC responsável por realizar os incrementos e decrementos de posição em “Z”, foi realizada uma passagem de parâmetros do LabView® para o CNC, através da escrita em variáveis do tipo “Custom Macro”. Essa passagem de parâmetros foi realizada através da Rede Kyatera, que disponibiliza a comunicação entre o Centro de Usinagem Mori Seiki e o computador. Desta forma, a execução de movimentos do eixo “Z” pôde ser comandada pelo LabView®.

4.3.5 Preparação dos Ensaios com Extensômetro Resistivo e Piezoresistivo no Centro de Usinagem Mori Seiki

Após a fixação dos extensômetros no local determinado pela simulação, a viga em balanço foi fixada ao suporte previamente usinado. O cone foi então acoplado ao

eixo árvore e o suporte de extensômetros por sua vez, foi fixado à mesa do Centro de Usinagem por meio de uma Morsa de precisão, FIGURA 4.25.

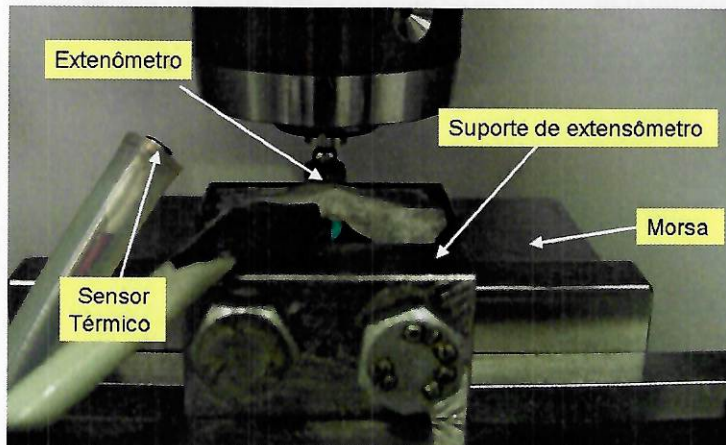


FIGURA 4.25 – Fixação da viga em balanço à base da máquina

Ainda de acordo com a FIGURA 4.25, para o monitoramento da temperatura, o sensor térmico foi posicionado próximo ao extensômetro, de forma a monitorar a temperatura do ambiente no decorrer de toda a experimentação.

A FIGURA 4.26 mostra a montagem do sistema eletromecânico completo.

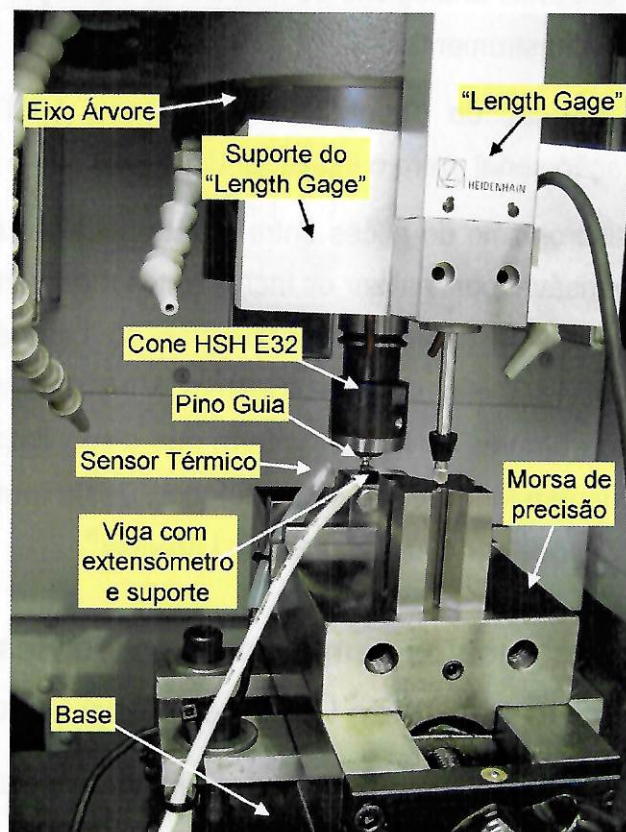


FIGURA 4.26 – Preparação para ensaio com extensômetros no centro de usinagem Mori Seiki

Ao lado do centro de usinagem, foi posicionada a bancada onde foram colocados os equipamentos eletrônicos dos sistemas de medição de temperatura, deslocamento do eixo árvore em “Z” e sinal elétrico advindo do extensômetro, computador e fonte de alimentação.

A seguir, FIGURA 4.27, é apresentada uma visão da bancada com todos os equipamentos ao lado do centro de usinagem.



FIGURA 4.27 – Preparação para ensaios com extensômetros.

4.3.6 Preparação dos Experimentos para Determinar a Repetitividade do Sinal de Disparo via Contato Elétrico

Conforme descrito no Planejamento dos Experimentos, a técnica de disparo do sinal de (“Trigger”) por contato elétrico se vale da passagem ou interrupção de passagem de corrente elétrica quando ocorre o fechamento ou abertura de uma chave elétrica.

O mecanismo proposto foi usinado em Aço Mola AISI9255, de forma a se obter a peça em forma de “L”. Um “alívio” foi usinado na região de maior deflexão da barra para aproveitar ao máximo o efeito de mola requerido para o experimento. Após a usinagem, a face inferior da barra foi retificada e polida com a finalidade de se obter um plano de referência para o toque com a esfera, FIGURA 4.28



FIGURA 4.28 – Polimento realizado na face inferior da barra de aço mola

Foi realizada a medição de rugosidade em vários pontos da face inferior da barra na região de contato com a esfera de referência, FIGURA 4.29.



FIGURA 4.29 – Medição da Rugosidade da face inferior da barra de aço mola

Após sucessivos polimentos, as medições mostraram que a máxima rugosidade para a região foi de $0,04\mu\text{m Ra}$, valor bastante abaixo da faixa de medição que se pretende medir.

Finalizada a preparação, a barra foi fixada ao suporte e à base isolante. A esfera de referência foi também instalada na base e os fios elétricos foram conectados, FIGURA 4.30.

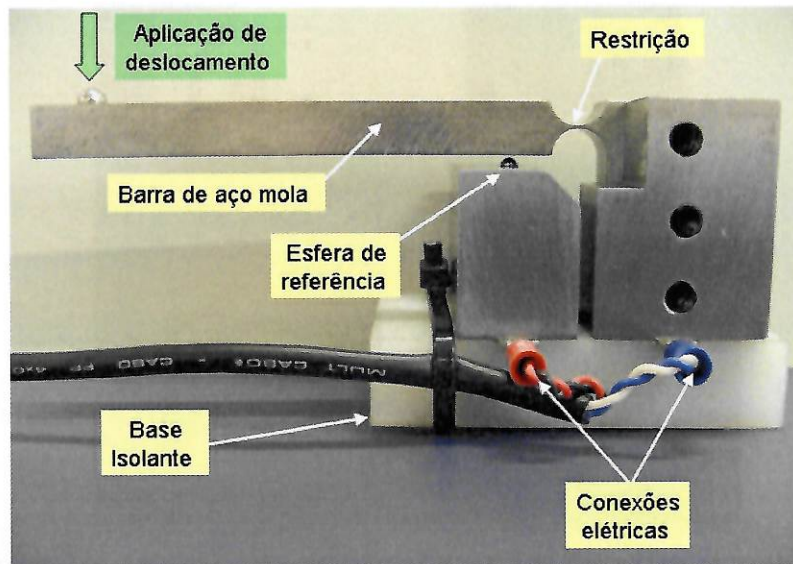


FIGURA 4.30 – Montagem do sistema disparo do sinal de ("Trigger") por contato elétrico.

O sistema foi então fixado pela base isolante à mesa do centro de usinagem por meio de uma morsa de precisão. O sensor de temperatura foi instalado próximo ao ponto de contato entre a face e a esfera de referência e os fios elétricos foram devidamente conectados à entrada analógica do sistema de aquisição de dados.

A restrição usinada na viga teve por finalidade proporcionar o deslocamento da mesma através da aplicação de forças da ordem de 0,1Kgf sobre a esfera. Como a base do sistema é feita de material isolante de baixa rigidez, a necessidade aplicação de forças da ordem de alguns Kgf para deslocar a barra de aço poderia gerar uma deformação plástica ou torção de todo o sistema fixado na morsa, o que geraria medições imprecisas.

O pino fixado ao cone e este, por sua vez, fixado ao eixo árvore, foi posicionado sobre a esfera da extremidade e foram aplicados deslocamentos manuais incrementais via "Hand Wheel" em "Z" (-), fazendo com que a face inferior da viga sobre a esfera da extremidade também se deslocasse em "Z" (-) aproximando-se da esfera de referência.

Para medir o deslocamento em "Z" a cada incremento do eixo árvore, o sistema de medição de comprimento CT 6000 foi posicionado no eixo árvore do Centro de Usinagem de forma que a ponta de medição media o deslocamento do eixo árvore com relação à base, FIGURA 4.31.

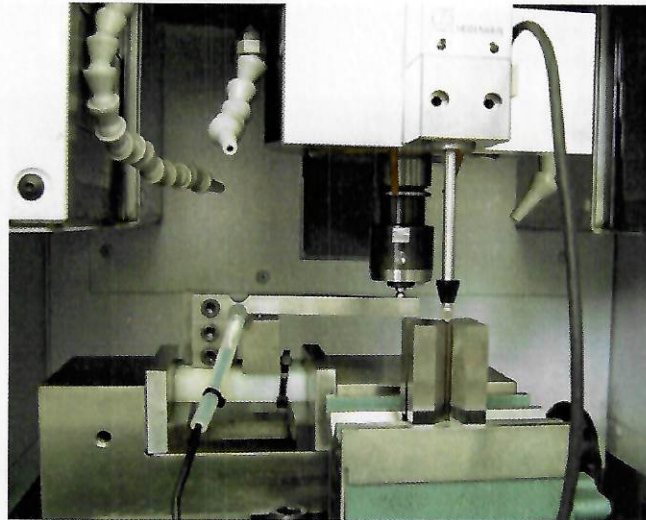


FIGURA 4.31 - Sistema disparo do sinal de ("Trigger") por contato elétrico instalado no Centro de Usinagem

O procedimento foi repetido até se verificar, pelo software de aquisição, que houve o contato permanente entre a esfera e a superfície de referência. Neste momento, o valor da coordenada do indicador digital do "Length Gage" era anotado.

Após isso, o eixo árvore subia e o procedimento se repetia por 10 vezes, sempre anotando o valor do indicador digital do "Length Gage" quando houvesse o contato. Ao final do experimento, eram obtidos conjuntos de dados com 10 valores referentes à coordenada "Z" do contato elétrico relativa ao valor do indicador digital. Esse procedimento foi repetido 21 vezes ao longo de três dias (7 vezes ao dia).

Para a obtenção da variabilidade real do deslocamento observado sobre o ponto de contato, os valores de variabilidade obtidos através do ("Length Gage") foram divididos por 7,48, que é a relação entre LD e LE obtidas para o sistema real através da medição em traçador de alturas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo são detalhados os ensaios realizados e resultados obtidos.

5.1 Extensômetros

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados para determinação das características dos extensômetros.

5.1.1 Ajuste do Ganho para Equalização de Amplitude

Conforme descrito no item Planejamento dos Experimentos, foi utilizado um método para determinação dos ganhos do amplificador operacional que foram utilizados em cada um dos dois extensômetros:

Os equipamentos foram todos ligados duas horas antes do início dos experimentos a fim de minimizar alterações provenientes do aquecimento de componentes elétricos.

- **Extensômetros Resistivos**

A seguir são apresentados os gráficos em patamares obtidos da aquisição de dados para os três ganhos:

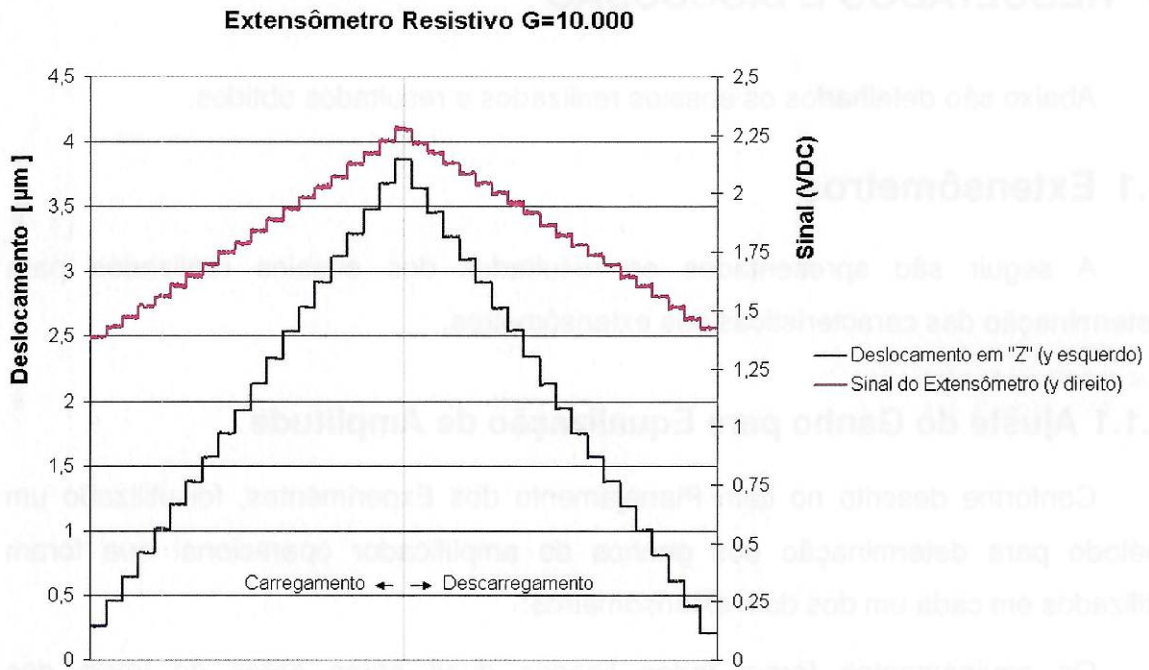


FIGURA 5.1 – Resposta do extensômetro resistivo (G=10.000)

Observou-se na FIGURA 5.1 uma variação de 0,9 VDC e um deslocamento de 3,6 μm , o que resulta em uma resolução de 0,25 Volt por μm .

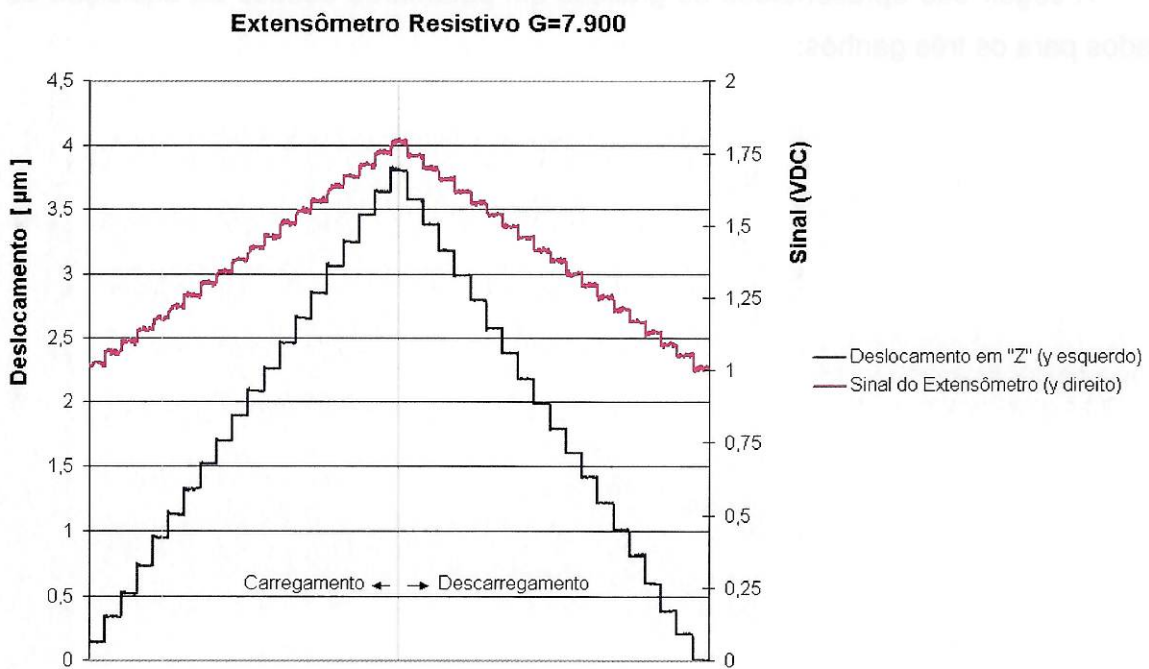


FIGURA 5.2 – Resposta do extensômetro resistivo (G=7.900)

Observou-se na FIGURA 5.2 uma variação de 0,75 VDC e um deslocamento de 3,7 μm , o que resulta em uma resolução de 0,20 Volt por μm .

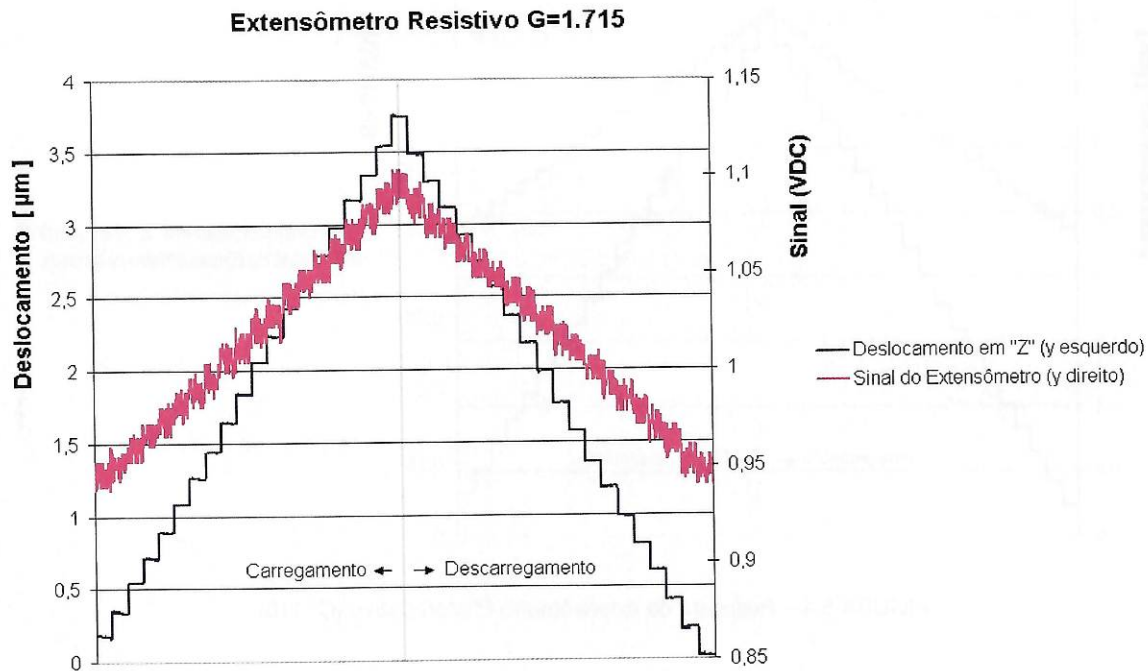


FIGURA 5.3 - Resposta do extensômetro resistivo (G=1.715)

Observou-se na FIGURA 5.3 uma variação de 0,15 VDC e um deslocamento de 3,6 μm , o que resulta em uma resolução de 0,04 Volt por μm .

Desta forma, verifica-se que a máxima relação tensão X deformação possível para o sistema resistivo, utilizando-se o “valor máximo seguro” (G=7.900), foi de 0,20 Volt por micrômetro deslocado na ponta da viga em balanço. A utilização do ganho G=10.000 vai além dos limites de confiabilidade e linearidade dados pela interface amplificadora desenvolvida e por isso não foi utilizada.

- **Extensômetros Piezoresistivos**

A seguir são apresentados os gráficos em patamares obtidos da aquisição de dados para os três ganhos:

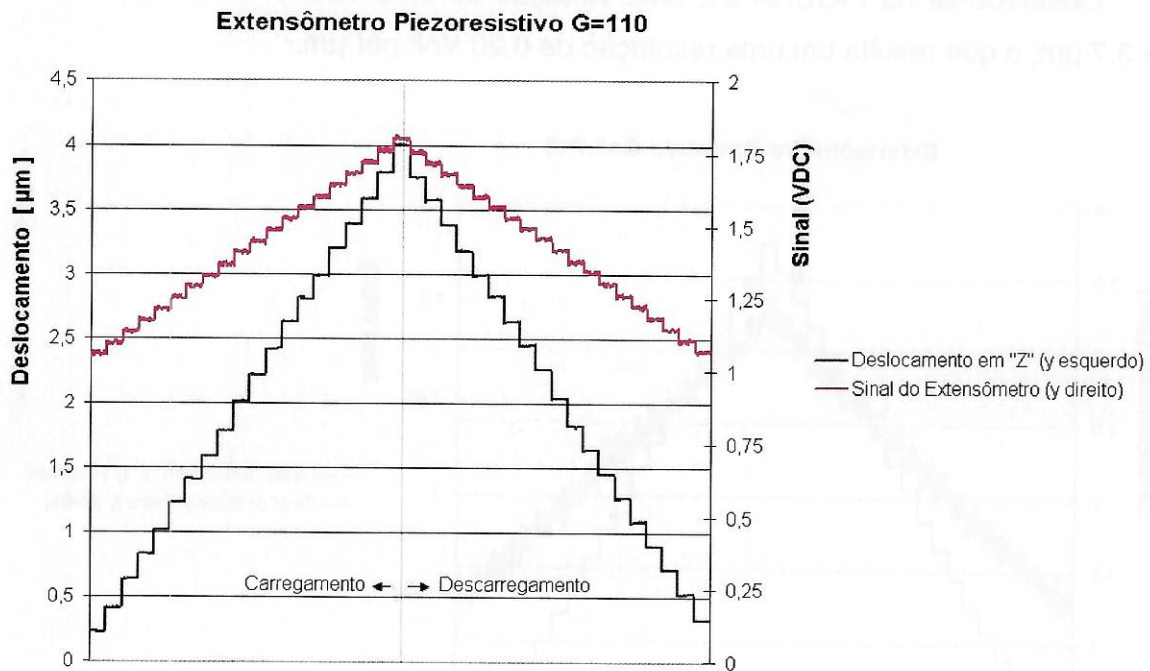


FIGURA 5.4 – Resposta do extensômetro Piezoresistivo (G=110)

Observou-se na FIGURA 5.4 uma variação de 0,74 VDC e um deslocamento de 3,8 μm , o que resulta em uma resolução de 0,19 Volt por μm .

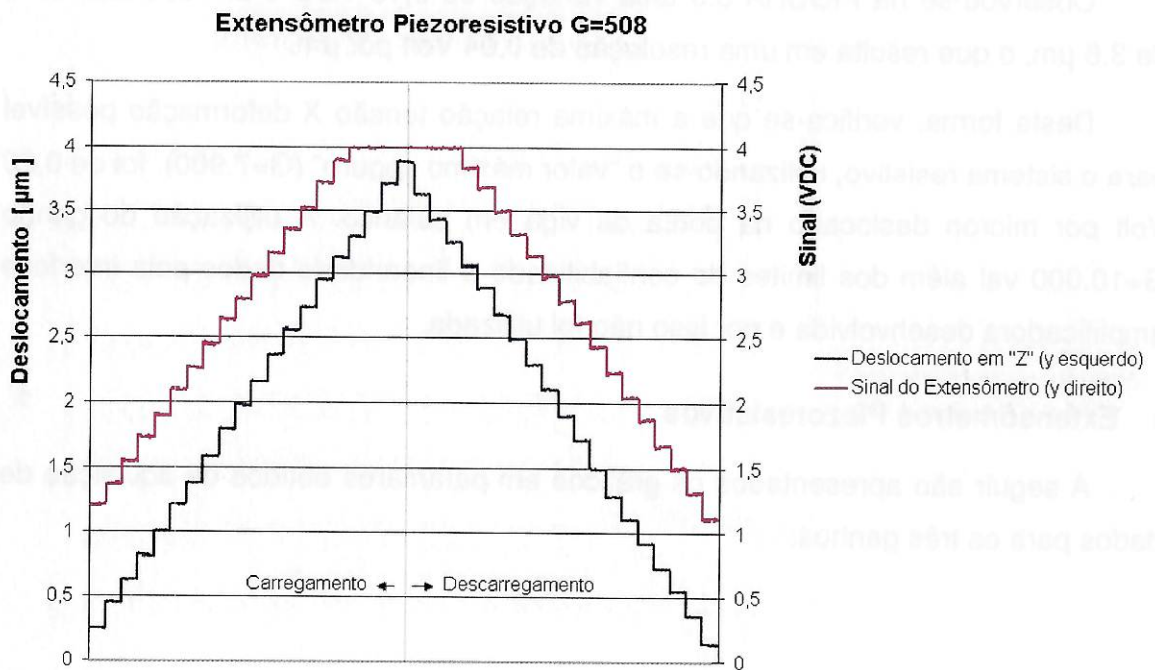


FIGURA 5.5 – Resposta do extensômetro Piezoresistivo (G=508)

Observou-se na FIGURA 5.5 que houve saturação saída da interface amplificadora, cuja máxima tensão de saída é 4VDC. Desta forma, o último patamar de incremento não pode ser lido e deve ser desconsiderado. Verificou-se uma variação de 2,7 VDC e um deslocamento de 3,4 μm , descontado o último patamar onde houve a saturação, o que resulta em uma resolução de 0,79 Volt por μm .

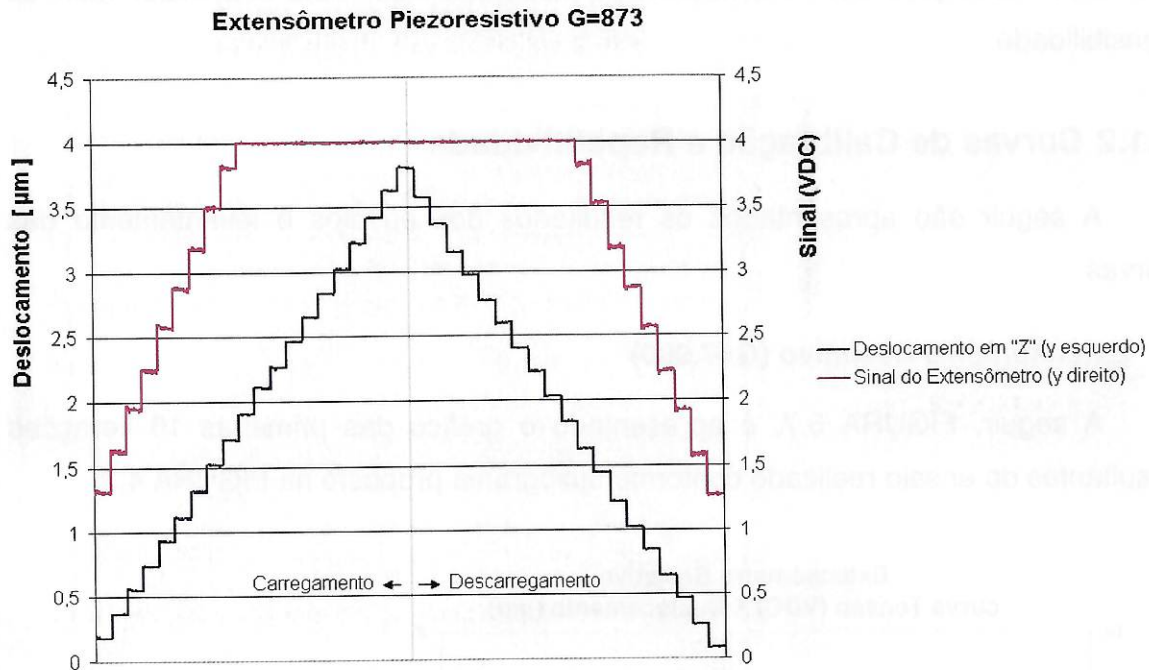


FIGURA 5.6 – Resposta do extensômetro Piezoresistivo (G=873)

Conforme a FIGURA 5.6, observa-se que houve saturação mais rápida da saída da interface amplificadora, cuja máxima tensão de saída é 4VDC, capturando alterações até o oitavo patamar. Desta forma, o nono patamar em diante de incremento não puderam ser lidos e devem ser desconsiderados. No intervalo de confiança, descontando a faixa de saturação, verificou-se uma variação de 2,5 VDC e um deslocamento de 1,5 μm , o que resulta em uma resolução de 1,66 Volt por μm .

• Análise dos Dados

Nessa etapa foi possível identificar a maior amplificação segura a se utilizar no extensômetro resistivo, que possibilitou uma resolução de 0,2 VDC por milésimo de milímetro deslocado e foi possível identificar o ganho correspondente a se utilizar no extensômetro piezoresistivo para equalizar a amplitude dos dois sistemas mediante

a aplicação da mesma deformação, possibilitando uma comparação direta das características de ambos.

A utilização dos ganhos para exploração de informações adicionais foram úteis para se verificar que não é viável utilizar os extensômetros resistivos com ganhos muito abaixo do valor máximo seguro. Verificou-se também que é possível alcançar melhores resoluções com extensômetros piezoresistivos, visto seu maior fator de sensibilidade.

5.1.2 Curvas de Calibração e Repetitividade

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios e levantamento das curvas.

- **Extensômetro Resistivo (G=7.900)**

A seguir, FIGURA 5.7, é apresentado o gráfico das primeiras 10 iterações resultantes do ensaio realizado conforme fluxograma proposto na FIGURA 4.9.

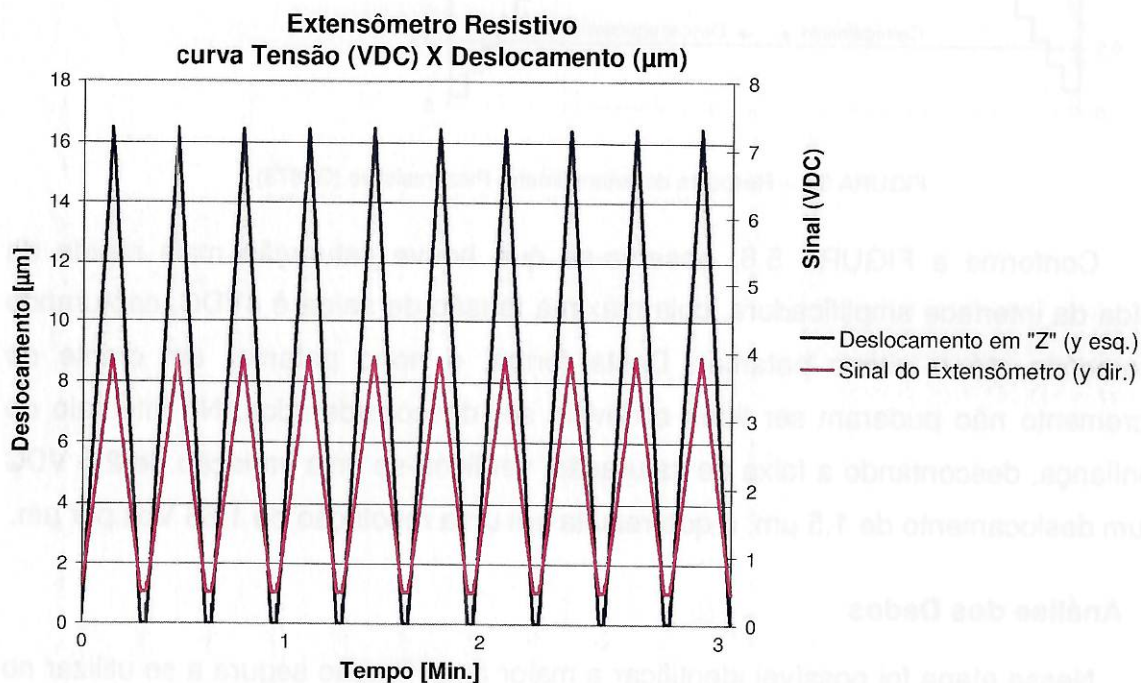


FIGURA 5.7 – Gráfico Tensão (VDC) X Deslocamento (µm) ao longo do tempo.

A seguir, FIGURA 5.8, é apresentado o levantamento da nuvem de pontos de Tensão (VDC) X Deslocamento (μm) adquirida no experimento completo, bem como a equação linear que a descreve e o coeficiente de determinação R-quadrado.

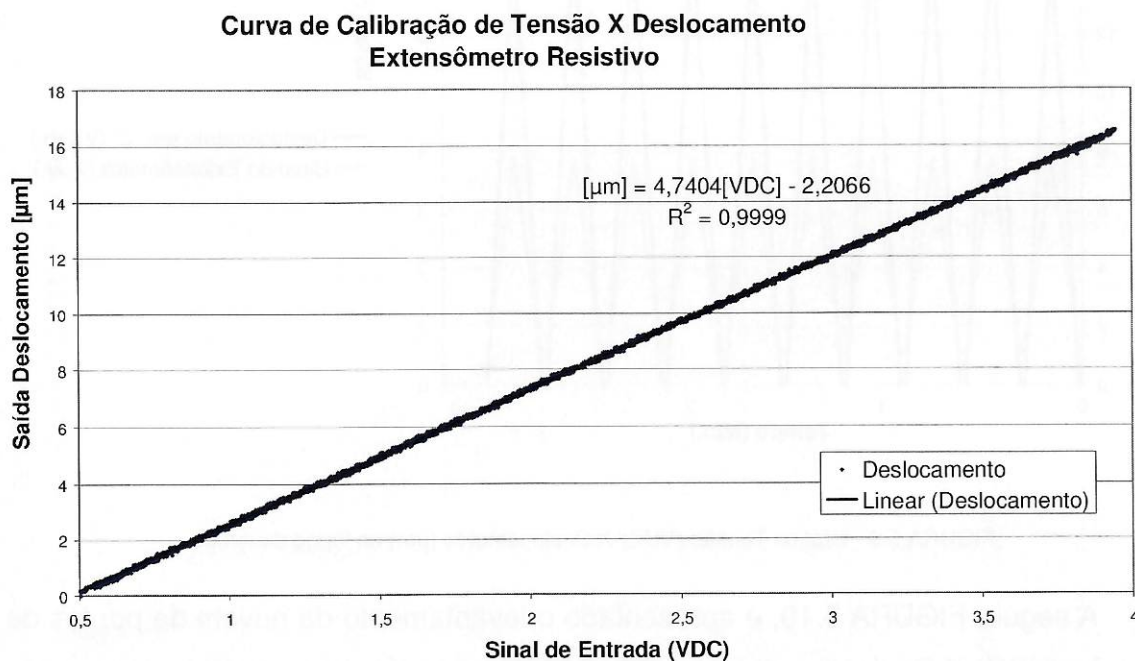


FIGURA 5.8 – Curva de calibração do extensômetro resistivo.

- **Extensômetro Piezoresistivo (G=110)**

A seguir, FIGURA 5.9, é apresentado o gráfico das primeiras 10 iterações resultantes do ensaio realizado também conforme o fluxograma da FIGURA 4.9.

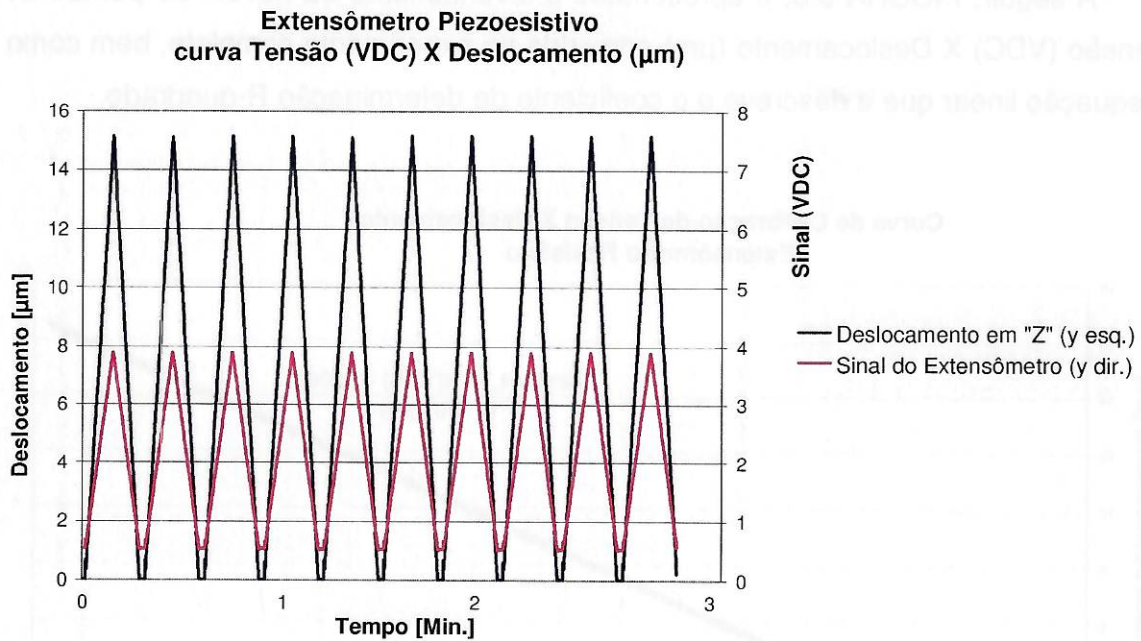


FIGURA 5.9 - Gráfico Tensão (VDC) X Deslocamento (μm) ao longo do tempo.

A seguir, FIGURA 5.10, é apresentado o levantamento da nuvem de pontos de Tensão (VDC) X Deslocamento (μm) adquirida no experimento completo, bem como a equação linear que a descreve e o coeficiente de determinação R-quadrado.

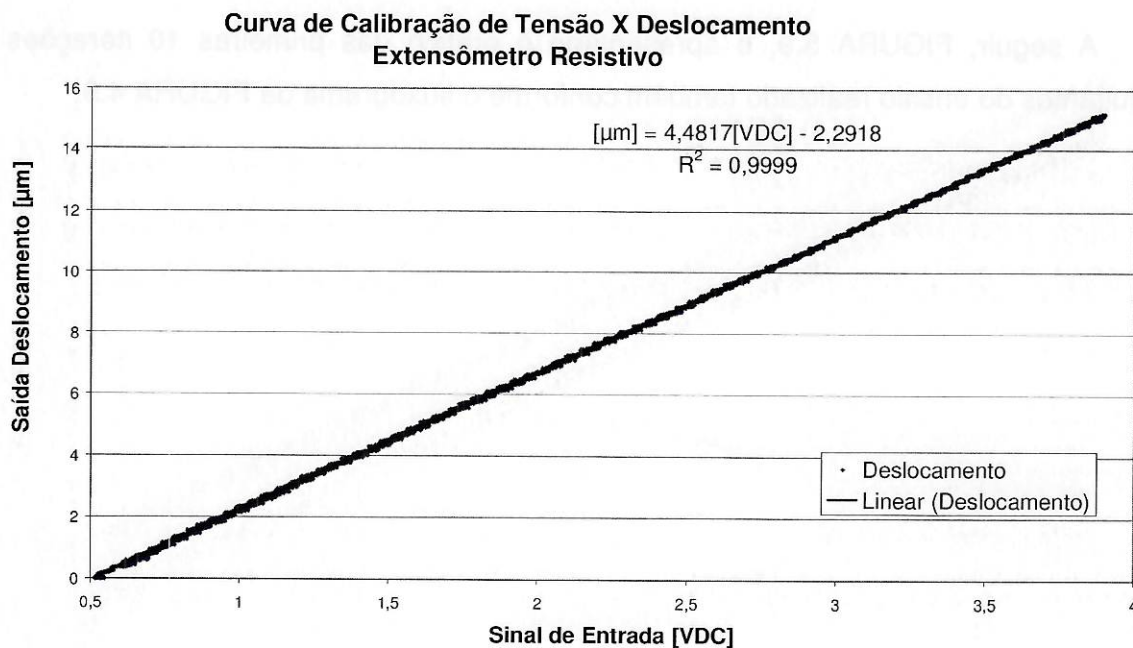


FIGURA 5.10 - Curva de calibração do extensômetro piezoelástico.

- **Análise dos Dados**

Observando-se as curvas de calibração dos dois transdutores, nota-se que ambos apresentam comportamento linear em toda a amplitude de medição, tendo bem definida a equação da reta que descreve a relação entre sinal e deslocamento da viga.

A partir do conjunto de dados obtidos como resultado da aplicação dos deslocamentos (tabela com valor do deslocamento aplicado (μm) e respectivo sinal do extensômetro (VDC)), foi feito um levantamento do desvio padrão dos sinais obtidos para os mesmos deslocamentos aplicados, visto que, no ciclo de 30 excitações da viga, os deslocamentos se repetem, Anexo IV. Com isso é possível inferir a respeito da repetitividade do sistema em cada ponto.

Em seguida, FIGURA 5.11 e FIGURA 5.12, são apresentados os desvios padrão (transformados em deslocamento através da curva de calibração) observados ao longo do deslocamento de 15 micrometros para o extensômetro resistivo e piezoresistivo respectivamente.

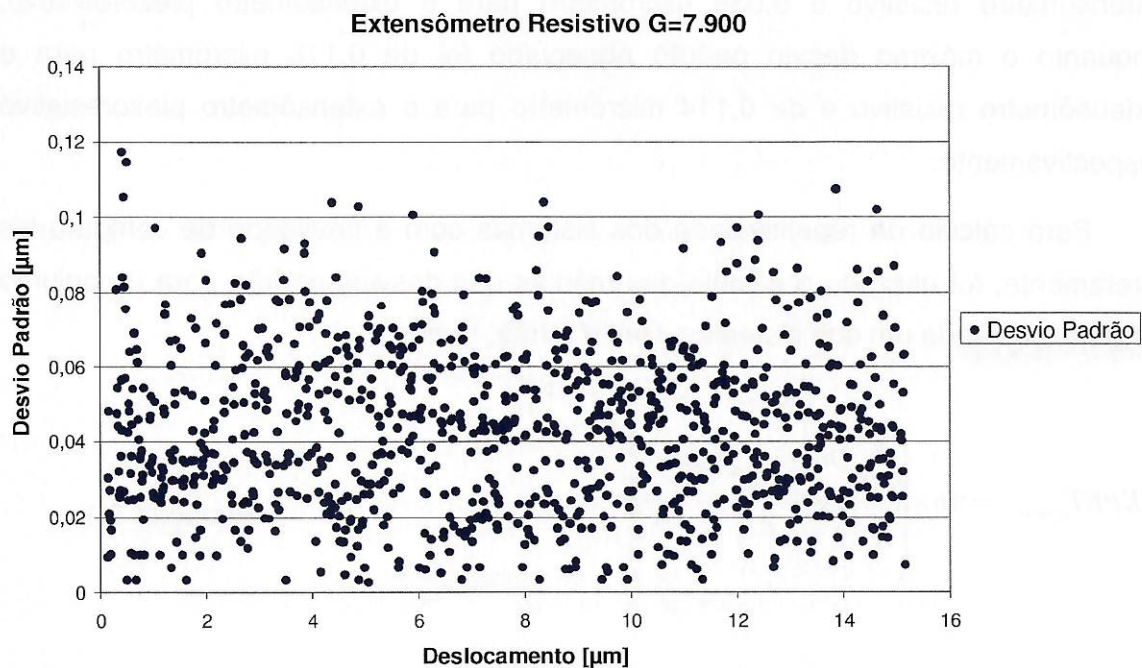


FIGURA 5.11 – Desvio padrão observado ao longo do deslocamento (extensômetro Resistivo)

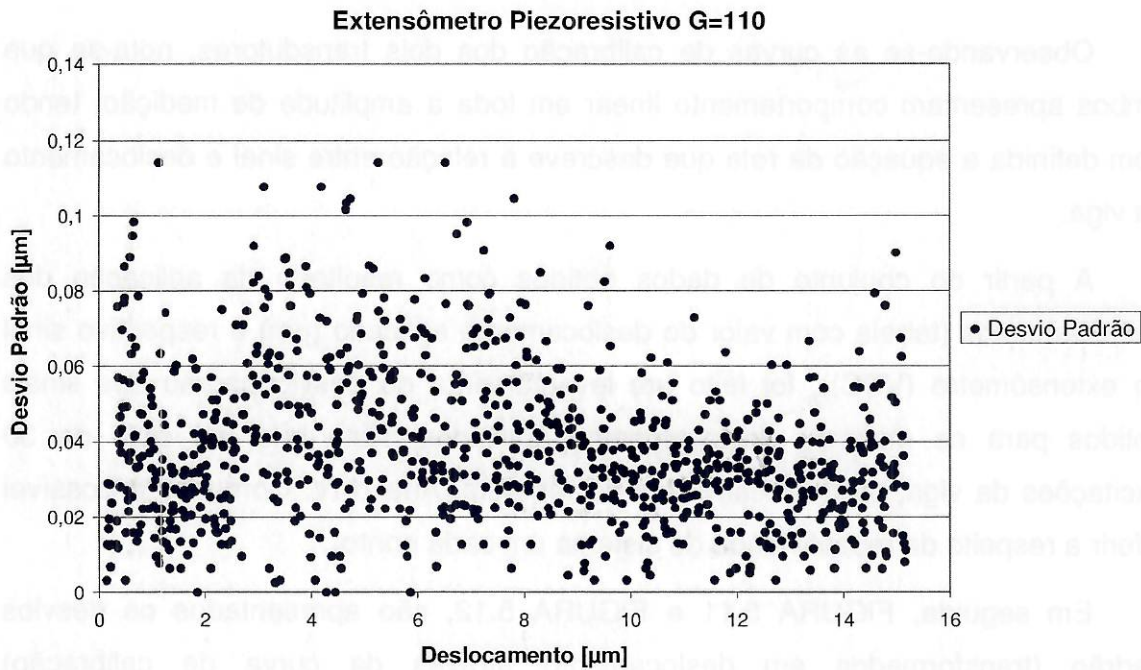


FIGURA 5.12 – Desvio padrão observado ao longo do deslocamento (extensômetro Piezoresistivo)

A média dos desvios padrão observada foi de 0,043 micrômetro para o extensômetro resistivo e 0,038 micrômetro para o extensômetro piezoresistivo, enquanto o máximo desvio padrão observado foi de 0,118 micrômetro para o extensômetro resistivo e de 0,114 micrômetro para o extensômetro piezoresistivo respectivamente.

Para cálculo da repetitividade dos sistemas com a finalidade de compará-las diretamente, foi utilizado o cálculo das médias dos desvios padrão para o conjunto de dados de cada um dos sistemas. Desta forma, temos:

$$REPET_{amostras} = \pm 6 \times \left(\frac{\sum_{i=1}^n Desvio_padr\tilde{a}o}{n} \right) \quad \text{Equação 5.1}$$

Aplicando a fórmula para os conjuntos de dados obtidos tanto para o extensômetro resistivo quanto para o extensômetro piezoresistivo, temos:

$$REPET_{Ext.Re.s.} = \pm 6 \times \left(\frac{\sum_1^n Desvio_padr\tilde{a}o}{n} \right) = \pm 6 \times 0,043 = \pm 0,258 \mu m \quad \text{Equação 5.2}$$

$$REPET_{Ext.Piez.} = \pm 6 \times \left(\frac{\sum_1^n Desvio_padr\tilde{a}o}{n} \right) = \pm 6 \times 0,038 = \pm 0,228 \mu m \quad \text{Equação 5.3}$$

5.1.3 Resposta dos Transdutores a Variações Térmicas

A seguir são apresentados os resultados obtidos para cada transdutor.

- **Extensômetro Resistivo (G=7.900)**

A FIGURA 5.13 mostra o resultado do experimento ao longo das vinte e quatro horas de aquisição de dados do extensômetro resistivo.

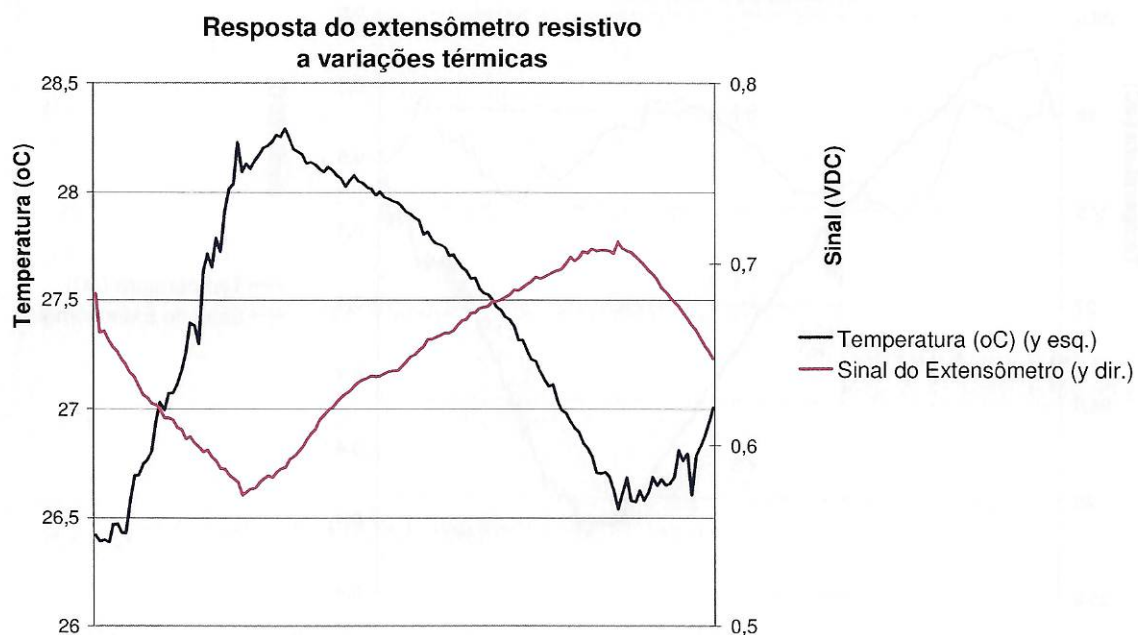


FIGURA 5.13 – Sensibilidade Térmica do extensômetro resistivo

Verifica-se que o comportamento do sinal proveniente do transdutor varia de maneira inversamente proporcional à variação térmica, porém não foi possível observar uma relação linear que descreva essa função. Observando-se o gráfico das 24 horas de dados, verifica-se que a temperatura variou de 26,4°C até 28,3 °C, enquanto o sinal do transdutor variou de 0,57Volt até 0,71Volt. Desta maneira, para o experimento realizado, houve uma variação de 0,14Volt no sinal do transdutor para uma variação térmica do ambiente de 1,9°C. Aplicando a equação de calibração do extensômetro resistivo sobre a amplitude da variação do sinal no período, verificamos uma variação 0,7 micrometros. Esse valor se mostra excessivamente alto, visto que proporcionalmente, uma variação de 10°C, que é normal em um chão de fábrica convencional, acarretaria uma incerteza de medição de aproximadamente 3,5 micrometros.

- **Extensômetro Piezoelástico (G=110)**

A FIGURA 5.14 mostra o resultado do experimento ao longo das vinte e quatro horas de aquisição de dados do extensômetro piezoelástico.

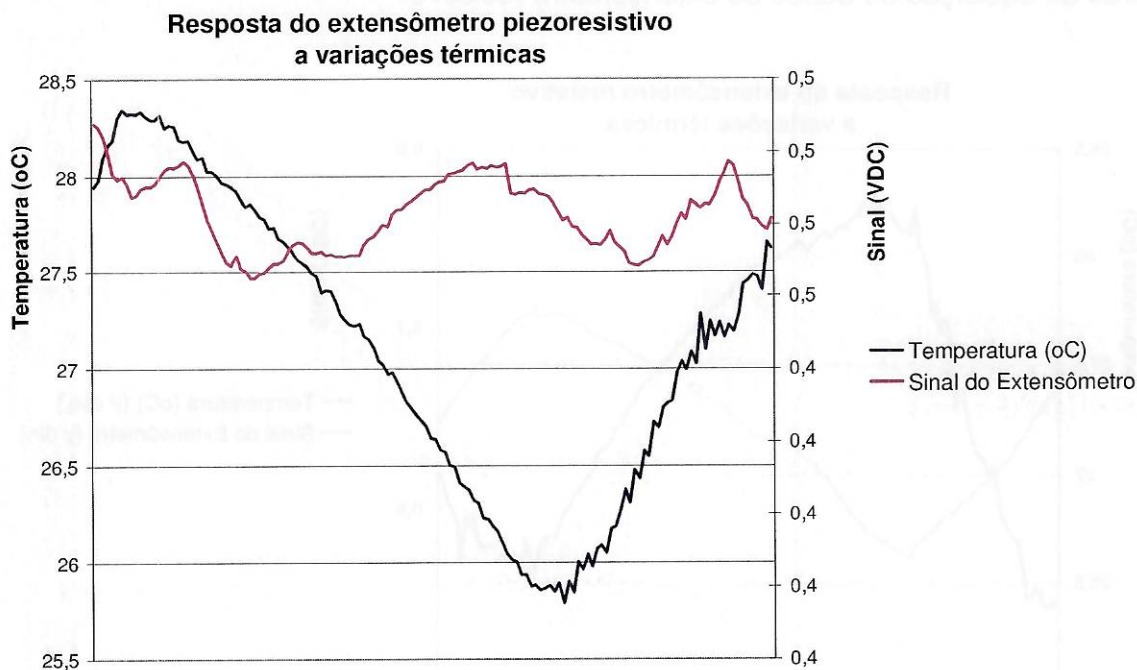


FIGURA 5.14 – Sensibilidade Térmica do extensômetro piezoelástico

Verifica-se que a variação do sinal proveniente do transdutor pouco tem a ver com a variação térmica do ambiente, de forma que não foi possível observar uma

relação linear que descreva essa função. Observando-se o gráfico das 24 horas de dados adquiridos, verifica-se que a temperatura variou de 25,8°C até 28,3 °C, enquanto que o sinal do transdutor variou de 0,45Volt até 0,47Volt. Desta maneira, para o experimento realizado, houve uma variação de 0,02Volt no sinal do transdutor para uma variação térmica do ambiente de 2,5°C. Aplicando a equação de calibração do extensômetro piezoresistivo sobre a amplitude da variação do sinal no período, verificamos uma variação 0,09 micrometros. Esse valor se mostra adequado, visto que proporcionalmente, uma variação de 10°C, que é normal em um chão de fábrica convencional, acarretaria uma incerteza de medição de aproximadamente 0,3 micrometros.

Plotando o sinal dos dois extensômetros no período de experimentação, visto que a variação térmica para os dois casos foi similar, verifica-se claramente a vantagem dos extensômetros piezoresistivos com relação a influencia da temperatura, FIGURA 5.15.

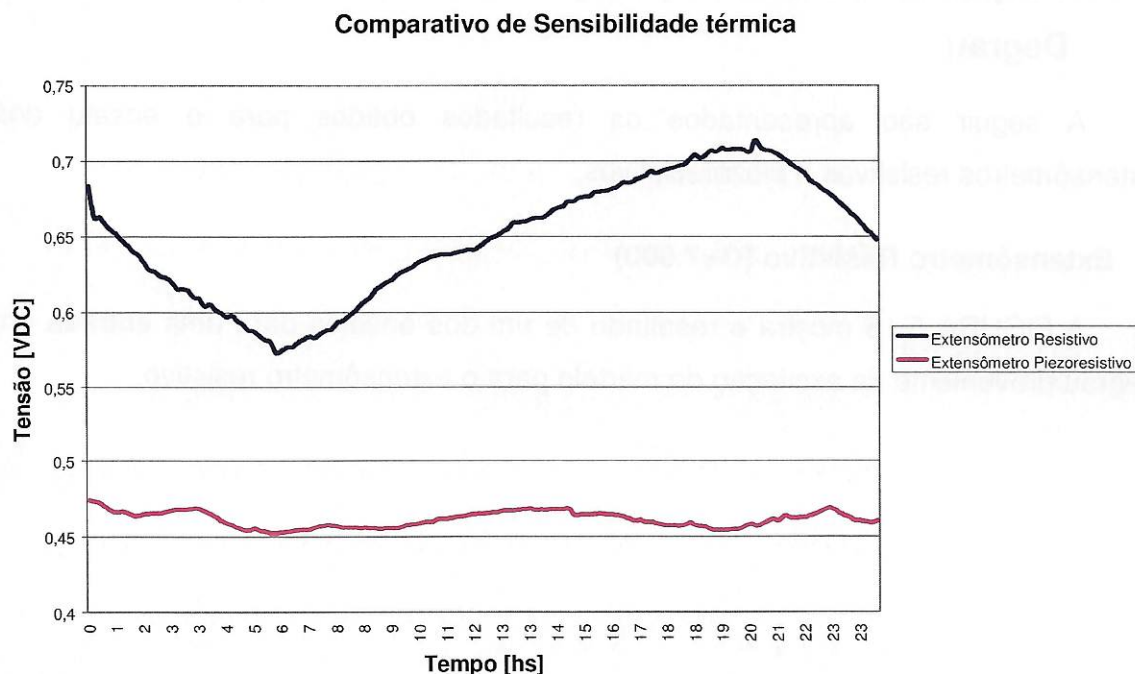


FIGURA 5.15 – Variação térmica comparativa dos dois extensômetros ao longo do ensaio

• Análise dos Dados

Analisando as curvas de temperatura e sinal ao longo do tempo, é possível verificar que o extensômetro resistivo ensaiado se mostrou cerca de 10 vezes mais

sensível à variação térmica do que o extensômetro piezoresistivo. Esse comportamento se deve ao alto ganho aplicado ao extensômetro resistivo, que faz com que o efeito da variação térmica sobre os demais componentes do sistema eletrônico também sejam multiplicados pelo mesmo fator. Verifica-se ainda que, embora não seja possível determinar uma função que descreva a tensão dos transdutores em função da temperatura, o extensômetro resistivo apresentou variações cujo comportamento é visivelmente relacionado à variação térmica do ambiente.

Apesar de ambos estarem ligados em meia ponte, com um extensômetro sofrendo deformação e outro colado a 90 graus com a finalidade de realização de uma compensação térmica, essa configuração, tida teoricamente como a mais estável para realização da compensação térmica, não obteve o efeito desejado para o extensômetro resistivo.

5.1.4 Resposta Dinâmica à Aplicação de um Deslocamento em Degrau

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o ensaio dos extensômetros resistivos e piezoresistivos.

- **Extensômetro Resistivo ($G=7.900$)**

A FIGURA 5.16 mostra o resultado de um dos ensaios para uma entrada em degrau proveniente da excitação do martelo para o extensômetro resistivo.



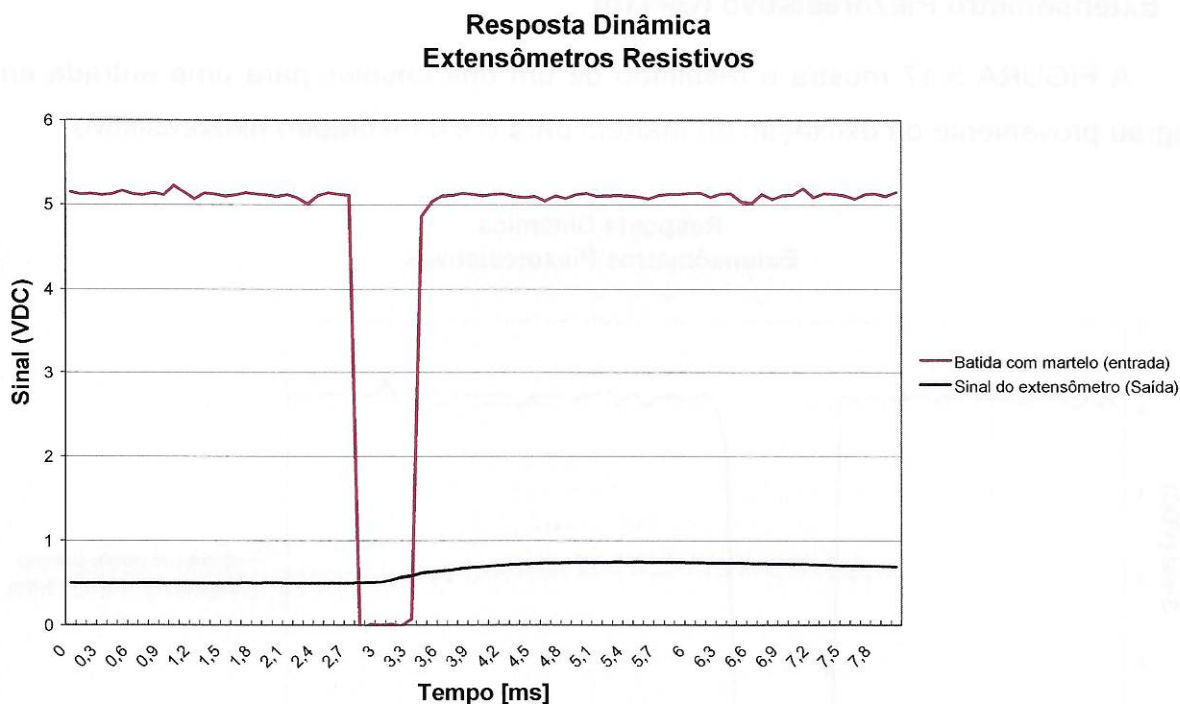


FIGURA 5.16 – Resposta do extensômetro resistivo a uma entrada degrau.

Analisando os dados das 30 excitações válidas para o extensômetro resistivo, verifica-se que após o contato do martelo com a esfera da viga, decorrem-se em média 0,3ms (com desvio padrão de 0,1ms) e o pico do sinal referente à batida ocorre em média 2,3ms (com desvio padrão de 0,2ms) após o início do evento.

Abaixo, TABELA 5-1 são apresentados os dados referentes às 30 excitações.

TABELA 5-1 – Resposta à entrada degrau – Extensômetro Resistivo

Excitações - Extensômetro Resisivo (valores em milisegundos)								
Excitação	Início	Pico	Excitação	Início	Pico	Excitação	Início	Pico
1	0,3	2,3	11	0,3	2,5	21	0,2	2,1
2	0,3	2,5	12	0,3	2,6	22	0,4	2,5
3	0,2	2,1	13	0,4	2,4	23	0,4	2,6
4	0,3	2,5	14	0,4	2,3	24	0,4	2,1
5	0,3	2,4	15	0,3	2,3	25	0,3	2,5
6	0,3	2,3	16	0,2	2,5	26	0,4	2,1
7	0,4	2,4	17	0,3	2,4	27	0,3	2,2
8	0,3	2,4	18	0,4	2,2	28	0,2	2,3
9	0,3	2,5	19	0,3	2,4	29	0,3	2,2
10	0,2	2,4	20	0,3	2,1	30	0,3	2,3
Média - Início					0,3			
Média - Pico					2,3			
Desvio Padrão - Início					0,1			
Desvio Padrão - Pico					0,2			

- **Extensômetro Piezoresistivo (G=110)**

A FIGURA 5.17 mostra o resultado de um dos ensaios para uma entrada em degrau proveniente da excitação do martelo para o extensômetro piezoresistivo.

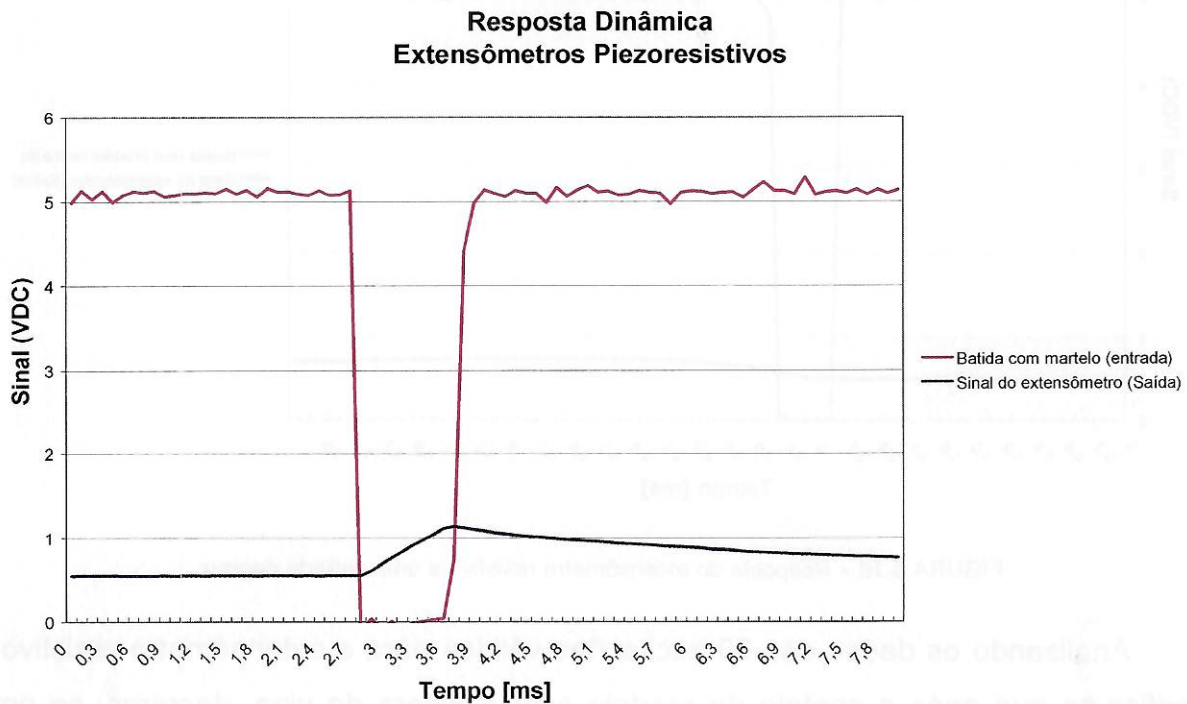


FIGURA 5.17 – Resposta do extensômetro resistivo a uma entrada degrau.

Analisando os dados das 30 excitações válidas para o extensômetro piezoresistivo, verifica-se que o transdutor começa a responder à excitação menos de 0,1ms após o contato do martelo com a esfera da viga e o pico do sinal referente à batida ocorre em média 1ms (com desvio padrão de 0,1ms) após o início do evento.

Abaixo, TABELA 5-2, são apresentados os dados referentes às 30 excitações.

TABELA 5-2 - Resposta à entrada degrau – Extensômetro Piezoresistivo

Excitações - Extensômetro Piezoresistivo (valores em milisegundos)								
Excitação	Início	Pico	Excitação	Início	Pico	Excitação	Início	Pico
1	0	0,9	11	0	0,9	21	0	0,8
2	0	0,9	12	0	0,8	22	0	0,8
3	0	1,1	13	0	1,1	23	0	1,1
4	0	1,2	14	0	0,8	24	0	1,2
5	0	0,8	15	0	0,9	25	0	0,9
6	0	0,9	16	0	1,1	26	0	1,1
7	0	1	17	0	1	27	0	0,9
8	0	1	18	0	1	28	0	0,9
9	0	1,1	19	0	1,2	29	0	1,2
10	0	0,9	20	0	0,8	30	0	0,8
Média - Início					0,0			
Média - Pico					1,0			
Desvio Padrão - Início					0,0			
Desvio Padrão - Pico					0,1			

• Análise dos dados

Quando da aplicação de uma excitação do tipo degrau, esse ensaio complementar apresenta resultados que evidenciam que o extensômetro piezoresistivo responde mais rapidamente que o extensômetro resistivo testado, tanto para começar a responder ao estímulo quanto para atingir o pico do sinal. Trata-se de um dado importante pois, caso seja aplicado em um apalpador comutador, um atraso na resposta do sistema sensor pode acarretar em erros nas medições.

Utilizando tempo de resposta $T_s=63,2\%$ do pico da resposta com relação ao instante da batida com o martelo, tem-se que $T_s=0,9\text{ms}$ para o extensômetro resistivo e $T_s=0,5\text{ms}$ para o extensômetro piezoresistivo.

5.2 Contato Elétrico

Os valores de posição do “Length Gage” e do sinal analógico advindo do contato elétrico eram capturados paralelamente a uma taxa de 40 amostras por segundo e armazenados em colunas diferentes de uma planilha para posterior análise.

A seguir, FIGURA 5.18, é apresentado o resultado de uma repetição composta por 10 toques.

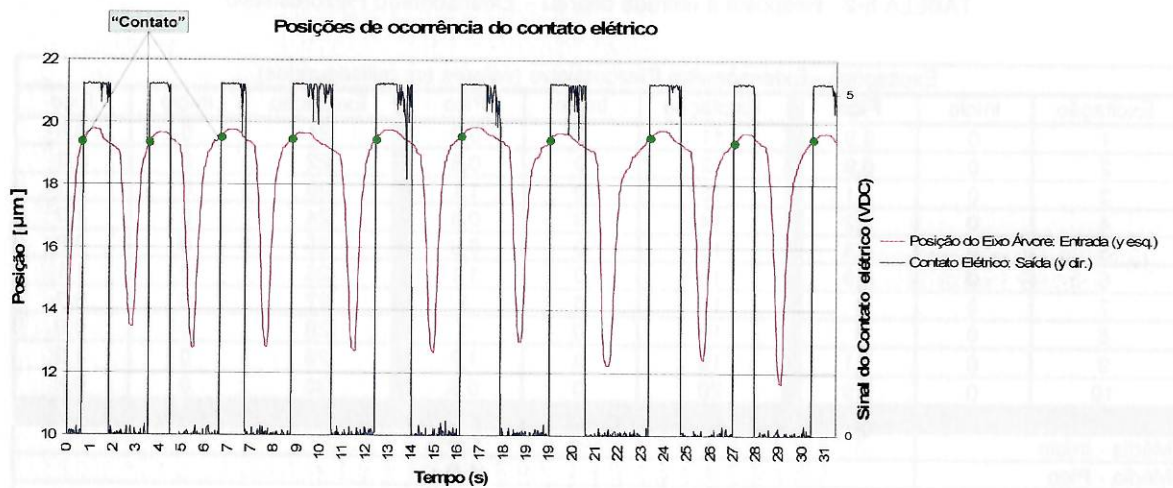


FIGURA 5.18 – Experimento demonstrando a posição do “Length Gage” no momento do contato elétrico.

Para a determinação exata da posição em que ocorreu o contato, era verificado na coluna de dados referente ao contato elétrico, o número do elemento onde houve a mudança definitiva de 0VDC para 5VDC. Em seguida era lido o valor contido no mesmo elemento da coluna de dados referente à posição.

Os resultados obtidos para o experimento acima são mostrados a seguir, TABELA 5-3

TABELA 5-3 - Resultado do experimento 4 – posições de contato

Posição de "Trigger" (micrometros) - Experimento 4									
Toque1	Toque2	Toque3	Toque4	Toque5	Toque6	Toque7	Toque8	Toque9	Toque10
19,38	19,35	19,50	19,50	19,45	19,57	19,47	19,54	19,40	19,45
Média dos Dados									
19,46 micrometros									
Desvio Padrão dos Dados									
0,070 micrometro									

A seguir é apresentado o resultado final dos dados compilados para os 21 experimentos.

TABELA 5-4 - Dados compilados para as repetições de 1 a 7 (valores em micrometros).

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6	Experimento 7
Toque 1	24,46	23,63	21,47	19,38	13,23	10,4	9,4
Toque 2	24,34	23,38	21,57	19,35	13,22	10,42	9,19
Toque 3	24,3	23,2	21,19	19,5	13,26	10,15	9,11
Toque 4	24,22	23,32	21,29	19,5	13,3	9,93	9,04
Toque 5	24,13	23,27	21,33	19,45	13,14	9,75	9,28
Toque 6	24,35	23,06	21,44	19,57	13,05	9,7	9,14
Toque 7	24,1	23,43	21	19,47	12,88	9,8	9,18
Toque 8	24,24	23,41	21,05	19,54	12,99	9,84	9,4
Toque 9	24,36	24,4	20,77	19,4	13,02	9,46	9,44
Toque 10	24,3	23,23	20,89	19,45	13,02	9,66	9,23
Média	24,28	23,433	21,2	19,461	13,111	9,911	9,241
Desvio Padrão	0,110	0,373	0,266	0,070	0,139	0,318	0,136

TABELA 5-5 - Dados compilados para as repetições de 8 a 14 (valores em micrometros).

	Experimento 8	Experimento 9	Experimento 10	Experimento 11	Experimento 12	Experimento 13	Experimento 14
Toque 1	8,58	5,36	4	1,25	-1,3	15,13	15,2
Toque 2	8,55	5,53	4,01	0,79	-1,45	14,55	14,92
Toque 3	8,64	4,59	4	0,98	-1,51	15,31	15,47
Toque 4	8,54	4,8	4,03	1,34	-1,5	15,1	15,45
Toque 5	8,36	4,69	4,01	1,16	-1,15	14,82	15,8
Toque 6	8,01	4,69	4,01	0,74	-1,59	14,49	15,83
Toque 7	8,28	4,65	4,01	0,95	-1,2	14,48	15,85
Toque 8	8,31	4,59	4,01	0,94	-1,12	15,32	15,77
Toque 9	8,31	4,84	4,03	0,69	-1,19	14,76	15,79
Toque 10	8,42	4,62	3,98	1,23	-1,37	14,69	15,66
Média	8,4	4,836	4,009	1,007	-1,338	14,865	15,574
Desvio Padrão	0,188	0,334	0,014	0,229	0,169	0,327	0,313

TABELA 5-6 - Dados compilados para as repetições de 15 a 21 (valores em micrometros).

	Experimento 15	Experimento 16	Experimento 17	Experimento 18	Experimento 19	Experimento 20	Experimento 21
Toque 1	15,71	15,65	14,3	9,76	7,89	6,78	4,74
Toque 2	15,73	15,62	14,13	9,68	7,83	6,8	4,95
Toque 3	15,62	15,61	14,29	9,68	7,73	6,75	4,58
Toque 4	15,56	15,27	14,21	9,69	7,8	6,59	4,75
Toque 5	15,34	15,3	14,17	9,62	7,94	6,66	4,53
Toque 6	15,24	15,43	14,1	9,53	7,73	6,46	4,82
Toque 7	15,64	15,07	14,22	9,13	7,78	6,72	4,77
Toque 8	15,48	15,27	14,07	9,21	7,8	6,81	4,83
Toque 9	15,31	15,39	14,16	9,28	7,72	6,36	4,87
Toque 10	15,48	14,88	14,16	9,06	7,78	6,42	4,77
Média	15,511	15,349	14,181	9,464	7,8	6,635	4,761
Desvio Padrão	0,171	0,248	0,075	0,265	0,071	0,168	0,126

• **Análise dos Dados**

A repetitividade do sistema baseado em contato elétrico sem a aplicação do fator divisor foi calculada como sendo ± 6 vezes a média dos desvios padrão de todos os experimentos, Equação 5.4.

$$REPET_{amostras} = \pm 6 \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{21} Desvio_padr\tilde{a}o}{21} \right) = \pm 6 \times 0,196 = \pm 1,18 \mu m \quad \text{Equação 5.4}$$

Aplicando-se o fator divisor igual a 7,48, que é a relação entre LD e LE obtidas para o sistema real, temos:

$$REPET_{ce} = \left(\frac{\sigma_{amostras}}{R} \right) = \frac{\pm 1,18 \mu m}{7,48} = \pm 0,16 \mu m \quad \text{Equação 5.5}$$

Desta maneira, a repetitividade do contato elétrico foi calculada como sendo de $\pm 0,16\mu\text{m}$ (6 Sigma). Esse valor não leva em conta o desgaste dos contatos, variações térmicas e de umidade que influenciam de forma a piorar essa característica.

6 CONCLUSÕES

Foi apresentada nesse trabalho uma síntese geral dos transdutores mais comumente encontrados no mercado para aplicação como elemento sensor de um apalpador comutador. Propôs-se e se aplicou um método para identificar primeiramente quais desses elementos são os mais adequados para o fim proposto. Finalmente foram realizados ensaios e análises estatísticas com a finalidade de se obter parâmetros de comparação do desempenho dos extensômetros resistivos e piezoresistivos em relação ao desempenho do contato elétrico.

Com base em todos os ensaios apresentados nesse trabalho, as seguintes conclusões podem ser traçadas:

- Devido à miniaturização dos transdutores e especificidade necessária para a aplicação como elemento sensor de um apalpador comutador cujas dimensões sejam compatíveis com o padrão miniaturizado existente mercado para Máquinas-Ferramenta, não foi possível encontrar até então uma solução comercial pronta para ser diretamente aplicada ao sistema;
- Dentre os transdutores ensaiados na fase de experimentação inicial, os extensômetros foram os que obtiveram maior pontuação segundo a metodologia aplicada;
- A máxima relação tensão X deformação possível para o sistema resistivo, utilizando-se o “valor máximo seguro” ($G=7.900$), foi de 0,20 Volt por micron deslocado na ponta da viga em balanço. O ganho aplicado ao extensômetro piezoresistivo capaz de gerar a mesma relação tensão X deformação foi ($G=110$). Desta forma verifica-se que o extensômetro piezoresistivo se mostrou cerca de setenta vezes mais sensível à deformação que os extensômetros convencionais;
- O levantamento da curva de calibração dos extensômetros demonstra que, apesar sensibilidade superior do extensômetro piezoresistivo, este não apresenta relação sinal / ruído diferente do extensômetro resistivo, visto que a repetitividade apurada dos dados é similar para os dois transdutores;
- O valor da repetitividade ± 6 desvios-padrão apurada (sem a influência da variação térmica) para o extensômetro resistivo e piezoresistivo foi de $\pm 0,258\mu\text{m}$ e $\pm 0,228\mu\text{m}$ respectivamente;

- Apesar de ambos os extensômetros terem sido montados em um circuito meia-ponte composto por dois extensômetros (o primeiro na direção da deformação e o segundo perpendicular a ela) para efeitos de compensação térmica, o extensômetro resistivo se mostrou cerca de 10 vezes mais sensível a variações térmicas do que o extensômetro piezoresistivo. (0,35 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ contra 0,036 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ respectivamente);
- Com relação à resposta dinâmica advinda da aplicação de um deslocamento em degrau, verificou-se que o extensômetro piezoresistivo foi capaz de responder mais rapidamente a excitação;
- Os ensaios realizados mostram que em todos os casos o extensômetro piezoresistivo obteve resultados iguais ou superiores ao extensômetro resistivo, evidenciando que, comparativamente, o extensômetro piezoresistivo é mais adequado para a aplicação em questão.
- O ensaio realizado para determinar a repetitividade ± 6 desvios-padrão apurada (sem a influência da variação térmica) do contato elétrico foi de $\pm 0,16\mu\text{m}$, valor esse melhor que o obtido para o extensômetro piezoresistivo;
- Verifica-se que o extensômetro piezoresistivo se apresenta como uma boa alternativa ao contato elétrico, visto que proporciona boa integração entre os subsistemas eletromecânicos do apalpador, baixa sensibilidade a variações térmicas e de umidade do ambiente e repetitividade similar.

-

6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

No decorrer do desenvolvimento da Tese em questão, análise dos ensaios e dificuldades encontradas, foram surgindo novas possibilidades de trabalho para enriquecer e dar continuidade ao que foi realizado até o momento.

Abaixo são elencados algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência da utilização de ganhos acima de 1000 em extensômetros piezoresistivos na sensibilidade térmica e na repetitividade do sistema;
- Avaliar a viabilidade da utilização de conversores A/D de alta resolução como substitutos dos amplificadores operacionais na amplificação dos sinais dos extensômetros piezoresistivos;
- Avaliar a influência da variação da umidade na repetitividade do contato elétrico;
- Estudar metodologias de interpretação do sinal analógico amplificado advindo do extensômetro piezoresistivo para acionamento do sinal de disparo;
- Construir sistemas apalpadores baseados em contato elétrico e em extensômetros piezoresistivos e analisar a repetitividade obtida para cada sistema;
- Avaliar o efeito da dilatação térmica nos apalpadores baseados em contato elétrico e em extensômetros piezoresistivos.

REFERÊNCIAS

- BALTES, H. CMOS as sensor technology. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 37, p. 51-56, 1993.
- BECKWITH, T.G. , et al. **Mechanical measurements**. 5. ed. Califórnia: Addison-Wesley, 1995. 876p.
- BELTRÁN, J. R. **Interface Eletrônica para Sensores de Pressão Piezoresistivos com Tecnologia CMOS para ser utilizada em um sistema de Biotelemetria**. 2003. 88f. Tese - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L.. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, Brasil, 2004. 650p.
- BRAY, A.; VALABREAGA, P. **The strain sensibility of Nicrome Filmes prepared by vaccum deposition**. IMEKO Conference, Stockolm, 1964.
- BRIZEC, J. Impact of MEMS technology on society. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 56, p. 1-9, 1996.
- CHÁVEZ, F. et al. **An architecture for 12 bits resolution, low power consumption and fully integrated CMOS piezoresistive pressure sensors with thermal compensation**. In: IFIP International Conference on VLSI. Book published by Chapman & Hill, 1997.
- COOMBS, C. F. **Printed Circuits Handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, USA, 2001. 1200p.
- CROWDER, R.M. **Automation and Robotics**. 1998. Disponível em: <<http://www.soton.ac.uk/~rmc1/robotics/artactile.htm>>. Acesso em: 28 Nov. 2008.
- DJUGUM, R.; JOLIC, K. I. A fabrication process for vacuumdeposited strain gauges on thermally sprayed Al₂O₃. **Journal Of Micromechanics and Microengineering**, v. 16, p. 457-462, 2006.
- EATON, W. P.; SMITH J. H. Micromachined pressure sensors: review and recent developments. **Smart Materials and Structures**, v. 6, n. 5, p. 530-539, 1997.

- ELWENSPOEK, M.; JANSEN, H. V. **Silicon Micromachining**, 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 420p.
- FRAGA, M. A. **Projeto de um sensor de pressão piezoresistivo em substrato SOI**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- FREESCALE SEMICONDUCTOR(a). **MEMS Technology**. 2007. Disponível em: <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/fact_sheet/MEMSFS.pdf>. Acesso em: 26 Nov. 2007.
- FREESCALE SEMICONDUCTOR(b). **DL200: Sensor Device Data**. 2007. Disponível em: <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_lib/DL200.pdf>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- FREESCALE SEMICONDUCTOR. **AN1325: Amplifiers for Semiconductor Pressure Sensors**. 2005. Disponível em: <www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN1325.pdf>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- GARCIA, V. **Sensor de Pressão Microeletrônico Baseado no Efeito PiezoMOS**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- GEIGER, R. L.; ALLEN, P. L.; STRADER, N. R. **VLSI Design Techniques for Analog and Digital Circuits**. 1. ed. McGraw-Hill, 1990, 969p.
- GIELES, A. Subminiature silicon pressure transducer, **Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. IEEE International**, v. 12, p. 108-109, 1969.
- HABERCAMP, J. A. A. **Desarrollo de un sensor de presión Piezoresistivo con salida digital**. 1993. Tese (Doutorado) – Universitat de Barcelona. Barcelona, 1993.
- HAGEN, R. Choosing the Right Low-Pressure Sensor. **Sensors Magazine Online**. 1998. Disponível em: <<http://archives.sensorsmag.com/articles/0998/low0998/index.htm>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- HANNAH, R. L.; REED, S. E. **Strain Gage Users' Handbook**. 1. ed. Springer, 1992. 496p.

- HBM. **Strain gages and accessories, 2006 edition.** Disponível em: <<http://www.hbm.com>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- HEIDENHAIN GmbH. **Apresentação de sistemas de apalpadores disponíveis para máquinas-ferramenta CNC.** Disponível em: <<http://www.heidenhain.de/presentation/tastsysteme/en/index.html>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- HELFRICK, A. D.; COOPER, W. D. **Modern Electronic Instrumentation and Measurement Techniques.** 1. ed. Prentice Hall, USA, 1989. 863p.
- HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements using Strain Gages.** Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989. 291p.
- HONEYWELL. **Honeywell sensing and control.** Disponível em: <<http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/force/>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- IVCHENKO, V. S.; et al. Strain gauge measurements with vacuum condensate films deposited directly on the measured object. **Strength of Materials**, v. 7, n. 5, p. 614-617, 1975.
- KANDA, Y. Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon, **IEEE Transaction on Electronic Devices**, 29. ed., p. 64-70, 1982.
- KANÉ, C.; et al. A technology for the monolithic fabrication of a pressure sensor and related circuit. **Sensors and Actuators**, v. 46, n. 1, p. 143-146, 1995.
- KIM, K. D.; CHUNG, S. C. Synthesis of the measurement system on the machine tool. **International Journal of Production Research**, V. 19, No. 11, p. 2475-2497, 2001.
- MANDOU, M. J. (2002). **Fundamentals of Microfabrication: the Science of Miniaturization**, 2. ed. CRC Press, 2002. 724p.
- MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **Aplication Note 871: Demystifying Piezoresistive Pressure Sensors.** 2001. Disponível em: <<http://www.maxim-ic.com/an871/>>. Acesso em: 26 Nov. 2007.
- MERIT SENSOR SYSTEMS. Disponível em: <<http://www.merit-sensor.com/>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.

- MIDDELHOEK, S. et al. Silicon Sensors, **Meas. Sci. Technol**, v. 9, p. 1641-1658, 1995.
- MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY. Piezoresistive Pressure and Temperature Sensor Cluster, Ankara, Turkey. Disponível em: <<http://www.microsystems.metu.edu.tr/piezops/piezops.html>>. Acesso em: 23 nov. 2008.
- MIGUEL, P. C.; KING, T.; ABACKERLI, A. A review on methods for probe performance verification, **Measurement**, V. 23, p. 15-33, 1998.
- MODERN MACHINE SHOP ONLINE. CNC **Machine Tool In-Process Inspection**. 2001. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/110105.html>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- MODERN MACHINE SHOP ONLINE. **Probing for Process Improvement. 2000**. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/mtg0005.html>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- OMEGA HANDBOOK SERES. **Transactions in Measurements and Control: Force-Related Measurements**. V.3. Stanford: Putman Publishing Company and OMEGA Press LLC, 1998. 83p.
- REID, C. Performance characteristics of touch trigger probes, **Quality Today**, p. 152-155, 1995.
- REID, C. Probe technology — beyond accuracy. **Proceedings of Applying Imaging and Sensing Technology to CMM Applications**, SME, Nashville, Tennessee, 1993.
- RENÉ, J. R.; JMAYER, J. R.; GHAZZAR, A.; ROSSY, O. 3D characterisation, modelling and compensation of the pre-travel of a knematic touch trigger probe, **Measurement**, V. 19, No.2, p.83-94, 1996.
- RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION. **Technical Literature**. New Mills, Wotton-under-Edge, Gloucestershire, UK. Disponível em: <<http://www.renishaw.com>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- RESNIK, D.; et al. Mechanical stress in thin film microstructures on silicon substrate. **Vacuum**, v. 80, p. 236-240, 2005.

- SEDRA, A. S.; SMITH.; SMITH, S. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2004. 1270p.
- SHEN, Y.; MOON, S. Error compensation of coordinate measurements in computer-integrated manufacturing using neural networks, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 61, p. 12-17, 1996.
- SINGH, R. et al. A Silicon Piezoresistive Pressure Sensor. **Proceedings of IEEE**, p. 181-184, 2002.
- TEKSCAN. **FlexiForce Load/Force Sensors and Systems**. 2006. Disponível em: < <http://www.tekscan.com/flexiforce.html>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- TEXAS INSTRUMENTS. **FET-Input, Low Power Instrumentation Amplifier**. 2000. Disponível em: < <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ina121.html>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- TOOLING & PRODUCTION. **RF technology enhances touch probe**. v. 10, 1999. Disponível em: <<http://toolingandproduction.com/archives/1099/1099rf.asp>>. Acesso em: 26 Nov. 2008.
- TUFTE, O. N.; STETZER, E. L. Piezoresistive properties of silicon diffused layers, **Journal of Applied Physics**, vol. 34, pp. 313-318, 1963.
- YANDAYAN, T.; BURDEKIN, M. In-process dimensional measurement and control of workpiece accuracy, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, V. 37, No. 10, p. 1423-1439, 1997.
- ZHOU, E. P.; HARRISON, D. K.; LINK, D. Effecting in-cycle measurement with pretecic CNC machine tools, **Computers in Industry**, V.28, p. 95-102, 1996.

ANEXO I – CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA ATRAVÉS DE BANHO TERMOSTÁTICO

A calibração do sensor de temperatura em banho termostático foi realizada para faixa de temperatura de 10°C a 50°C. O sistema de banho era composto por uma cuba serpenteada por um aquecedor elétrico. Inicialmente foi inserido gelo e água na cuba de forma a se obter água a 0°C. Em seguida o aquecedor controlado por termostato foi ligado e a temperatura foi incrementada de 1 em 1°C até atingir 50°C. Um conjunto de termômetros analógicos de precisão calibrados foi utilizado para verificar a temperatura do banho. A cada incremento de 1°C e estabilização da medida do termômetro o valor da temperatura e o correspondente valor de tensão na saída analógica do sensor de temperatura era anotado.

Abaixo, FIGURA I.1, é apresentada a banda de testes montada para a realização da calibração.

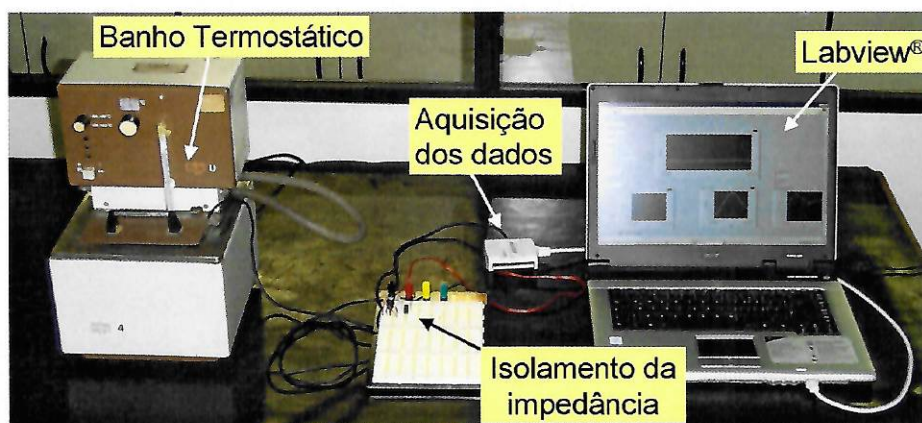


FIGURA I.1 – Bancada de calibração do sensor de temperatura.

O resultado da calibração Temperatura(°C) x Tensão(milivolts), bem como o polinômio de terceiro grau que melhor representa a curva é apresentado a seguir, FIGURA I.2.

Calibração do Sensor de Temperatura

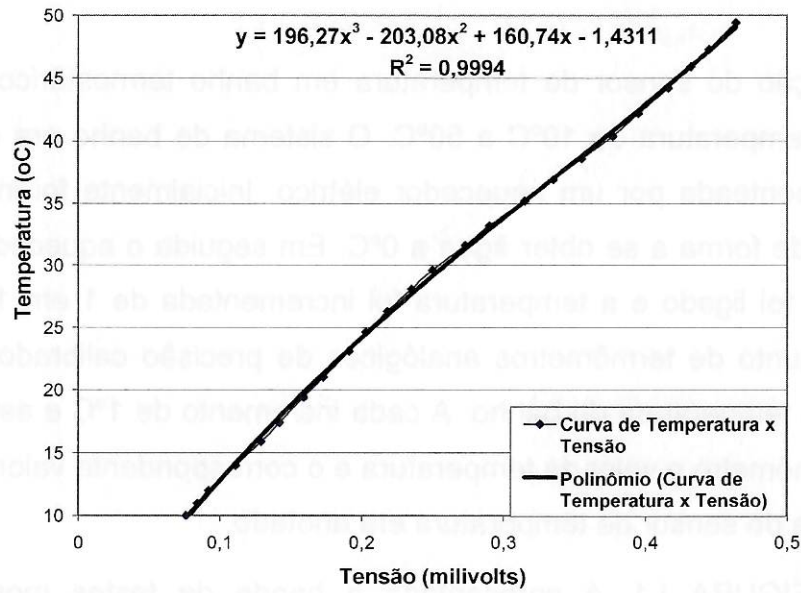


FIGURA I.2 – Resultado da calibração do sensor de temperatura



FIGURA I.1 – Banco de dados de calibração do sensor de temperatura

O resultado da calibração (Temperatura (oC) x Tensão (milivolts)) é apresentado a seguir, juntamente com a curva de calibração que melhor representa os dados experimentais.

FIGURA I.2

ANEXO II – USINAGEM DE VIGA EM BALANÇO, SUPORTE E PINO GUIA E COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS

Usinagem das Vigas em Balanço e Colagem dos Extensômetros

Para a fabricação das vigas em balanço para experimentação com extensômetros, foram utilizadas as mesmas especificações de projeto utilizadas nas simulações em elementos finitos, detalhadas nos itens 4.2, Planejamento dos Experimentos. As vigas foram usinadas partindo-se de um bloco de Aço Mola AISI-9255. Para a usinagem, foi utilizado um centro de usinagem CNC HERMLE modelo C800U.

O perfil da viga e os alívios laterais para concentração de tensão na região de posicionamento dos extensômetros foram usinados com fresa de 3mm de diâmetro com quatro facas de corte.

Após a usinagem das vigas, foi feita a preparação das superfícies onde os extensômetros seriam aplicados. A preparação foi feita através das seguintes etapas:

- Eliminação de irregularidades da superfície por abrasão com lixa granulação 300;
- Limpeza da superfície através da aplicação de solvente;
- Marcação do ponto de aplicação do extensômetro;
- Colagem do extensômetro.

Após a colagem dos extensômetros, os fios envoltos por cabo blindado foram devidamente soldados e fixados nas vigas.

A seguir, FIGURA II.1, encontra-se o resultado final da preparação das vigas para ensaio.



FIGURA II.1 – Vigas em balanço com extensômetros colados.

Em ambos os casos, os extensômetros foram ligados em meia ponte visando à diminuição do efeito da temperatura sobre os sistemas. Isso foi feito através da colagem de dois extensômetros. O primeiro, na direção da deformação e o segundo, colado a 90 graus com relação ao primeiro.

Usinagem do Suporte de Extensômetros

O projeto do suporte foi realizado de forma a promover a fixação da viga à mesa do Centro de Usinagem Mori Seiki. Inicialmente o suporte é fixado à mesa da máquina por meio de um parafuso Métrico de 12mm (M-12). A viga deve ser então inserida no suporte e fixada por meio dos dois parafusos (M-5) posteriores. O suporte foi usinado partindo-se de um bloco de Aço 1020. Para a usinagem, também se utilizou um centro de usinagem CNC HERMLE modelo C800U.

Abaixo, FIGURA II.2, encontra-se o suporte usinado sobre o qual é fixada a viga que contém os extensômetros.

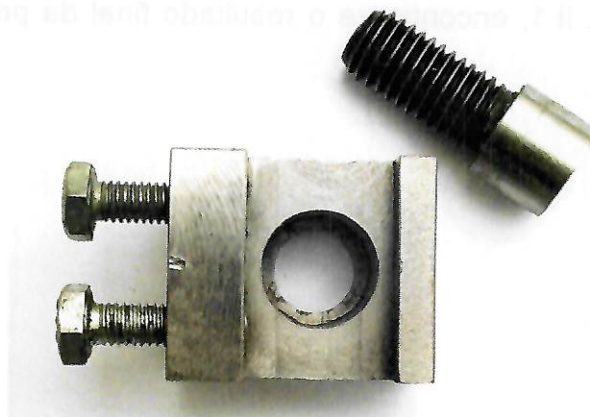


FIGURA II.2 – Suporte das vigas em balanço

Usinagem do Pino Guia

Um pino guia de aço rápido acabando em uma superfície plana retificada e polida foi usinado e fixado em cone HSK E32, FIGURA I.3.



FIGURA II.3- Pino retificado fixado em cone HSH E32

ANEXO III – PROGRAMAÇÃO C PARA O MICROCONTROLADOR

```

#include <16f877a.h>
#define device adc=10
#define device *=16
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define use delay(clock=4000000)
#define fuses NOWDT,XT, PUT, NODEBUG, NOPROTECT, BROWNOUT, NOLVP, NOCPD, NOWRT
#define use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)

#define N 30
#define DISPERS_MIN 2
#define LIM_TRIGGER 60
#define TRIGGER_PIN_D2
#define UPDATED_PIN_D1

int16 offset, valor, buffer_est[N], lim_inf, lim_sup, dispersao, contador_buffer=0,
contador_offset=0, g=0;
signed int16 temp;
int8 i;

char s_saida[20], s_offset[5], s_sinal[5], s_it[10];

void main()
{
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_1);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_8);
    setup_timer_2(T2_DISABLED, 0, 1);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
    setup_psp(PSP_DISABLED);

    setup_adc_ports(AN0);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
    set_adc_channel(0);

    //Atualização preliminar do Offset
    for (i=0; i<N; i++){
        buffer_est[i] = 0;
        offset += Read_ADC();
        delay_ms(150);
    }
    offset = offset/N;
    sprintf(s_offset, "%lu", offset);

    while(1){

        contador_buffer++;
        contador_offset++;
        sprintf(s_it, "%lu-%lu", contador_offset, contador_buffer);

        if (contador_buffer == 200){

            contador_buffer = 0;

            //Achar desvio padrão
            for (i=0; i<g; i++){
                temp = (buffer_est[i] - offset);
                dispersao += ( temp*temp );
            }
            dispersao = sqrt(dispersao/g);

            if (dispersao < DISPERS_MIN)
                dispersao = DISPERS_MIN;

            //Calcula o Limite Inferior
            temp = (offset-3*dispersao);
            if ( temp < 0 )
                lim_inf = 0;
            else

```

```
        lim_inf = temp;

//Calcula o Limite Superior
temp = (offset+3*dispersao);
if ( temp > 1023 )
    lim_sup = 1023;
else
    lim_sup = temp;

//Ler o valor instantâneo
valor = Read_ADC();
delay_us(30);

//Verificar se o valor está dentro da faixa tolerante para entrar no buffer
if ( (valor<lim_sup) && (valor>lim_inf) ){

    if (g<N)
        g++;

    //Permutação do vetor de buffer
    for (i=(N-1); i>0; i--)
        buffer_est[i] = buffer_est[i-1];

    //Armazena valor no buffer
    buffer_est[0] = valor;
}

}

//calcula o *sinal*
valor = Read_ADC();
delay_us(30);
sprintf(s_saida, "%lu", valor);

temp = (valor-offset);
valor = abs(temp);
sprintf(s_sinal, "@%lu", valor);

//Concatena e impime todas as strings
strcat(s_saida, s_sinal);
strcat(s_saida, s_offset);
strcat(s_saida, s_it);
printf("%s \n", s_saida);
delay_ms(60);

//determinar saída do trigger
if (valor > LIM_TRIGGER){
    output_high(TRIGGER);
    delay_ms(100);
    output_low(TRIGGER);
}
else
    output_low(TRIGGER);

if ( (contador_offset == 60000) && (g>0) ){

    contador_offset = 0;

    //Atualizar Offset
    for (i=0, offset=0; i<g; i++)
        offset += buffer_est[i];

    offset = (offset/g);
    sprintf(s_offset, "@%lu", offset);

    //Pisca Led para indicar que o offset foi atualizado
    output_high(UPDATED);
    delay_ms(200);
    output_low(UPDATED);
    delay_ms(200);
}
}
}
```

ANEXO IV – DADOS DE REPETITIVIDADE DOS EXTENSÔMETROS

Extensômetros Resistivos

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
0,14	0,002	0,0094808
0,15	0,006429101	0,030476508
0,16	0,010148892	0,046105906
0,17	0,004438468	0,021040115
0,18	0,00572796	0,027152821
0,19	0,004059087	0,019241698
0,2	0,002160247	0,010240434
0,21	0,003535534	0,016759845
0,31	0,017056279	0,080653587
0,32	0,010016653	0,047482941
0,33	0,011467345	0,054359802
0,34	0,009302031	0,044095347
0,35	0,006775711	0,032119579
0,36	0,005439728	0,025786488
0,37	0,005335026	0,025290156
0,38	0,005717142	0,027101541
0,39	0,007635444	0,036195057
0,4	0,011922368	0,056516793
0,41	0,009110434	0,043187099
0,42	0,024748737	0,117318914
0,43	0,017745892	0,084122624
0,44	0,005658854	0,026615752
0,45	0,022233608	0,105396196
0,46	0,017198637	0,081529368
0,47	0,012020815	0,056983473
0,49	0,015944845	0,075584945
0,5	0,000707107	0,003351969
0,51	0,024171264	0,11458146
0,52	0,008962086	0,042487667
0,53	0,005167204	0,024494615
0,54	0,010571187	0,050111656
0,55	0,010148892	0,046105906
0,56	0,013511239	0,064048676
0,57	0,006648306	0,03151564
0,58	0,002228602	0,010564465
0,59	0,007626707	0,036153644
0,6	0,00941662	0,044638544
0,62	0,011413495	0,054104529
0,63	0,00522494	0,024768306
0,64	0,00212132	0,010055907
0,65	0,014571662	0,069075507
0,67	0,000707107	0,003351969
0,69	0,013650397	0,064706341
0,71	0,012909944	0,061198301
0,72	0,00969536	0,045959883
0,73	0,008544004	0,040501995
0,74	0,00212132	0,010055907
0,75	0,007467708	0,035399924
0,76	0,005349677	0,02535961
0,77	0,007730684	0,036646584
0,78	0,007927123	0,037577736
0,79	0,006227181	0,029519327
0,8	0,006585337	0,031217133
0,81	0,004112988	0,019497206
0,82	0,011470978	0,054377024
0,83	0,00212132	0,010055907
0,83	0,007094598	0,033631237
0,84	0,00869536	0,045959883
0,85	0,009812954	0,046991369
0,86	0,01100303	0,052158763
0,87	0,007304523	0,034626362
0,88	0,006723085	0,031870157
0,89	0,007536577	0,035726392
0,9	0,005564498	0,026377946
1,01	0,005354126	0,0253807
1,03	0,010700467	0,050724495
1,04	0,005319774	0,025217859
1,05	0,020506097	0,097207101
1,12	0,00212132	0,010055907
1,14	0,005385165	0,025527835
1,15	0,005033223	0,02385949
1,16	0,00643126	0,030486747
1,17	0,007017834	0,033267342
1,18	0,005736746	0,027194471
1,19	0,006806859	0,032267236
1,2	0,005940988	0,028162706
1,21	0,01029563	0,048805405
1,22	0,010016653	0,047482941
1,23	0,015625833	0,0740727
1,24	0,016206994	0,076827636
1,32	0,007778175	0,036871659
1,33	0,014105736	0,056871571
1,34	0,001414214	0,006703938
1,35	0,012727922	0,060339442
1,36	0,006286407	0,029705276
1,37	0,007416198	0,036155747
1,38	0,006277795	0,029759261
1,39	0,005198619	0,024643534
1,4	0,007979139	0,037824313
1,41	0,011210114	0,053140427
1,42	0,010551461	0,050018147
1,43	0,014190372	0,067268041
1,44	0,002828427	0,013407876
1,53	0,013722245	0,065046829
1,54	0,006218253	0,029477005
1,55	0,00212132	0,010055907
1,56	0,007409528	0,035124125
1,57	0,00594944	0,026202724
1,58	0,00506442	0,024007377
1,59	0,006348228	0,03009314

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
1,6	0,011338934	0,053751084
1,61	0,007259477	0,034412823
1,62	0,000707107	0,003351969
1,72	0,007371115	0,034942033
1,73	0,015396052	0,072992925
1,74	0,011054411	0,052402329
1,75	0,009070014	0,042995494
1,76	0,006134482	0,029079898
1,77	0,006023239	0,028552564
1,78	0,007395945	0,035059737
1,79	0,0065	0,0308126
1,8	0,003114482	0,014763892
1,81	0,014849242	0,070391349
1,82	0,004949747	0,023463783
1,88	0,002081666	0,00966793
1,89	0,003535534	0,016759845
1,9	0,008346656	0,039566488
1,92	0,019091883	0,090503163
1,93	0,007071068	0,03351969
1,94	0,007405355	0,035104346
1,95	0,006584278	0,031117303
1,96	0,008012774	0,037983753
1,97	0,008934328	0,04235229
1,98	0,010781483	0,051013736
1,99	0,013998299	0,066357538
2	0,017578396	0,083328628
2,01	0,007778175	0,036871659
2,11	0,006018644	0,028521297
2,12	0,007788881	0,036922411
2,13	0,006244898	0,029603769
2,14	0,009155448	0,043040084
2,15	0,009629682	0,045648543
2,16	0,00774401	0,036709707
2,17	0,00683325	0,031444256
2,18	0,012744046	0,060411877
2,19	0,002081666	0,00966793
2,2	0,015098669	0,07157847
2,3	0,006291529	0,029824363
2,31	0,004159327	0,019716873
2,32	0,006378964	0,030238839
2,33	0,007111745	0,033712518
2,34	0,010767013	0,051039849
2,35	0,010089048	0,047826123
2,36	0,014541894	0,068934392
2,37	0,01621933	0,076886112
2,38	0,006889806	0,032659487
2,47	0,016258331	0,077070993
2,48	0,005468089	0,02592093
2,49	0,00499166	0,023682464
2,5	0,008564137	0,040597436
2,51	0,011520031	0,054609554
2,52	0,007272614	0,034475098
2,53	0,010539105	0,049959572
2,54	0,003522884	0,016699881
2,55	0,017435598	0,082651698
2,56	0,012486183	0,059189501
2,57	0,002886751	0,013684356
2,66	0,01652019	0,078312307
2,67	0,019939492	0,094521167
2,68	0,012617448	0,059811752
2,69	0,004969909	0,023559359
2,7	0,013886659	0,065828316
2,71	0,010634421	0,050411409
2,72	0,008795517	0,041694267
2,73	0,008845903	0,041933119
2,74	0,005115336	0,024248741
2,75	0,013217413	0,062655823
2,76	0,017310883	0,082060509
2,77	0,007852813	0,037225473
2,78	0,0025	0,011851
2,79	0,005033223	0,02385949
2,8	0,003535534	0,016759845
2,81	0,013435029	0,063687411
2,87	0,007745967	0,036718981
2,88	0,005658854	0,026815752
2,89	0,005455884	0,025863071
2,9	0,008953584	0,04244357
2,91	0,007382412	0,034995584
2,92	0,011146748	0,052840046
2,93	0,011729085	0,059600553
2,94	0,010511898	0,049830601
2,95	0,007228416	0,034265584
2,96	0,007211103	0,034183511
2,97	0,013030733	0,061770886
2,98	0,004764452	0,022585407
2,99	0,014788649	0,070151514
3,07	0,014849242	0,070391349
3,09	0,011084094	0,05254304
3,1	0,004179314	0,019811621
3,11	0,011334734	0,053731172
3,12	0,007694876	0,036476788
3,13	0,010225784	0,048474308
3,14	0,013538833	0,064179484
3,15	0,007336086	0,03477599
3,16	0,010829853	0,051337835
3,17	0,013758634	0,065221427
3,18	0,004163332	0,019735859
3,19	0,013257702	0,062846811
3,2	0,00683325	0,031444256
3,3	0,003464102	0,016421227

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
3,31	0,004956958	0,023497952
3,32	0,007131237	0,033804917
3,33	0,016489535	0,078166991
3,34	0,008989579	0,042661605
3,35	0,005635924	0,026716533
3,36	0,014250313	0,067552185
3,37	0,004645787	0,022022887
3,38	0,016379866	0,077647115
3,46	0,007094599	0,033631237
3,47	0,017606817	0,083463355
3,48	0,019347696	0,091715817
3,49	0,000707107	0,003351969
3,5	0,012345039	0,058520425
3,51	0,012140383	0,05755027
3,52	0,01003992	0,047593238
3,53	0,007292067	0,034567315
3,54	0,007655064	0,036288064
3,55	0,007801099	0,036980329
3,56	0,007704977	0,036524672
3,57	0,01652019	0,078312307
3,58	0,005866854	0,026815752
3,67	0,013961256	0,066181938
3,68	0,012054045	0,057140995
3,69	0,009597453	0,045495768
3,7	0,012460848	0,059069403
3,71	0,005444525	0,025809228
3,72	0,012393547	0,058750369
3,73	0,01022035	0,048448547
3,74	0,007305249	0,034629804
3,75	0,010589498	0,050103648
3,76	0,01274101	0,060397483
3,77	0,014906374	0,070662178
3,86	0,019091883	0,090503163
3,87	0,019655364	0,093174287
3,88	0,016970563	0,080447256
3,89	0,011434597	0,054204562
3,9	0,005294096	0,025096142
3,91	0,009920194	0,047025689
3,92	0,007606649	0,03605856
3,93	0,010397649	0,049289017
3,94	0,011937336	0,056587749
3,95	0,014926487	0,070757517
3,96	0,016340135	0,077458774
3,98	0,007778175	0,036871659
4,06	0,002880972	0,01365696
4,07	0,01276594	0,060515187
4,08	0,008100558	0,036399887
4,09	0,005707639	0,031796893
4,1	0,015323185	0,072638026
4,11	0,012649111	0,059961844
4,12	0,005830275	0,026689757
4,13	0,011116269	0,05269556
4,14	0,015614096	0,074017062
4,15	0,001154701	0,005473742
4,16	0,007371115	0,034942033
4,19	0,007071068	0,03351969
4,23	0,005033223	0,02385949
4,24	0,010131401	0,048039692
4,25	0,012909844	0,061198301
4,26	0,014549914	0,068972413
4,27	0,004413184	0,020920256
4,28	0,018449056	0,077975103
4,29	0,01134981	0,053802638
4,3	0,009643258	0,0457129
4,31	0,005376315	0,025485883
4,32	0,007549834	0,035789235
4,33	0,013051181	0,06186782
4,34	0,004325897	0,020553895
4,35	0,004618602	0,02189497
4,36	0,00499166	0,023662464
4,38	0,02192031	0,103911039
4,42	0,004764452	0,022585407
4,43	0,008082763	0,028834727
4,44	0,012106308	0,057398221
4,45	0,003664502	0,017371203
4,46	0,017745892	0,084122824
4,47	0,013585532	0,084400854
4,48	0,01117315	0,052965201
4,49	0,014322186	0,067892889
4,5	0,009927486	0,042319853
4,51	0,00427785	0,02027872
4,52	0,002866751	0,013684356
4,53	0,002866751	0,013684356
4,55	0,005131601	0,024325943
4,56	0,002826427	0,013407876
4,59	0,002826427	0,013407876
4,61	0,001	0,0047404
4,62	0,003535534	0,016759845
4,64	0,014445299	0,068476496
4,85	0,013735599	0,065112231
4,86	0,005385165	0,025527835
4,87	0,012552435	0,059503565
4,88	0,011868982	0,056263721
4,89	0,013300555	0,063049951
4,7	0,010782702	0,051114321
4,71	0,004020779	0,019060102
4,72	0,002	0,0094808
4,73	0,004147288	0,019659805
4,74	0,007588368	0,035971901
4,82	0,006708204	0,03179957

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
4,83	0,005205766	0,024677413
4,84	0,002607681	0,012361451
4,85	0,012872451	0,061020568
4,86	0,003545621	0,016807662
4,87	0,000707107	0,003351969
4,88	0,021702534	0,102878694
4,89	0,013740451	0,065135235
4,9	0,014179798	0,067217914
4,91	0,010796604	0,051180224
4,92	0,006250333	0,02962908
4,93	0,003781534	0,017925984
4,94	0,011373947	0,053917058
4,95	0,004041452	0,019158099
4,97	0,005507571	0,026108087
4,98	0,001414214	0,006703938
5,04	0,006075909	0,028602236
5,05	0,00057735	0,002736871
5,06	0,014952703	0,070881794
5,07	0,01552149	0,073578073
5,08	0,00551362	0,026136762
5,09	0,010288129	0,048769844
5,1	0,006071008	0,028779006
5,11	0,011058287	0,052420704
5,12	0,011987493	0,056825514
5,13	0,007146428	0,033878926
5,16	0,004645787	0,022022887
5,2	0,014142136	0,06703938
5,23	0,007694154	0,036473366
5,24	0,014571662	0,069075507
5,25	0,009841603	0,046653133
5,26	0,006033241	0,028599977
5,27	0,012810586	0,060727301
5,28	0,009304377	0,044106468
5,29	0,014802027	0,070167526
5,3	0,007823043	0,037084352
5,31	0,016097915	0,076310555
5,32	0,007745867	0,036718981
5,33	0,008430105	0,039962069
5,34	0,003765939	0,017946865
5,35	0,006244998	0,029603789
5,41	0,004242641	0,020111814
5,42	0,002516611	0,011929745
5,44	0,006733003	0,031917129
5,45	0,010073539	0,047752605
5,46	0,010943034	0,05167436
5,47	0,013837492	0,065595248
5,48	0,007685484	0,036432269
5,49	0,010570112	0,05010656
5,5	0,01275875	0,060481581
5,51	0,01367845	0,064841325
5,52	0,005540758	0,02626541
5,53	0,014842507	0,070359418
5,61	0,009192388	0,043575597
5,62	0,001414214	0,006703938
5,63	0,001732051	0,008210614
5,64	0,014380874	0,068171093
5,65	0,005854723	0,027753727
5,66	0,013315406	0,063120344
5,67	0,012409674	0,058626917
5,68	0,01378273	0,065335652
5,69	0,007369386	0,037778077
5,7	0,009985704	0,047336232
5,71	0,013645512	0,064683185
5,72	0,012656794	0,059988268
5,8	0,007778175	0,036871659
5,83	0,008408329	0,039658844
5,84	0,01146153	0,054332236
5,85	0,009856108	0,046721892
5,86	0,011877404	0,056303646
5,87	0,011344602	0,053777952
5,88	0,012105882	0,057386723
5,89	0,0137659	0,065255872
5,9	0,00875051	0,041480919
5,91	0,021221059	0,100596307
5,92	0,014910846	0,070683375
5,93	0,009899495	0,046827586
6,01	0,001414214	0,006703938
6,02	0,014192553	0,06727838
6,03	0,010111874	0,047934328
6,04	0,007395945	0,035059737
6,05	0,00868073	0,045937939
6,06	0,010350983	0,049067802
6,07	0,015036622	0,071279603
6,08	0,016970563	0,080447256
6,09	0,01636154	0,077560245
6,1	0,005597619	0,026534951
6,11	0,003316625	0,015722128
6,12	0,001290994	0,00611983
6,14	0,005507571	0,026108087
6,18	0,012020815	0,056983473
6,2	0,006806859	0,032267236
6,21	0,002081666	0,00986793
6,22	0,011930353	0,05854647
6,23	0,002966479	0,014062299
6,24	0,008082904	0,038316197
6,25	0,012023786	0,056997555
6,26	0,016820127	0,079734129
6,27	0,010016303	0,04746128
6,28	0,011287635	0,053507907
6,29	0,01602662	0,075982071

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
6,3	0,012845233	0,060891541
6,31	0,019157244	0,090813
6,32	0,01566312	0,074249455
6,33	0,007071068	0,03351969
6,41	0,012568016	0,059567943
6,42	0,001095445	0,005192848
6,43	0,009587652	0,045449307
6,44	0,013993196	0,066333345
6,45	0,009433392	0,044718053
6,46	0,008914406	0,042257859
6,47	0,00308671	0,014632239
6,48	0,00340343	0,016133618
6,49	0,005477226	0,02598424
6,5	0,010329569	0,04885629
6,58	0,002290351	0,010809775
6,59	0,004258443	0,020191465
6,6	0,004179314	0,019811621
6,61	0,009588767	0,045454589
6,62	0,014192721	0,067279175
6,63	0,01266228	0,060024272
6,64	0,009738546	0,046164605
6,65	0,008560893	0,040582057
6,66	0,013221555	0,062675461
6,67	0,00372827	0,017673493
6,7	0,005656854	0,026815752
6,78	0,003366502	0,015958564
6,79	0,00988327	0,047348663
6,8	0,00958471	0,04543536
6,81	0,000707107	0,003351969
6,82	0,009221051	0,043711469
6,83	0,014158961	0,067119141
6,84	0,014881756	0,070545477
6,85	0,014222718	0,067421374
6,86	0,016772894	0,079510702
6,87	0,003147183	0,014918907
6,88	0,012942179	0,061351106
6,89	0,003435113	0,016283809
6,9	0,003361547	0,015935079
6,91	0,001414214	0,006703938
6,98	0,004082483	0,019352602
6,99	0,00781025	0,037023708
7	0,003605551	0,017091755
7,01	0,002828427	0,013407876
7,02	0,005029811	0,023843788
7,03	0,012536613	0,05942856
7,04	0,008889423	0,042044613
7,05	0,010693975	0,050693721
7,06	0,012241777	0,058030921
7,07	0,013278546	0,062936137
7,08	0,004159327	0,019716873
7,09	0,012617448	0,059811752
7,1	0,005795113	0,027471153
7,13	0,004242641	0,020111814
7,15	0,001414214	0,006703938
7,16	0,01767767	0,083799225
7,18	0,009073772	0,043013307
7,2	0,004082483	0,019352602
7,21	0,00977241	0,046325133
7,22	0,005902011	0,024138167
7,23	0,009380832	0,044468894
7,24	0,01253322	0,059507284
7,25	0,011025611	0,052265807
7,26	0,009016651	0,042742534
7,27	0,004434712	0,021022307
7,28	0,017672955	0,083776875
7,29	0,007961903	0,037268566
7,3	0,011584233	0,054913896
7,32	0,004163332	0,019735859
7,34	0,006363961	0,030167721
7,41	0,009460444	0,044846289
7,42	0,008020806	0,03802183
7,43	0,006036923	0,028617432
7,44	0,005522681	0,026179715
7,45	0,009253056	0,043863187
7,46	0,012790622	0,060632662
7,47	0,009011721	0,042719161
7,48	0,003774917	0,017894618
7,49	0,003535534	0,016759845
7,5	0,005259911	0,024934083
7,51	0,004949747	0,023463783
7,6	0,009073772	0,043013307
7,61	0,009417773	0,04464401
7,62	0,008518607	0,040381605
7,63	0,013187782	0,06251536
7,64	0,010991255	0,052102946
7,65	0,010670265	0,050581322
7,66	0,009632534	0,045662065
7,67	0,013266499	0,062888513
7,68	0,004242641	0,020111814
7,69	0,009192388	0,043575597
7,79	0,015885003	0,07530127
7,8	0,009481812	0,044947582
7,81	0,010908712	0,051711659
7,82	0,009699043	0,045977342
7,83	0,008450486	0,040059864
7,84	0,01247877	0,059154361
7,85	0,016122793	0,076428487
7,86	0,006954194	0,033013066
7,87	0,003847077	0,018236883
7,88	0,015556349	0,073743318

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
7,89	0,004949747	0,023463783
7,95	0,001414214	0,006703938
7,98	0,01307351	0,061973667
7,99	0,011367107	0,053884632
8	0,002682246	0,01271492
8,01	0,008705043	0,041265387
8,02	0,008801515	0,041722702
8,03	0,013063461	0,061926127
8,04	0,011357817	0,053840594
8,05	0,013352367	0,063295562
8,06	0,003535534	0,016759845
8,07	0,004308906	0,020425936
8,08	0,00321455	0,015238254
8,09	0,004932883	0,023363838
8,17	0,006806889	0,032267236
8,18	0,002915476	0,013820522
8,19	0,011343133	0,053770988
8,2	0,005338539	0,025306811
8,21	0,011333333	0,053724533
8,22	0,010816304	0,051273606
8,23	0,018119051	0,085891548
8,24	0,00915302	0,043388977
8,25	0,009362455	0,04438178
8,26	0,016733201	0,079322064
8,27	0,000707107	0,003351969
8,28	0,020033306	0,094965882
8,36	0,004949747	0,023463783
8,37	0,02192031	0,103911039
8,38	0,004932883	0,023363838
8,39	0,007328028	0,034737786
8,4	0,008964191	0,042493852
8,41	0,005783597	0,027416566
8,42	0,012710373	0,06025225
8,43	0,009757618	0,046255013
8,44	0,005567764	0,02639343
8,45	0,015833509	0,075057165
8,46	0,02055075	0,097418776
8,55	0,009380832	0,044468894
8,56	0,00499166	0,023662464
8,57	0,009273618	0,043860661
8,58	0,012283273	0,058227626
8,59	0,013570802	0,06433103
8,6	0,008866889	0,042031655
8,61	0,014442002	0,069460867
8,62	0,003593976	0,017036886
8,63	0,013051181	0,06186782
8,64	0,004618802	0,02189497
8,66	0,007190271	0,034084762
8,67	0,002826427	0,013407876
8,72	0,004242641	0,020111814
8,74	0,002986079	0,014155208
8,75	0,013682105	0,064858651
8,76	0,001290894	0,00611983
8,77	0,014340253	0,067978535
8,78	0,008514693	0,040363052
8,79	0,012122392	0,057464986
8,8	0,008831761	0,041866079
8,81	0,014667749	0,068530997
8,82	0,012441291	0,058976894
8,83	0,011324226	0,053681361
8,84	0,001290894	0,00611983
8,85	0,003847077	0,018236883
8,87	0,005131601	0,024325843
8,94	0,006082763	0,028834727
8,95	0,001414214	0,006703938
8,96	0,001732051	0,008210614
8,97	0,011588788	0,054835489
8,98	0,004298394	0,020376107
8,99	0,013490738	0,063951492
9	0,010178409	0,048249728
9,01	0,007331439	0,034753954
9,02	0,011840608	0,056129219
9,03	0,004505552	0,021358119
9,04	0,015884387	0,074350269
9,05	0,010904346	0,051690962
9,07	0,003593976	0,017036886
9,14	0,01260952	0,05977417
9,15	0,007362065	0,034899133
9,16	0,005686241	0,026955055
9,17	0,016443844	0,077950397
9,18	0,011842719	0,056139226
9,19	0,006911343	0,032762532
9,2	0,012366622	0,058622734
9,21	0,005276295	0,025011747
9,22	0,008712061	0,041298652
9,23	0,00958442	0,045433986
9,24	0,013496031	0,063976586
9,25	0,005785038	0,027423395
9,26	0,003605551	0,017091755
9,27	0,018289056	0,077216639
9,28	0,014047538	0,066590951
9,24	0,009899495	0,046927566
9,35	0,016398679	0,077736297
9,36	0,009141315	0,04333489
9,37	0,012324965	0,058425264
9,38	0,005909033	0,028011178
9,39	0,009068522	0,042988423
9,4	0,010253919	0,048607678
9,41	0,007348469	0,034834684
9,42	0,006064468	0,028748006

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
9,43	0,010526158	0,049898199
9,44	0,009912114	0,046987384
9,45	0,000707107	0,003351969
9,46	0,011676187	0,055349795
9,49	0,004242641	0,020111814
9,53	0,001414214	0,006703938
9,55	0,005419102	0,025688711
9,56	0,001154701	0,005473742
9,57	0,009071147	0,043000867
9,58	0,009913015	0,046991654
9,59	0,011647603	0,0552143
9,6	0,006437736	0,030517444
9,61	0,008485281	0,040223628
9,62	0,008791229	0,041673944
9,63	0,003670993	0,017401976
9,64	0,010645813	0,050465412
9,65	0,012973049	0,061497441
9,66	0,014525839	0,068858287
9,74	0,004949747	0,023463783
9,75	0,017785762	0,084311627
9,76	0,014028542	0,066500902
9,77	0,010954451	0,05192848
9,78	0,012054045	0,057140995
9,79	0,008768055	0,041564088
9,8	0,007512952	0,035814397
9,81	0,010185774	0,048284645
9,82	0,011296017	0,053547639
9,83	0,008538429	0,040475567
9,84	0,010571976	0,050115393
9,85	0,013023056	0,061734497
9,86	0,001414214	0,006703938
9,93	0,000707107	0,003351969
9,94	0,015716234	0,074501234
9,95	0,005656854	0,026815752
9,96	0,009483068	0,044553534
9,97	0,004740906	0,022473791
9,96	0,011498275	0,054511185
9,99	0,009995237	0,047381421
10	0,005618846	0,026635577
10,01	0,009315459	0,044159002
10,02	0,01090317	0,051685388
10,03	0,005656854	0,026815752
10,13	0,00212132	0,010055907
10,14	0,003535534	0,016759845
10,15	0,006514041	0,040359958
10,16	0,011264083	0,053396165
10,17	0,007035624	0,03335167
10,18	0,016507574	0,079252504
10,19	0,01286468	0,060983731
10,2	0,008154196	0,03865415
10,21	0,006016644	0,028521297
10,22	0,015215124	0,072125774
10,23	0,006995453	0,031265089
10,3	0,006363961	0,030167721
10,32	0,009192388	0,043675597
10,33	0,009824855	0,046573743
10,34	0,013874437	0,065770381
10,35	0,008686194	0,045925917
10,36	0,007860086	0,037259952
10,37	0,005950895	0,045322487
10,38	0,011013628	0,052209002
10,39	0,010686867	0,050564267
10,4	0,013133926	0,062260061
10,41	0,01274101	0,060397483
10,42	0,008994995	0,046927566
10,47	0,010606602	0,050279535
10,49	0,005656854	0,026815752
10,51	0,002519611	0,011929745
10,52	0,011792653	0,055801893
10,53	0,010264827	0,048659384
10,54	0,012336711	0,058480946
10,55	0,009407444	0,044595047
10,56	0,011385036	0,053969625
10,57	0,008996598	0,033166672
10,58	0,001527525	0,007241081
10,59	0,011951539	0,058655076
10,6	0,004366539	0,020699144
10,61	0,004854747	0,022085361
10,62	0,009643651	0,045714762
10,68	0,00212132	0,010055907
10,69	0,007071088	0,03351969
10,7	0,007937254	0,037625759
10,71	0,003201562	0,015176885
10,72	0,002136976	0,010130121
10,73	0,007131419	0,033805781
10,74	0,014071247	0,066703341
10,75	0,011305287	0,053581585
10,76	0,013785681	0,065349547
10,77	0,01260952	0,05977417
10,78	0,011502174	0,05424904
10,79	0,004929503	0,023367816
10,8	0,002035401	0,009648615
10,81	0,014106736	0,066871571
10,82	0,005033223	0,023895949
10,83	0,007211103	0,034189511
10,84	0,008020806	0,03802183
10,9	0,004573474	0,021680097
10,91	0,006363961	0,030167721
10,92	0,005272571	0,024994093
10,93	0,002868751	0,013684356

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
10,94	0,010329569	0,04886629
10,95	0,0065	0,0308126
10,96	0,012006942	0,05691771
10,97	0,012022664	0,056992235
10,98	0,008542959	0,040497041
10,99	0,013575714	0,064354313
11	0,019347696	0,091715817
11,01	0,013788079	0,065361008
11,02	0,003785939	0,017948865
11,04	0,002828427	0,013407876
11,05	0,0101653	0,04818759
11,07	0,005656854	0,026815752
11,09	0,013203535	0,062590037
11,11	0,003535534	0,016759845
11,12	0,006418723	0,030427313
11,13	0,001527525	0,007241081
11,14	0,013141537	0,062296143
11,15	0,01263263	0,059883718
11,16	0,005617433	0,02662888
11,17	0,0075	0,035553
11,18	0,009276014	0,043972019
11,19	0,013674794	0,064823995
11,2	0,006238322	0,029572144
11,21	0,011444067	0,054249455
11,22	0,010532489	0,049828213
11,23	0,001290994	0,00611983
11,25	0,010115994	0,047953858
11,26	0,012727922	0,060335442
11,32	0,006363961	0,030167721
11,33	0,002966479	0,014062299
11,34	0,000707107	0,003351969
11,35	0,012893335	0,061119567
11,36	0,007820718	0,037073334
11,37	0,006318906	0,028954141
11,38	0,009811867	0,046512173
11,39	0,009521905	0,045137636
11,4	0,00438178	0,020771392
11,41	0,014943226	0,070636668
11,42	0,00910782	0,043174709
11,51	0,00212132	0,010055907
11,52	0,007416198	0,035155747
11,53	0,016663333	0,076990864
11,54	0,003114482	0,014763692
11,55	0,004062483	0,019352602
11,56	0,011589723	0,054987326
11,57	0,010551461	0,050018147
11,58	0,006863753	0,032536937
11,59	0,00855236	0,040541606
11,6	0,010888693	0,051616761
11,61	0,003625308	0,017185409
11,62	0,004949747	0,023463783
11,63	0,011766291	0,055871736
11,64	0,0119697716	0,058375051
11,71	0,01866319	0,056251098
11,72	0,012342339	0,058507624
11,73	0,009010796	0,042714777
11,75	0,005195083	0,024626772
11,76	0,012747192	0,06042679
11,77	0,008090988	0,038351724
11,78	0,015120154	0,071675577
11,79	0,011583034	0,054908212
11,8	0,011903781	0,056428583
11,81	0,01805547	0,06559015
11,83	0,007348489	0,034834884
11,83	0,007703635	0,036517835
11,94	0,011147768	0,052844879
11,95	0,006709452	0,041286284
11,96	0,0118865	0,056346766
11,97	0,010132456	0,048031895
11,98	0,005715476	0,027093643
11,99	0,00474906	0,022512444
12	0,018520259	0,067793437
12,01	0,020506097	0,097207101
12,1	0,009899495	0,048927566
12,11	0,005167204	0,024494615
12,12	0,003511885	0,016647738
12,13	0,006300553	0,029667142
12,14	0,012806378	0,080716835
12,15	0,00492322	0,023338032
12,16	0,011430422	0,054184772
12,17	0,007973169	0,037796012
12,18	0,009814955	0,046526811
12,19	0,004368899	0,020662925
12,2	0,002160247	0,010240434
12,21	0,004949747	0,023463783
12,22	0,006363961	0,030167721
12,26	0,01767767	0,083799225
12,29	0,006496153	0,030794362
12,3	0,011801937	0,05949902
12,31	0,011625096	0,055107605
12,32	0,007492854	0,035519124
12,33	0,009536896	0,045208701
12,34	0,008834848	0,041880715
12,35	0,018717194	0,088726984
12,36	0,00543139	0,025746962
12,37	0,007816649	0,037054042
12,38	0,007114706	0,033726554
12,39	0,013598407	0,064461887
12,4	0,01979899	0,093855132
12,41	0,021213203	0,10055907

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
12,48	0,014815532	0,07023155
12,49	0,005507571	0,026108087
12,5	0,012032267	0,057042594
12,51	0,009380632	0,044466894
12,52	0,007587101	0,035985694
12,53	0,010855719	0,05193449
12,54	0,010049323	0,04763781
12,55	0,006453128	0,030590407
12,56	0,012608198	0,059767904
12,57	0,006658326	0,031563139
12,58	0,00484768	0,022979942
12,66	0,005656694	0,026815752
12,67	0,010606802	0,050279535
12,68	0,001414214	0,006703938
12,69	0,018018509	0,08541494
12,7	0,001870829	0,008868476
12,71	0,006843923	0,032442934
12,72	0,010666667	0,050564267
12,73	0,007106335	0,033666871
12,74	0,016474547	0,078095945
12,75	0,011045361	0,052359429
12,76	0,010026531	0,047539247
12,77	0,005787918	0,027437049
12,78	0,005377422	0,025491131
12,79	0,006291529	0,029624363
12,8	0,002828427	0,013407876
12,88	0,005656694	0,026815752
12,89	0,00294392	0,01395536
12,9	0,014445299	0,069476496
12,91	0,008759001	0,046261567
12,92	0,006078947	0,028816166
12,93	0,00633443	0,030027731
12,94	0,011183534	0,053014424
12,95	0,009177046	0,043502871
12,96	0,015994047	0,075818178
12,97	0,011454257	0,054297759
12,98	0,006291529	0,029624363
12,99	0,003807867	0,018050905
13,02	0,013576941	0,064360132
13,1	0,004654747	0,022065361
13,11	0,01117821	0,052989167
13,12	0,002828427	0,013407876
13,13	0,007753954	0,036756946
13,14	0,018230012	0,088417548
13,15	0,004070217	0,019294457
13,16	0,009882645	0,046847669
13,17	0,016317169	0,077349907
13,18	0,006377042	0,030229731
13,19	0,010500794	0,049777962
13,2	0,006220932	0,029489708
13,27	0,011532563	0,05466896
13,3	0,012819256	0,060768403
13,31	0,007138094	0,033837419
13,32	0,007457818	0,03535304
13,33	0,005018149	0,023788033
13,34	0,010044899	0,04761664
13,35	0,00807701	0,03828826
13,36	0,011515997	0,054590431
13,37	0,006425396	0,030458947
13,38	0,002217356	0,010511153
13,39	0,016583124	0,078610641
13,4	0,002828427	0,013407876
13,42	0,005656694	0,026815752
13,48	0,01313708	0,053631504
13,49	0,009665766	0,046767676
13,5	0,004242641	0,020111814
13,51	0,015409953	0,073049344
13,52	0,006879922	0,032613585
13,53	0,008043066	0,03812735
13,54	0,005885267	0,027898918
13,55	0,009898975	0,047337516
13,56	0,008648689	0,040986294
13,57	0,0139523	0,066139481
13,58	0,008280499	0,039252878
13,59	0,016970563	0,080447256
13,61	0,004242641	0,020111814
13,62	0,009192388	0,043575597
13,7	0,015620499	0,074047415
13,71	0,013780421	0,065324707
13,72	0,006752777	0,041491666
13,73	0,004203894	0,019926141
13,74	0,005583138	0,026466307
13,75	0,012644318	0,059938127
13,76	0,005377422	0,025491131
13,77	0,009365591	0,044396645
13,78	0,010830512	0,051340961
13,79	0,012817956	0,060762239
13,8	0,001732051	0,008210614
13,87	0,022627417	0,107263008
13,88	0,022627417	0,107263008
13,89	0,00305505	0,014482161
13,9	0,01272416	0,060317704
13,91	0,009272656	0,043956097
13,92	0,005198825	0,024644508
13,93	0,008514414	0,040361726
13,94	0,010163661	0,048179817
13,95	0,009114353	0,043205678
13,96	0,010277113	0,048717626
13,97	0,009208692	0,043652881
13,98	0,004242641	0,020111814

Repetitividade - Extensômetro Resistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
14	0,005856854	0,026815752
14,07	0,015132746	0,071735269
14,08	0,007505953	0,035579326
14,09	0,002061553	0,009772585
14,1	0,005541761	0,026270162
14,11	0,004893306	0,023196228
14,12	0,003854496	0,018271855
14,13	0,008575423	0,040650935
14,14	0,011630471	0,055133085
14,15	0,011647603	0,0552143
14,16	0,01035702	0,049098416
14,17	0,006350853	0,030105583
14,18	0,011590226	0,054942306
14,27	0,018175075	0,086157123
14,28	0,016324098	0,077382756
14,29	0,009130013	0,043279915
14,3	0,005847602	0,027719971
14,31	0,006914311	0,032776598
14,32	0,010037749	0,047582947
14,33	0,01276528	0,060512535
14,34	0,009641922	0,045706569
14,35	0,010256705	0,048520885
14,36	0,002828427	0,013407876
14,45	0,005859465	0,027776209
14,46	0,011	0,0521444
14,47	0,017521415	0,083058518
14,48	0,009543135	0,045238272
14,49	0,006957011	0,032979014
14,5	0,008815878	0,041790786
14,51	0,005316752	0,025203534
14,52	0,007187953	0,034073772
14,53	0,013186272	0,062508205
14,54	0,013217413	0,062855823
14,55	0,003805551	0,017091755
14,56	0,002081666	0,00986793
14,57	0,003535534	0,016759845
14,61	0,012028015	0,056983473
14,63	0,009192368	0,043575597
14,64	0,021517435	0,102001248
14,65	0,005291503	0,025083839
14,67	0,018049007	0,085559514
14,68	0,007402702	0,03509177
14,69	0,01050085	0,049778231
14,7	0,009189366	0,04356127
14,71	0,00643342	0,030496983
14,72	0,009027735	0,042795075
14,73	0,003095696	0,014674837
14,74	0,0036887818	0,017481731
14,75	0,007449832	0,035315185
14,76	0,01552149	0,073578073
14,77	0,006027714	0,028573774
14,83	0,00305505	0,014482161
14,85	0,0065	0,0308126
14,86	0,004242641	0,020111814
14,87	0,013771952	0,065284562
14,88	0,004086563	0,019371945
14,89	0,007756718	0,036769944
14,9	0,00712808	0,03378995
14,91	0,005378971	0,025498476
14,92	0,009294426	0,044059299
14,93	0,005301991	0,025133559
14,94	0,00918753	0,043552569
14,95	0,011861904	0,055282089
14,96	0,018384776	0,087511194
14,98	0,014849242	0,070391349
15,08	0,008504901	0,040316631
15,09	0,008845903	0,041833119
15,1	0,008468429	0,04014374
15,11	0,005365676	0,025435449
15,12	0,006746192	0,03197965
15,13	0,011192756	0,053058139
15,14	0,013322019	0,063151699
15,15	0,013362394	0,063343092
15,16	0,001527525	0,007241061

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
0,15	0,000707107	0,00316904
0,16	0,002828427	0,012676152
0,17	0,006429101	0,0268133
0,18	0,003774917	0,016918046
0,19	0,004355074	0,019519134
0,2	0,002756681	0,012355194
0,21	0,006377042	0,02657999
0,22	0,0015	0,00672255
0,23	0,002828427	0,012676162
0,24	0,005291503	0,023714927
0,33	0,002828427	0,012676162
0,34	0,004242641	0,019014243
0,35	0,016921367	0,075836579
0,36	0,002845751	0,011857464
0,37	0,0127074	0,056850756
0,38	0,009444261	0,042326434
0,39	0,008780423	0,039351223
0,4	0,006229528	0,027916875
0,41	0,010382094	0,046529431
0,42	0,008313309	0,032757758
0,43	0,009670114	0,043338551
0,44	0,015556349	0,06971989
0,45	0,010930516	0,048967296
0,46	0,012557866	0,056280588
0,47	0,017135316	0,076795345
0,48	0,019287302	0,086439899
0,49	0,017453339	0,07822063
0,5	0,000707107	0,00316904
0,51	0,003535534	0,015845202
0,52	0,010989655	0,049162703
0,53	0,006027714	0,027014405
0,54	0,008144528	0,03650133
0,55	0,005477226	0,024547282
0,56	0,004802777	0,021524606
0,57	0,007816067	0,035029269
0,58	0,012379418	0,055480839
0,59	0,019857828	0,088986828
0,6	0,006300889	0,037202095
0,61	0,014113823	0,063253921
0,62	0,015087838	0,067619164
0,63	0,005656854	0,025352324
0,64	0,021111608	0,094615894
0,65	0,003535534	0,015845202
0,66	0,021943108	0,089342428
0,67	0,009255629	0,041480952
0,68	0,009299258	0,041676482
0,69	0,014525839	0,065100453
0,71	0,007410578	0,033211988
0,72	0,00305505	0,01369182
0,74	0,01755705	0,07688543
0,75	0,003535534	0,015845202
0,76	0,007480132	0,033523709
0,77	0,007973916	0,035736898
0,78	0,010578351	0,047408997
0,79	0,004031129	0,01806631
0,8	0,012577537	0,056368749
0,81	0,010525479	0,047172041
0,82	0,008062258	0,036132621
0,83	0,004949747	0,022183263
0,85	0,013	0,0582621
0,93	0,009899495	0,044366566
0,94	0,004949747	0,022183263
0,96	0,008260635	0,037021689
0,97	0,012049696	0,05400402
0,98	0,008927286	0,040009416
0,99	0,01150652	0,05156877
1	0,007348469	0,032933635
1,01	0,011028103	0,049424648
1,02	0,006178817	0,027891604
1,03	0,008485281	0,038028486
1,04	0,00509902	0,022852276
1,05	0,00321455	0,01440665
1,06	0,006652067	0,02981257
1,07	0,00212132	0,009507121
1,08	0,007071068	0,031690405
1,09	0,004949747	0,022183263
1,1	0,00212132	0,009507121
1,12	0,025455844	0,114085457
1,14	0,001732051	0,007762532
1,15	0,004242641	0,019014243
1,16	0,014142136	0,063380809
1,17	0,007140178	0,032000136
1,18	0,004949747	0,022183263
1,19	0,003638419	0,016306304
1,2	0,007870479	0,035273127
1,21	0,01052661	0,047177109
1,22	0,003	0,0134451
1,23	0,005885151	0,026285849
1,24	0,00989709	0,044355786
1,25	0,006238322	0,02795829
1,26	0,016558985	0,074212405
1,28	0,002872281	0,012677203
1,33	0,002516611	0,011278698
1,34	0,001414214	0,006338081
1,35	0,004242641	0,019014243
1,36	0,003774917	0,016918046
1,37	0,007416198	0,032327177
1,38	0,004795832	0,021493478
1,39	0,007043516	0,031566924
1,4	0,005147815	0,023070963

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
1,41	0,007116251	0,031892901
1,42	0,004835057	0,021669276
1,43	0,013069047	0,05857155
1,44	0,006110101	0,027383639
1,45	0,003741657	0,016768966
1,46	0,013435029	0,060211769
1,54	0,003	0,0134451
1,55	0,001414214	0,006338081
1,56	0,009866811	0,04466736
1,57	0,005782156	0,025913691
1,58	0,004856267	0,021764334
1,59	0,008047586	0,036066865
1,6	0,006947422	0,031136259
1,61	0,006033241	0,027039177
1,62	0,004461475	0,019994994
1,63	0,007211103	0,032317998
1,64	0,004582576	0,020537729
1,65	0,005560276	0,024919488
1,67	0,002217356	0,009937523
1,72	0,005773503	0,025875107
1,74	0,004582576	0,020537729
1,75	0,007023769	0,031478426
1,76	0,006186899	0,027735894
1,77	0,013794927	0,061824723
1,78	0,00294392	0,013193768
1,79	0,006140806	0,036484652
1,8	0,009383738	0,0420551
1,81	0,005946187	0,026649027
1,82	0,007071068	0,031690405
1,83	0,013222681	0,059260088
1,84	0,012096832	0,05421437
1,86	0	0
1,88	0,007071068	0,031690405
1,91	0,005033223	0,022557395
1,92	0,007371115	0,033035125
1,93	0,003535534	0,015845202
1,94	0,008485281	0,038028486
1,95	0,009413769	0,042189689
1,96	0,009248669	0,04144976
1,97	0,010519823	0,047145689
1,98	0,006041523	0,027076294
1,99	0,008986859	0,040276406
2	0,006390562	0,028640583
2,01	0,004347961	0,019486255
2,02	0,007505553	0,033637639
2,03	0,006883374	0,030626772
2,1	0,005656854	0,025352324
2,11	0,001414214	0,006338081
2,12	0,012727922	0,057042728
2,13	0,006883688	0,038963306
2,14	0,009162553	0,041063815
2,15	0,011360751	0,050915478
2,16	0,008969063	0,040196738
2,17	0,004336995	0,01943711
2,18	0,010211031	0,045762777
2,19	0,004005552	0,017951681
2,2	0,003583976	0,016107124
2,21	0,010598742	0,047500382
2,22	0,011378342	0,050994315
2,24	0,003535534	0,015845202
2,3	0,005567764	0,02495305
2,31	0,002828427	0,012676162
2,32	0,016753109	0,075082409
2,33	0,00875595	0,039241543
2,34	0,011910779	0,05338054
2,35	0,006617811	0,036622444
2,36	0,004633867	0,020767604
2,37	0,007490164	0,03356867
2,38	0,005612486	0,025153479
2,39	0,003777124	0,016927937
2,4	0,005761944	0,025823305
2,41	0,010082989	0,045188932
2,43	0,002828427	0,012676162
2,46	0,005507571	0,024683279
2,49	0,004242641	0,019014243
2,5	0,00305505	0,01369182
2,52	0,008972179	0,040210616
2,53	0,009930712	0,044506474
2,54	0,008309906	0,037242508
2,55	0,011430952	0,051230098
2,56	0,0072761	0,032622742
2,57	0,008542053	0,038282918
2,58	0,008485281	0,038028486
2,59	0,015836666	0,070975187
2,69	0,00212132	0,009507121
2,71	0,0105	0,04705785
2,72	0,01583847	0,070983273
2,73	0,010501948	0,04706658
2,74	0,00791342	0,035455576
2,75	0,00678233	0,030396368
2,76	0,011550679	0,051766677
2,77	0,009643075	0,043217368
2,79	0,016653328	0,07463522
2,8	0,013544987	0,060704567
2,9	0,012811825	0,057418758
2,91	0,018330303	0,082150918
2,92	0,020506097	0,091902173
2,93	0,008886319	0,039825816
2,94	0,009187937	0,041177576
2,95	0,009711963	0,043526104

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo

Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
2,96	0,009300538	0,041682219
2,97	0,014129503	0,063324194
2,98	0,012272695	0,055002538
2,99	0,01457983	0,065342422
3,01	0,018717194	0,083884846
3,1	0,007071068	0,031690405
3,11	0,024041631	0,107747376
3,12	0,016842407	0,075482615
3,13	0,017947841	0,080436839
3,14	0,011666174	0,052373927
3,15	0,012648111	0,056689519
3,16	0,009146948	0,040933879
3,17	0,008969321	0,031234404
3,18	0,013934769	0,062451453
3,19	0,013498148	0,060494665
3,2	0,017511901	0,078483085
3,21	0,001414214	0,006338081
3,22	0,014174508	0,063525891
3,3	0,005567764	0,02495305
3,32	0,00057735	0,002587511
3,33	0,012020815	0,053873688
3,34	0,006429101	0,0288133
3,35	0,00926381	0,041517619
3,36	0,008918054	0,031004645
3,37	0,005376826	0,02409732
3,38	0,013239671	0,059336234
3,39	0,011031772	0,049441094
3,4	0,013971399	0,06261562
3,41	0,000707107	0,00316904
3,51	0,019731531	0,088430804
3,52	0,01979899	0,088733133
3,53	0,015313393	0,068630033
3,54	0,0071102	0,031865784
3,55	0,008541875	0,038282123
3,56	0,006575897	0,029471199
3,57	0,01105748	0,049556307
3,58	0,012847827	0,057580108
3,59	0,018903263	0,084718752
3,6	0,018175075	0,081455231
3,61	0,018958282	0,076001933
3,69	0,004242641	0,019014243
3,71	0,005	0,0224085
3,72	0,015009997	0,067270302
3,73	0,014268847	0,063948692
3,74	0,009035948	0,040496407
3,75	0,008500433	0,038096388
3,76	0,010965582	0,049234082
3,77	0,010525479	0,047172041
3,79	0,006363961	0,028521364
3,8	0,00450925	0,020209105
3,9	0,019295941	0,086478618
3,91	0,01805547	0,0809192
3,92	0,012812754	0,05742292
3,93	0,010934518	0,04900522
3,94	0,006643219	0,029772913
3,95	0,00873278	0,039137698
3,96	0,008017342	0,035931323
3,97	0,003464102	0,015525064
3,98	0,01767767	0,079228012
3,99	0,002081666	0,009329403
4	0,010606602	0,047535807
4,07	0,000707107	0,00316904
4,1	0,005059644	0,022675808
4,11	0,012727922	0,057042728
4,12	0,007481846	0,03353139
4,13	0,008140434	0,036482983
4,14	0,009794079	0,043894122
4,15	0,007698876	0,034504063
4,16	0,00321455	0,01440665
4,17	0,018263456	0,072887931
4,19	0,024041631	0,107747376
4,28	0	0
4,29	0,018058151	0,071958854
4,3	0,013793347	0,081817641
4,31	0,008952218	0,031157755
4,32	0,007329372	0,032848047
4,33	0,008165646	0,038595977
4,34	0,013260441	0,059429317
4,35	0,013892444	0,062261766
4,36	0,013140269	0,058890743
4,38	0,00212132	0,009507121
4,44	0,003535534	0,015945202
4,45	0	0
4,46	0,006363961	0,028521364
4,47	0,00875595	0,039241543
4,48	0,011073349	0,049627426
4,49	0,008988882	0,040285473
4,5	0,009448167	0,042343849
4,51	0,006498098	0,029122525
4,52	0,008288546	0,037148778
4,53	0,011954278	0,053575486
4,54	0,00212132	0,009507121
4,55	0,014081903	0,063110866
4,56	0,001414214	0,006338081
4,63	0,004949747	0,022183283
4,65	0,022678918	0,101640108
4,66	0,02307235	0,103403351
4,67	0,012377399	0,055471788
4,68	0,014468356	0,064842832
4,69	0,013112154	0,058764739

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo

Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
4,7	0,007386696	0,033149772
4,71	0,006088631	0,027287418
4,72	0,013369742	0,059919173
4,73	0,005315073	0,023820562
4,74	0,023334524	0,104578335
4,85	0,011313708	0,050704647
4,86	0,016117279	0,072232807
4,87	0,016368251	0,073362073
4,88	0,010796604	0,048387142
4,89	0,013439577	0,060232151
4,9	0,011213831	0,050257025
4,91	0,007721337	0,034604717
4,92	0,007199537	0,032286165
4,93	0,011537379	0,051707071
4,94	0,015297059	0,068556827
4,95	0,012351788	0,055357008
4,96	0,011733144	0,052584431
4,97	0,01767767	0,079226012
5,08	0,006608076	0,029615414
5,09	0,019345973	0,086702847
5,1	0,004949747	0,022183283
5,11	0,013029338	0,058393582
5,12	0,009280291	0,041591482
5,13	0,005492143	0,024614138
5,14	0,008242842	0,038941945
5,15	0,01065252	0,047741401
5,16	0,012727922	0,057042728
5,17	0,019155069	0,085947273
5,26	0,025455844	0,114085457
5,27	0,016643317	0,074590354
5,28	0,010440307	0,046790322
5,29	0,011215069	0,050262576
5,3	0,014637281	0,065599903
5,31	0,009711215	0,043522761
5,32	0,005016182	0,026862722
5,33	0,009559172	0,042841343
5,34	0,006692213	0,029992491
5,36	0,013264704	0,059448425
5,38	0,014064477	0,063032768
5,37	0,017442764	0,078173233
5,38	0,016072751	0,072033249
5,39	0,004949747	0,022183283
5,48	0,01262141	0,056565375
5,49	0,01251266	0,056077989
5,5	0,012852799	0,05760239
5,51	0,010014278	0,044880979
5,52	0,00623518	0,036907604
5,53	0,010370287	0,046476516
5,54	0,012617889	0,056549591
5,55	0,008020806	0,035946847
5,56	0,013051181	0,058491479
5,67	0,004949747	0,022183283
5,68	0,016165808	0,0724503
5,69	0,014607076	0,065464532
5,7	0,011404943	0,051113534
5,71	0,009511178	0,042626245
5,72	0,006393652	0,028854431
5,73	0,008443664	0,037841967
5,74	0,008294577	0,037173804
5,75	0,015534907	0,069622792
5,76	0,002753785	0,012341639
5,78	0,004242641	0,019014243
5,8	0,00212132	0,009507121
5,85	0,00484768	0,021725847
5,86	0	0
5,88	0,006928203	0,031050128
5,89	0,010544678	0,047258978
5,9	0,007727857	0,034633939
5,91	0,009234597	0,041386682
5,92	0,010343549	0,046356685
5,93	0,010823255	0,048508584
5,94	0,015089732	0,06762765
5,95	0,01734695	0,077743825
6,05	0,009192388	0,041197526
6,06	0,012919623	0,057901876
6,07	0,01563878	0,070088319
6,08	0,006729466	0,030159448
6,09	0,007099296	0,031816914
6,1	0,008526995	0,042897134
6,11	0,006442912	0,028875197
6,12	0,007738139	0,034680015
6,13	0,015354695	0,066815138
6,14	0,018592113	0,083324273
6,15	0,01401071	0,0627918
6,16	0,01530795	0,06860564
6,26	0,01268107	0,056832749
6,27	0,015044379	0,067424392
6,28	0,006648308	0,029795722
6,29	0,007507404	0,033645931
6,3	0,007539104	0,033788004
6,31	0,007169201	0,032130206
6,32	0,011884884	0,053264396
6,33	0,010303721	0,046178186
6,34	0,003535534	0,015845202
6,35	0,001527525	0,00844591
6,45	0,004949747	0,022183283
6,46	0,007524563	0,033722834
6,47	0,007141428	0,03200574
6,48	0,004568112	0,020472907
6,49	0,006537858	0,029300719

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo

Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
6,5	0,005058631	0,022671265
6,51	0,009818896	0,044005345
6,52	0,025455844	0,114085457
6,53	0,008388497	0,037565764
6,54	0,017079227	0,076543972
6,62	0,004358899	0,019535277
6,63	0,004949747	0,022183263
6,64	0,011313708	0,050704647
6,65	0,006055301	0,027138041
6,66	0,008776547	0,038333851
6,67	0,007090326	0,031776715
6,68	0,005007571	0,026924131
6,69	0,006765928	0,030322858
6,7	0,006972674	0,031249433
6,71	0,012323419	0,055228869
6,72	0,005176872	0,023201186
6,73	0,012858201	0,057626599
6,74	0,021213203	0,095071214
6,83	0,002828427	0,012678162
6,84	0,011295279	0,050622053
6,85	0,005192944	0,023273217
6,86	0,01238413	0,055501954
6,87	0,005967384	0,031225726
6,88	0,009485281	0,038028486
6,89	0,007949359	0,035626642
6,9	0,005125102	0,022969168
6,91	0,008513295	0,038154034
6,92	0,014411801	0,064589367
6,93	0,02152031	0,096240254
6,94	0,017039171	0,076364451
6,96	0,016970563	0,076056971
7,04	0,004949747	0,022183263
7,05	0,01530795	0,06860564
7,06	0,014525839	0,065100453
7,07	0,004680252	0,020975487
7,08	0,010010983	0,044866222
7,09	0,006904105	0,030942128
7,1	0,00926013	0,041501123
7,11	0,009048355	0,040552012
7,12	0,015608301	0,089951721
7,13	0,00488925	0,02191215
7,14	0,004358899	0,018595277
7,24	0,002828427	0,012678162
7,25	0,020231988	0,0906737
7,26	0,011410521	0,051138534
7,27	0,014592888	0,065400946
7,28	0,006215206	0,02785469
7,29	0,011882781	0,053254968
7,3	0,008214178	0,036913483
7,31	0,009287827	0,041625256
7,32	0,01048332	0,046983096
7,33	0,016154021	0,072397474
7,34	0,015373137	0,068897787
7,35	0,017672955	0,079204892
7,36	0,01767767	0,079226012
7,45	0,00499166	0,022371121
7,46	0,011030261	0,049434323
7,47	0,01485325	0,066567812
7,48	0,006649382	0,029800537
7,49	0,006907944	0,030959335
7,5	0,007509893	0,033657537
7,51	0,008991916	0,040299068
7,52	0,009803061	0,043934377
7,53	0,006058052	0,027150374
7,55	0,011842719	0,053075515
7,64	0,002828427	0,012678162
7,65	0,015041609	0,067411979
7,66	0,007833688	0,035108239
7,67	0,012407755	0,055607835
7,68	0,011038083	0,049469378
7,69	0,011070454	0,049614452
7,7	0,006273441	0,02811568
7,71	0,003639014	0,01630897
7,72	0,005291503	0,023714927
7,73	0,0075	0,03361275
7,74	0,016263456	0,072887931
7,76	0,001414214	0,006338081
7,81	0,008485281	0,038028486
7,82	0,023334524	0,104578335
7,83	0,006363961	0,028521364
7,84	0,008485281	0,038028486
7,85	0,013425722	0,060170056
7,86	0,012416387	0,055646522
7,87	0,009911975	0,044422499
7,88	0,007467026	0,033554604
7,89	0,006213718	0,027848021
7,9	0,00502849	0,022536185
7,91	0,009551863	0,042808596
7,92	0,015165751	0,067968346
7,94	0,017152259	0,076871281
8,03	0,017039171	0,076364451
8,05	0,01422322	0,063744207
8,06	0,013909572	0,062339528
8,07	0,008194603	0,036725751
8,08	0,006341098	0,028418899
8,09	0,005976342	0,026784173
8,1	0,006951419	0,031154173
8,11	0,010893423	0,048821054
8,12	0,009899495	0,044366566
8,13	0,002828427	0,012678162

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo

Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
8,23	0,0066558328	0,029840629
8,24	0,013720423	0,061490819
8,25	0,009394147	0,042101749
8,26	0,004527693	0,02029176
8,27	0,008218143	0,036831253
8,28	0,008049092	0,036073615
8,29	0,01144261	0,051282347
8,3	0,009273818	0,041561576
8,31	0,018938497	0,084876662
8,32	0,005686241	0,025484025
8,41	0,010606602	0,047535607
8,42	0,014849242	0,06654965
8,43	0,012489996	0,055976415
8,44	0,01006408	0,045104189
8,45	0,011243252	0,050388882
8,46	0,004988877	0,022358648
8,47	0,006353914	0,037439736
8,48	0,007736996	0,034674896
8,49	0,010965564	0,049144367
8,5	0,004608481	0,020653828
8,51	0,009899495	0,044366566
8,62	0,010016653	0,044891633
8,63	0,013227497	0,059281672
8,64	0,009790669	0,043879737
8,65	0,00525357	0,023544926
8,66	0,007056124	0,031623432
8,67	0,009416298	0,042201022
8,68	0,008542959	0,038286978
8,69	0,011683321	0,052361142
8,7	0,013220655	0,059251009
8,71	0,006615638	0,029649305
8,72	0,006123724	0,027444695
8,83	0,001	0,0044817
8,84	0,004790664	0,021471217
8,85	0,010260496	0,045984465
8,86	0,009613049	0,043082802
8,87	0,006078847	0,027243569
8,88	0,008815571	0,039508743
8,89	0,008696658	0,038975814
8,9	0,009712535	0,043526667
8,91	0,010856642	0,048666211
8,92	0,012020815	0,053873688
9,02	0,007071068	0,031690405
9,03	0,01266228	0,05674854
9,04	0,010263203	0,045996596
9,05	0,010166472	0,045563075
9,06	0,009254974	0,041478017
9,07	0,005466149	0,024497641
9,08	0,002783882	0,012476525
9,09	0,009252627	0,0414675
9,11	0,008652002	0,038775678
9,12	0,008291529	0,028196744
9,14	0,001707825	0,00765396
9,15	0,008688194	0,039834221
9,21	0,016970563	0,076056971
9,23	0,002828427	0,012678162
9,24	0,005813507	0,026081286
9,25	0,00509902	0,022852276
9,26	0,005785281	0,025842743
9,27	0,008309906	0,037242508
9,28	0,00797838	0,035756705
9,29	0,003082207	0,013813527
9,3	0,006267832	0,028090541
9,31	0,007302967	0,032729709
9,32	0,000707107	0,00316904
9,43	0,013141537	0,058896427
9,45	0,010793517	0,046373303
9,46	0,008372031	0,037520933
9,47	0,007324128	0,032824546
9,48	0,006798917	0,030470707
9,49	0,008542959	0,038286978
9,5	0,009674709	0,043359145
9,51	0,005593363	0,025067777
9,52	0,018384776	0,082385052
9,53	0,00212132	0,009507121
9,62	0,020506097	0,091902173
9,63	0,014571662	0,065305818
9,64	0,010307764	0,046196306
9,65	0,004159327	0,018640855
9,66	0,007098335	0,031812609
9,67	0,005558546	0,024911737
9,68	0,008419554	0,037733915
9,69	0,005797073	0,025960744
9,7	0,007483315	0,033537972
9,71	0,005446712	0,024410527
9,73	0,006658328	0,029840629
9,8	0,003535534	0,015845202
9,83	0,007314369	0,032780809
9,84	0,008551316	0,038324432
9,85	0,005241774	0,023492057
9,86	0,00713164	0,031961873
9,87	0,007237633	0,0324369
9,88	0,004003471	0,017942355
9,89	0,007050836	0,031589731
9,92	0,000707107	0,00316904
9,93	0,000707107	0,00316904
10	0,005	0,0268902
10,02	0,008414839	0,037712786
10,03	0,007023769	0,031478426

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo

Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
10,04	0,008059304	0,036119383
10,05	0,006561627	0,029407242
10,06	0,00892608	0,031040614
10,07	0,005623082	0,025200965
10,08	0,010080627	0,045178348
10,09	0,006870226	0,03079029
10,1	0,007937254	0,035572391
10,19	0,010608602	0,047535607
10,2	0,010212737	0,045770424
10,21	0,012979838	0,058171739
10,22	0,007266361	0,032565649
10,23	0,008628705	0,036671266
10,24	0,003952094	0,0177121
10,25	0,005037951	0,022578596
10,26	0,005629958	0,025231783
10,27	0,008434623	0,037801448
10,28	0,004191829	0,018786519
10,29	0,001414214	0,006338081
10,3	0,003265986	0,014637171
10,32	0,001732051	0,007762532
10,37	0,001	0,0044817
10,38	0,006363961	0,028521364
10,39	0,013686026	0,052143367
10,4	0,005	0,0224085
10,41	0,007181325	0,032184544
10,42	0,009750214	0,043689753
10,43	0,003058945	0,013709273
10,44	0,006207075	0,027816247
10,45	0,008652232	0,038776706
10,46	0,0065	0,02913105
10,47	0,010139033	0,045440106
10,48	0,005560276	0,024919488
10,58	0,005656854	0,023532324
10,59	0,00697615	0,031285011
10,6	0,011571723	0,051860989
10,61	0,005849298	0,026214798
10,62	0,005424811	0,024312374
10,63	0,00421637	0,018986506
10,64	0,007403419	0,033179501
10,65	0,00381663	0,017104992
10,66	0,009884178	0,044297919
10,67	0,010124228	0,045373754
10,68	0,003464102	0,015525064
10,69	0,003535534	0,015845202
10,7	0,013576941	0,060847770
10,76	0,003535534	0,015845202
10,79	0,011313708	0,050704647
10,8	0,005440588	0,024363084
10,81	0,012369317	0,055435567
10,82	0,008502101	0,036103864
10,83	0,007540195	0,033792893
10,84	0,004981025	0,022323458
10,85	0,008183316	0,036675169
10,86	0,007382412	0,033085754
10,87	0,006677557	0,038890208
10,88	0,007549834	0,033836093
10,89	0,002886751	0,012937554
10,9	0,006429101	0,0288133
10,98	0,005567764	0,02495305
10,99	0,002828427	0,012676162
11	0,004425306	0,019832894
11,01	0,00614817	0,027554256
11,02	0,006183696	0,02771347
11,03	0,005549775	0,024872426
11,04	0,007736572	0,034672994
11,05	0,004683968	0,020992141
11,06	0,004773438	0,021393119
11,07	0,006276057	0,028127404
11,08	0,006348228	0,028450854
11,09	0,008485281	0,039028486
11,1	0,008962886	0,040168968
11,11	0,005656854	0,023532324
11,2	0,016263456	0,072887931
11,21	0,005718391	0,025628115
11,22	0,006723095	0,030130893
11,23	0,006604472	0,029599261
11,24	0,005738757	0,025719388
11,25	0,007652688	0,034297053
11,26	0,00722265	0,032389749
11,27	0,004718883	0,021148618
11,28	0,009576012	0,042918812
11,29	0,005	0,0224085
11,39	0,007	0,0313719
11,4	0,010494046	0,047031186
11,41	0,007	0,0313719
11,42	0,006431692	0,028624916
11,43	0,007874008	0,035288941
11,44	0,005173651	0,023186753
11,45	0,00518545	0,02323963
11,46	0,00846496	0,037937413
11,47	0,007253352	0,032507346
11,48	0,004573474	0,02049694
11,49	0,008205889	0,036775437
11,5	0,011313708	0,050704647
11,58	0,00707107	0,00316904
11,59	0,006396614	0,026667704
11,6	0,011860298	0,053154297
11,61	0,003785939	0,016967442
11,62	0,00757345	0,03394193
11,63	0,006570413	0,029446621

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo

Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
11,64	0,007379401	0,03307226
11,65	0,006030227	0,027025668
11,66	0,008140434	0,036482983
11,67	0,00305505	0,01369182
11,68	0,011313708	0,050704647
11,69	0,009192388	0,041197526
11,78	0,014189198	0,063591728
11,79	0,010016653	0,044891633
11,8	0,007534366	0,033766767
11,81	0,00896023	0,040157061
11,82	0,006264032	0,028073512
11,83	0,007337994	0,032866687
11,84	0,007500476	0,033614884
11,85	0,006533628	0,029282657
11,86	0,006377042	0,02857999
11,87	0,001154701	0,005175021
11,88	0,003535534	0,015845202
11,98	0,001414214	0,006338081
11,99	0,003219544	0,01319232
12	0,007348469	0,032933635
12,01	0,007975857	0,035744504
12,02	0,006898711	0,030021612
12,03	0,009507757	0,042610913
12,04	0,007324003	0,032823986
12,05	0,007406355	0,03318858
12,06	0,008336666	0,037362436
12,07	0,003535534	0,015845202
12,17	0,00212132	0,009507121
12,18	0,007023769	0,031478426
12,19	0,007836499	0,035120637
12,2	0,010199401	0,045710655
12,21	0,004567564	0,02047045
12,22	0,007069721	0,031684368
12,23	0,006555483	0,029379709
12,24	0,001154701	0,005175021
12,25	0,00147196	0,006596884
12,36	0,010606602	0,047535607
12,37	0,011135529	0,049906099
12,38	0,006578201	0,029481523
12,39	0,006596602	0,029563989
12,4	0,008420062	0,03773619
12,41	0,006999808	0,031370141
12,42	0,004472136	0,020042772
12,43	0,006430952	0,028821597
12,44	0,003	0,0134451
12,53	0,003535534	0,015845202
12,54	0,007071068	0,031690405
12,55	0,002628427	0,012676162
12,56	0,002645751	0,011857464
12,57	0,011131252	0,04988693
12,58	0,007780294	0,034688941
12,59	0,006168837	0,027646875
12,6	0,008375024	0,037534345
12,61	0,009526279	0,042693927
12,62	0,004051014	0,018155429
12,63	0,007228416	0,032395593
12,64	0,002645751	0,011857464
12,66	0,013435029	0,060211769
12,73	0,000707107	0,00316904
12,74	0,003511885	0,015738213
12,75	0,005549775	0,024872426
12,76	0,005808025	0,026477997
12,77	0,009059304	0,036119383
12,78	0,010302986	0,046174691
12,79	0,006078194	0,027240643
12,8	0,008318654	0,03728171
12,81	0,006765107	0,030319178
12,82	0,009055385	0,04058352
12,84	0,00303315	0,013593669
12,86	0,00212132	0,009507121
12,94	0,013435029	0,060211769
12,96	0,004690416	0,021021036
12,97	0,005522681	0,024750997
12,98	0,004386125	0,019657298
12,99	0,006463573	0,028967796
13	0,006497675	0,02912063
13,01	0,006541079	0,029315154
13,02	0,004208834	0,018862732
13,03	0,003346684	0,014998637
13,04	0,006363961	0,028521364
13,05	0,002828427	0,012676162
13,14	0,004949747	0,022183283
13,15	0,007386039	0,033102011
13,16	0,008736895	0,039158142
13,17	0,007050836	0,031599731
13,18	0,009960832	0,044641463
13,19	0,008935283	0,040045259
13,2	0,006679155	0,029933969
13,21	0,003503966	0,015703724
13,22	0,00754668	0,033821956
13,23	0,005309844	0,023797128
13,24	0,00594138	0,026627484
13,25	0,005618846	0,025181981
13,26	0,00212132	0,009507121
13,36	0,014849242	0,06654985
13,37	0,012687264	0,056860511
13,38	0,001290894	0,00578595
13,39	0,006887993	0,030869917
13,4	0,006022684	0,026991865
13,41	0,00749902	0,033608356

Repetitividade - Extensômetro Piezoresistivo		
Posição (µm)	Desv. Padrão (VDC)	Desv. Padrão (µm)
13,42	0,008899973	0,03886701
13,43	0,002581989	0,0115717
13,44	0,005656854	0,025352324
13,45	0,012727922	0,057042728
13,46	0,010606602	0,047535607
13,56	0,008845803	0,039644684
13,57	0,004320494	0,019363157
13,58	0,009785193	0,043654299
13,59	0,0077122	0,034563765
13,6	0,006957695	0,031182303
13,61	0,006004544	0,026910584
13,62	0,004722288	0,021163876
13,63	0,012049886	0,05400402
13,65	0,007071068	0,031690405
13,67	0,003535534	0,015845202
13,74	0,0090185	0,040416209
13,75	0,004949747	0,022183283
13,76	0,007465476	0,03458024
13,77	0,007270113	0,032582466
13,78	0,006853444	0,030715081
13,79	0,00526495	0,023595926
13,8	0,006785606	0,030411049
13,81	0,006781013	0,030390468
13,82	0,007549634	0,033836093
13,83	0,001414214	0,006338081
13,84	0,002516611	0,011278698
13,9	0,004949747	0,022183283
13,91	0,004041452	0,016112575
13,93	0,003785939	0,016967442
13,95	0,006693992	0,030000462
13,96	0,004272002	0,019145831
13,97	0,00483553	0,021671386
13,98	0,006016644	0,026964792
13,99	0,004213836	0,018885147
14	0,005131601	0,022988298
14,02	0,004031129	0,01806631
14,13	0,008504901	0,038116413
14,14	0,008956686	0,040141179
14,15	0,005983494	0,026816224
14,16	0,003069893	0,013758339
14,17	0,005292552	0,023719632
14,18	0,006577831	0,029479864
14,19	0,006457554	0,028940818
14,2	0,012120919	0,054322321
14,21	0,002828427	0,012676162
14,3	0,014224382	0,063749459
14,31	0,012077527	0,054127854
14,32	0,008634441	0,038698974
14,33	0,006568322	0,02843725
14,34	0,008411302	0,037696932
14,35	0,004976308	0,022302317
14,36	0,004100998	0,018379441
14,37	0,007082843	0,031743178
14,38	0,008256311	0,037002306
14,39	0,010874282	0,048735268
14,4	0,003535534	0,015945202
14,41	0,005656854	0,025352324
14,42	0,001414214	0,006338081
14,5	0,010214389	0,045777737
14,51	0,009343447	0,041674526
14,52	0,008568083	0,038390614
14,53	0,008888194	0,039634221
14,54	0,002162817	0,009693097
14,55	0,007086793	0,031671245
14,56	0,006332456	0,026380168
14,57	0,008658329	0,038804035
14,58	0,012093387	0,054198931
14,6	0,01767767	0,079226012
14,67	0,004242641	0,019014243
14,69	0,007694154	0,034482886
14,7	0,012314335	0,055189157
14,71	0,007974961	0,035741382
14,72	0,005578978	0,025003308
14,73	0,001380131	0,006185334
14,74	0,003807887	0,017065805
14,75	0,005918427	0,026524614
14,76	0,007389933	0,033119483
14,77	0,005047394	0,022620908
14,78	0,008916277	0,03996008
14,79	0,016970563	0,076056971
14,8	0,002362908	0,010589844
14,81	0,00212132	0,008507121
14,9	0,007	0,0313719
14,91	0,011497826	0,051529806
14,92	0,006892024	0,030887986
14,93	0,007298924	0,032716069
14,94	0,003498299	0,015678326
14,95	0,006189321	0,027738679
14,96	0,007542472	0,033803098
14,97	0,007035624	0,031531554
14,98	0,01209052	0,05023561
14,99	0,02007486	0,0899695
15	0,006363361	0,028521384
15,09	0,015044379	0,067424392
15,1	0,013903237	0,062310137
15,11	0,009266427	0,041529345
15,12	0,00334664	0,014998637
15,13	0,008057088	0,036109451
15,14	0,002878492	0,012900536
15,15	0,001767767	0,007922601