

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO E DEDICADO À MEDIÇÃO
DE DIÂMETROS INTERNOS**

RODRIGO JULIANO SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR. BENEDITO DI GIACOMO

São Carlos
2011

RODRIGO JULIANO SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO E DEDICADO À MEDIÇÃO
DE DIÂMETROS INTERNOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: PROF. DR. BENEDITO DI GIACOMO

São Carlos
2011

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE
DA VERSÃO CORRIGIDA. A
VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA MECÂNICA
DA EESC-SP

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE 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

Silva, Rodrigo Juliano

S586d Desenvolvimento de um sistema automatizado e dedicado
à medição de diâmetros internos / Rodrigo Juliano Silva ;
orientador Benedito Di Giacomio.-- São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Automação de medição. 2. Robô industrial. 3.
Medição de diâmetros internos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO JULIANO SILVA**

Título da dissertação: “Desenvolvimento de um sistema automatizado e dedicado à medição de diâmetros internos”.

Data da defesa: 23/11/2011:

Comissão Julgadora:

Resultado:


Prof. Titular **Benedito Di Giacomo**

APROVADO

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)


Prof. Dr. **Alexandre Machado**

Aprovado

(Centro Universitário de Araraquara/UNIARA)


Prof.^a. Dr.^a. **Roxana Maria Martinez Orrego**

Aprovado

(Universidade Presbiteriana Mackenzie)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

***À minha Família
e todos que sempre me apoiaram.***

A DEUS

AGRADECIMENTOS

A todos os professores e colaboradores que com tanta fraternidade nos forneceram significativos espaços de seu precioso tempo;

Ao Professor Doutor Benedito Di Giacomo, por sua orientação segura, a minha grande admiração e carinho. Pela sua sabedoria e perspicácia ao apontar aspectos tão decisivos para esta pesquisa, pelo exemplo profissional e pelo seu brilhantismo intelectual, meu eterno agradecimento;

Ao Prof. Dr. Fabrício Tadeu Paziani, pela sua enorme contribuição e dedicação neste trabalho. Por tua disposição em analisar e enriquecer todas as etapas, sem as quais esta Dissertação não teria se realizado;

Ao Prof. Dr. José Guilherme Sabe, por sua sabedoria, conselhos e compreensão desde o início desta longa etapa alcançada;

Ao aluno de Engenharia Mecânica Pedro Augusto Garcia de Albuquerque Leitão (Sofá), pela grande ajuda na elaboração dos programas computacionais;

Aos amigos José Cláudio Pinto de Azevedo, Luis Carlos Neves, Vagner Augusto de Souza, César Augusto Galvão de Moraes e todos os funcionários do Laboratório de Máquina-Ferramenta pela amizade cultivada ao longo dos anos, pelas contribuições técnicas e pelo incentivo constante;

Aos colegas de trabalho Willian dos Santos, Danilo Peruzzi, Luis Alfredo Papini, Carlos Alexandre Bibbo, João Graminha, Tiago Carraro, Sílvio Gonçalves, Tiago Barbosa, Roger, Nei e a todos os funcionários da Equitron que de uma forma ou outra me ajudaram a desenvolver este trabalho.

À Profa. Dra. Sandra Becker, que em pouco tempo mostrou-se prestativa e incentivadora, principalmente na fase final desta pesquisa.

À meu amigo Alexandre Natal, grande companheiro. Força sempre irmão!

A toda minha família, minhas desculpas por tantas ausências e todo o meu carinho;

À meus irmãos, Pedro e Ariane, que sempre me incentivaram nesta caminhada, com companheirismo e garra;

À meus pais, Pedro e Lourdes, cuja força e entusiasmo tem sido um exemplo de vida e para quem minhas vitórias, em nenhum momento, foram

motivos de dúvidas. Nossas relações transformam, a cada dia e em cada tarefa dividida, em algo mágico e absolutamente indispensável na minha vida;

À Renata Magalhães Galvão de França, pessoa ímpar de uma sinceridade incontestável, pessoa para todas as horas, por me incentivar sempre;

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para o êxito do meu Mestrado.

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios.
Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente,
antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.”

Charles Chaplin

RESUMO

SILVA, R. J. (2009). *Desenvolvimento de um sistema automatizado e dedicado à medição de diâmetros internos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Determinadas peças cilíndricas internas exigem inspeção via súbito por dificuldades inerentes à peça ou de acesso a essas dimensões. O trabalho com esse tipo de instrumento exige operador especializado e em geral são medições demoradas e com alto nível de incerteza potencializada quando se trata de produção de médios e grandes lotes. Sabe-se que a medição acurada com baixos níveis de incerteza associada a tempos econômicos de inspeção são decisivos para o aumento da qualidade e produtividade da empresa, já que o conhecimento das dimensões é essencial para assegurar, que os componentes produzidos através dos diversos processos de manufatura estejam dentro das especificações. Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema automatizado para a medição de diâmetros internos que simule a medição via comparador de diâmetros. Um robô industrial foi empregado como manipulador de transdutores de deslocamento do tipo LVDT e, substitui o operador humano. Para a realização das medidas, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem Delphi, o que proporcionou a comunicação entre o microcomputador, LVDT e o sistema de controle do robô através de uma placa de aquisição do tipo AD/DA. Os valores medidos foram comparados com padrões metrológicos pertinentes. Os resultados foram efetivos e comprovaram a eficácia do sistema de medição proposto tanto técnica como economicamente.

Palavras chave: Automação de Medição; Robô Industrial; Medição de Diâmetros Internos.

ABSTRACT

SILVA, R. J. (2011). *Development of an automated and dedicated measuring system for internal diameter inspection*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Certain internal cylindrical surfaces require diameter inspection by means of bore gauges due to either shape-inherent difficulties or poor access to the measuring point. Measurements with such instruments, which call for skilled operator, are generally long and may present high uncertainty levels when inspecting mid-size or large part batches. Accurate measurements with low associated uncertainty and cost-effective inspection time are decisive to quality and productivity improvement, since dimensional information is essential to ensure that parts produced by several manufacturing processes lie within specifications. This work aims to present the development of an automated and dedicated diameter measuring system that simulates bore gauge inspection. An industrial robot, which was employed to manipulate inductive type displacement probes, replaces the human operator. In order to achieve measurements, a Delphi language object-oriented algorithm was developed to provide communication among displacement probes, a microcomputer and the robot control system, by means of an AD/DA acquisition board. Measured values were compared to pertinent metrological standards. The results were consistent and demonstrated the efficiency of the proposed measuring system, both technically and economically.

Keywords: Measurement automation; industrial robot; bore inspection.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. A MEDIÇÃO DE DIÂMETROS	4
2.1. MEDIÇÃO DIRETA	6
2.1.1. MICRÔMETROS	7
2.1.2. PAQUÍMETROS	11
2.1.3. LASER	13
2.1.4. PROJETOR DE PERFIL	14
2.1.5. MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS	16
2.2. MEDIÇÃO INDIRETA	18
2.2.1. CALIBRADORES EXPANSÍVEIS	18
2.2.2. CALIBRADORES TELESCÓPICOS	19
2.2.3. MICRÔMETRO INTERNO TUBULAR	20
2.2.4. MEDIÇÃO PNEUMÁTICA “SOLÉX”	21
2.2.5. CALIBRADOR DE TESOURA	23
2.2.6. CALIBRADOR TAMPÃO DO TIPO PASSA/NÃO PASSA	24
2.2.7. COMPARADOR DE DIÂMETRO INTERNO	25
3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS DE MEDIÇÃO	27
3.1. TEORIA DOS ERROS	28
3.1.1. ERROS SISTEMÁTICOS	28
3.1.2. ERROS ALEATÓRIOS	29
3.1.3. HISTERESE	30
3.1.4. OUTROS ERROS	30
3.1.5. ACURACIDADE	31

3.1.6. REPETIBILIDADE	31
3.1.7. RESOLUÇÃO	32
3.2. MEDIDAS DE POSIÇÃO	32
3.2.1. MÉDIA OU MÉDIA ARITMÉTICA	32
3.2.2. MODA (MO)	33
3.2.3. MEDIANA (MD)	33
3.2.4. RELAÇÃO EMPÍRICA E CARACTERÍSTICAS ENTRE A MÉDIA, A MODA E A MEDIANA	34
3.3. MEDIDAS DE DISPERSÃO	35
3.3.1. DESVIO PADRÃO (S)	36
3.3.2. VARIÂNCIA (S^2)	37
3.4. MEDIDAS DE ASSIMETRIA (SKEWNESS) E CURTOSE (KURTOSIS)	37
3.4.1. MOMENTOS	37
3.4.2. ASSIMETRIA (SKEWNESS)	40
3.4.3. CURTOSE (KURTOSIS)	42
3.5. INCERTEZA DE MEDIÇÃO)	45
3.5.1. INCERTEZA DE MEDIÇÃO PADRÃO	45
3.6. DISTRIBUIÇÃO NORMAL DE PROBABILIDADE	47
3.7. MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	49
3.7.1. REGRESSÃO LINEAR	50
<hr/>	
4. SISTEMA AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO	52
<hr/>	
4.1. POSICIONAMENTO DOS SENSORES	54
4.2. O ARTEFATO PORTA SENSORES, PORTA PEÇAS E ANÉIS DE MEDIÇÃO	54
4.3. AS INTERFACES DE CONTROLE DE MEDIÇÃO	55
4.4. O PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O SISTEMA DE MEDIÇÃO	55
4.5. ANÁLISES, SIMULAÇÕES E TESTES EXPERIMENTAIS	56
<hr/>	
5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÃO DE DIÂMETROS INTERNOS	57
<hr/>	
5.1. PARTES DO SISTEMA	58
5.2. DISPOSITIVO MECÂNICO E INTERFACES DE CONTROLE E MEDIÇÃO	59
5.2.1. ROBÔ	60
5.2.2. ARTEFATO PORTA SENSORES (“GARRA DE MEDIÇÃO”)	62
5.2.3. COLUNA DE MEDIÇÃO	63

5.2.4. PORTA PEÇAS	64
5.2.5. ANEL PADRÃO E ANÉIS DE TESTE	65
5.2.6. PLACA DE AQUISIÇÃO	66
5.2.7. PROGRAMA COMPUTACIONAL E ALGORITMOS	68
5.3. TESTES EXPERIMENTAIS	71
5.3.1. PONTO CENTRAL DA FERRAMENTA (<i>TCP</i>)	71
5.3.2. DETERMINAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CALIBRAÇÃO DA “GARRA DE MEDIÇÃO” E CALIBRAÇÃO DOS ANÉIS	74
5.3.3. MOVIMENTAÇÃO DO ROBÔ	76
5.3.4. ALINHAMENTO DO PORTA PEÇAS	79
5.3.5. MEDIÇÃO	80
<hr/>	
6. RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS, ANÁLISES E DISCUSSÕES	83
<hr/>	
6.1. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO ANEL PADRÃO E ANÉIS DE TESTE	84
6.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO	84
6.3. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO PORTA SENSORES	90
6.4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DOS ANÉIS DE TESTE E SUAS DISCUSSÕES	91
6.4.1. MEDIÇÕES COM ANÉIS DE TESTE E ANEL PADRÃO	91
6.4.2. MEDIÇÃO COMPARATIVA DOS ANÉIS DE TESTE NO SAMDI COM OUTROS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO	94
<hr/>	
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
<hr/>	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
<hr/>	
ANEXOS	107
<hr/>	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Organograma de Medição Direta e Indireta para Diâmetros	6
Figura 2.2 – Micrômetro de Palmer patenteado em 1848	7
Figura 2.3 – Demonstração do Princípio de Abbé	8
Figura 2.4 – Micrômetro Externo	9
Figura 2.5 - Micrômetro Interno Tipo Paquímetro	10
Figura 2.6 – Micrômetro Interno de Três Pontas	11
Figura 2.7 – Paquímetro Universal	12
Figura 2.8 – Medições internas, externas, de ressalto e de profundidade	13
Figura 2.9 – Sistema de Medição a Laser	14
Figura 2.10 – Projetor de Perfil	15
Figura 2.11 – Projeção Diascópica, Episcópica e Epidiascópica	16
Figura 2.12 – Máquina de Medir por Coordenadas do Tipo Ponte Móvel	17
Figura 2.13 – Apalpadores do Tipo <i>Touch-Trigger</i>	18
Figura 2.14 – Calibres Expansíveis	19
Figura 2.15 – Jogo de Calibres Telescópicos	19
Figura 2.16 – Micrômetro Interno Tubular com hastes intercambiáveis	20
Figura 2.17 – Sistema de Medição Pneumático “Solex”	21
Figura 2.18 – Calibrador Tampão Pneumático para Medições em Diâmetros Internos	22
Figura 2.19 – Calibrador Tipo Tesoura para Diâmetros Internos	23
Figura 2.20 – Calibrador Tampão do Tipo Passa/Não passa	24
Figura 2.21 – Comparador de Diâmetro Interno	25
Figura 2.22 – Vistas Diferenciadas na Medição do Comparador de Diâmetro Interno	26
Figura 3.1 – Análise do Erro Aleatório e Erro Sistemático	30
Figura 3.2 – Acuracidade e Repetibilidade	31
Figura 3.3 – Curva de Frequências Simétrica	40
Figura 3.4 – Curva de Frequências Assimétrica à Direita	41
Figura 3.5 – Curva de Frequências Assimétrica à Esquerda	41
Figura 3.6 – Curva de Frequências Normalmente Achatada (Mesocúrtica)	42
Figura 3.7 – Curva de Frequências Excessivamente Achatada (Platicúrtica)	43
Figura 3.8 – Curva de Frequências Excessivamente Afilada (Leptocúrtica)	43
Figura 3.9 – Curva de Distribuição Normal de Probabilidades (Gaussiana)	47
Figura 3.10 – Distribuições de Probabilidade	48
Figura 3.11 – Gráfico de Regressão Linear dos Valores x e y Tabelados	50

Figura 5.1 – Esquema do Sistema Automatizado de Medição de Diâmetros Internos (SAMDI)	58
Figura 5.2 – Sistema de Medição Proposto	59
Figura 5.3 – Robô Articulado IRB140 e Vista Isométrica com Seis Eixos de Movimentação	60
Figura 5.4 – Área de Trabalho do Robô IRB140	61
Figura 5.5 – Controlador do Robô e Unidade de Programação	61
Figura 5.6 – Vista Isométrica do Artefato Porta Sensores com transdutores do tipo LVDT alocados	62
Figura 5.7 – Vista Isométrica Inferior do Artefato Porta Sensores com Transdutores	63
Figura 5.8 – Coluna de Medição da Tesa TT500	63
Figura 5.9 – Porta Peças	65
Figura 5.10 – Anel Padrão e Anéis de Teste	65
Figura 5.11 – Diagrama de Blocos da Placa de Aquisição de Dados AQB11/12 (PAZIANI, 2005)	68
Figura 5.12 – Diagrama de Blocos para Rotina de Calibração	69
Figura 5.13 – Diagrama de Blocos para Rotina de Medição	70
Figura 5.14 – Manipulador com as coordenadas da base (XYZ) e do punho (xyz)	72
Figura 5.15 – As duas pontas secas utilizadas para realização do TCP	72
Figura 5.16 – Movimentação do manipulador em quatro orientações diferentes	73
Figura 5.17 – Artefato porta sensores sem a ponta seca e com os transdutores lineares de deslocamento	73
Figura 5.18 – Etapas do Procedimento de Calibração dos LVDT's	74
Figura 5.19 – Ajuste de Medida do Micrômetro com Bloco Padrão	75
Figura 5.20 – Posicionamento das Faces Internas do Micrômetro com os LVDT's	75
Figura 5.21 – Máquina de Calibração e Medição da marca SIP, modelo 302M	76
Figura 5.22 – Trajeto Linear	77
Figura 5.23 – Trajeto Reorientado	77
Figura 5.24 – Trajeto Circular	78
Figura 5.25 – Zona de Precisão	78
Figura 5.26 – Porta Peças Alinhado	79
Figura 5.27 – Interface Gráfica de Controle	80
Figura 5.28 – Movimento de Translação do Robô	81
Figura 6.1 – Gráfico de Regressão Linear para LVDT “A” - Faixa de Atuação do LVDT: 308 μ m a -308 μ m	85
Figura 6.2 – Gráfico de Regressão Linear para LVDT “B” - Faixa de Atuação do LVDT: - 308 μ m a -308 μ m	86
Figura 6.3 – Gráfico de Regressão Linear para LVDT “A” - Faixa de Atuação do LVDT: -200 μ m a 200 μ m	88

Figura 6.4 – Gráfico de Regressão Linear para LVDT “B” - Faixa de Atuação do LVDT: -200 μ m a 200 μ m	88
Figura 6.5 – Gráfico de Regressão Linear para LVDTs - Faixa de Atuação do LVDT: -100 μ m a 100 μ m	90
Figura 6.6 – Curvas de Assimetria para os Diversos Sistemas de Medição Propostos dos Anéis de Teste	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Somatória dos Valores x_i , y_i , x_i^2 , e dos Produtos $x_i y_i$	51
Tabela 6.1 – Média e Incerteza de Medição dos Anéis	84
Tabela 6.2 – Dados de Deslocamento X Números AD para Calibração do LVDT “A” - Faixa de Atuação do LVDT: 308 μ m a -308 μ m	85
Tabela 6.3 – Dados de Deslocamento X Números AD para Calibração do LVDT “B” - Faixa de Atuação do LVDT: 308 μ m a -308 μ m	86
Tabela 6.4 – Dados de Deslocamento X Números AD para Calibração do LVDT “A” e “B”- Faixa de Atuação do LVDT: 200 μ m a -200 μ m	87
Tabela 6.5 – Dados de Deslocamento X Números AD para Calibração do LVDT “A” e “B”- Faixa de Atuação do LVDT: 100 μ m a -100 μ m	89
Tabela 6.6 – Resultados de Medição do Anel de Teste 1 (Diâmetro 69.9478mm)	92
Tabela 6.7 – Resultados de Medição do Anel de Teste 2 (Diâmetro 70.0428mm)	92
Tabela 6.8 – Resultados de Medição do Anel de Teste 1 e 2	93
Tabela 6.9 – Medição Comparativa dos Anéis de Teste do SAMDI com outros Sistemas de Medição Propostos	94
Tabela 6.10 – Média, Mediana e Moda Resultante das Medições dos Anéis de Teste	95

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Há nos dias de hoje, uma grande preocupação nas indústrias em qualificar seus produtos, uma vez que a concorrência está cada vez maior, exigindo assim processos de qualificação mais minuciosos. Com isso, técnicas para o aperfeiçoamento dos processos de medição ganham maior importância, já que o conhecimento das dimensões reais é essencial para assegurar que os componentes produzidos através dos diversos processos de manufatura estejam dentro das especificações.

A competitividade na área industrial exige a inserção de sistemas automatizados, buscando o aumento de produtividade e qualidade dos produtos industrializados, que dentro da perspectiva da metrologia dimensional, proporcionaria rapidez e objetividade ao processo de medição.

Para exemplificar esta exigência, podem-se citar indústrias que produzem centenas de milhares de peças cilíndricas de geometria

simples, cujo diâmetro deve ser controlado em alguns micrometros. Obviamente neste exemplo é altamente desejável a implementação de um sistema automático de medição dedicado à função exclusiva de medição de diâmetros.

A evolução da tecnologia e o desenvolvimento de novos sistemas de medição integrados ao processo de manufatura, permitem hoje que a execução de tarefas anteriormente realizadas apenas pelo homem seja realizada por máquinas.

Esta tecnologia nos leva a 1954, quando da criação da Máquina de Medir à Três Coordenadas (MM3C's) que inicia a realização de medições complexas, antes somente realizadas com muitas dificuldades com instrumentos convencionais em laboratórios de Metrologia especializados. Entretanto, nem sempre é viável a utilização das MM3C's, como por exemplo, na medição de peças seriadas onde as medições são realizadas sem o devido controle de temperatura.

Buscando a viabilidade e eficiência da integração metrológica aos sistemas produtivos, este projeto tem por finalidade a implementação de um robô industrial operando e qualificando peças cilíndricas internas, proporcionando velocidade na inspeção e alta adaptabilidade do sistema para medir diâmetros.

Robôs industriais, entretanto, apresentam erros de posicionamento relativamente grandes que inviabilizam a utilização do sistema de coordenadas do equipamento como referência para medições precisas.

Com o intuito de integrar este sistema para medição de diâmetros internos, o robô foi utilizado como um manipulador, em conjunto com transdutores de deslocamento em medição diferencial, com o qual minimizou-se o efeito dos erros do sistema de medição sobre o valor medido.

Foram projetados e desenvolvidos artefatos mecânicos para medição e posicionamento dos anéis de medição, assim como a programação do robô e sistema de medição.

Análises, simulações e testes experimentais foram realizados de forma que os resultados de medição fossem os mais satisfatórios possíveis dentro de tolerâncias previamente estabelecidas. A incerteza de medição para diâmetros internos foi calculada. Uma breve descrição do desenvolvimento do trabalho encontra-se a seguir.

No segundo capítulo desta dissertação é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as principais formas de medição de diâmetros, assim como os dois métodos básicos de medição: comparação direta e comparação indireta. Ainda, são apresentadas as diferenças entre os diversos sistemas robóticos existentes.

No terceiro capítulo, conceitos de estatística necessários para análise de erros e suas tendência são abordados. A teoria fundamental para expressão da incerteza fecha o capítulo.

O quarto capítulo apresenta a proposta deste trabalho de forma resumida, com todas as etapas envolvidas no desenvolvimento do sistema automatizado para medição de diâmetros internos proposto.

No quinto capítulo deste trabalho é apresentado todo o desenvolvimento da metodologia proposta. São descritos as partes mecânicas, interfaces de controle e medição, programa computacional, algoritmo e manipulador. Todo o desenvolvimento do experimento, simulações e testes experimentais foram descritos.

Todos os resultados obtidos neste trabalho são apresentados no sexto capítulo. Também é analisado e validado o modelo desenvolvido para a medição de diâmetro interno.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões inerentes ao trabalho realizado e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

A MEDIÇÃO DE DIÂMETROS

Para a execução de medidas de diâmetros é necessário conhecer alguns métodos de medição, a fim de minimizar erros de medições provenientes da fabricação ou do mensurando.

Segundo Beckwith e Buck (1991), a medição é o ato de se comparar uma quantidade com um padrão pré definido. Para realização desta comparação, a metodologia de medição deve ser demonstrada e o padrão e aparelhos utilizados devem estar calibrados.

Existem dois métodos básicos de medição: comparação direta com o padrão principal ou um secundário e comparação indireta com um padrão através da utilização de um sistema calibrado (BECKWITH; BUCK, 1991).

Ao medir o comprimento de uma barra laminada a frio provavelmente usar-se-ia uma trena, ou seja, compararia o comprimento da barra com um padrão primário. Desta forma, o método utilizado seria o da comparação direta. Medições por comparação direta

são bastante comuns, sendo que muitas medições de comprimento são feitas como a da barra laminada.

Um exemplo é a hora do dia, geralmente determinada por comparação, com um relógio marcador de horas usado como um padrão que percorre o seu ciclo duplo, em sincronismo com a rotação da Terra. Além disso, se bem regulado, o relógio é mais preciso do que a terra, pois esta não gira a uma velocidade uniforme. Portanto, em alguns casos, um padrão secundário pode ser mais útil do que o padrão primário.

Os sentidos humanos não estão adequados para fazer uma comparação direta de todas as quantidades com igual facilidade, pois em muitos casos não são sensíveis o suficiente. Não se pode fazer comparações diretas de comprimento usando uma régua de aço com uma resolução de 0,2mm, por exemplo. Neste caso, a resolução requerida é bem maior, assim deve-se recorrer a um tipo de instrumento de medição com resolução adequada.

A comparação indireta com um padrão consiste em confrontar a peça que se quer medir com aquela de padrão ou dimensão aproximada. Assim, diâmetros podem ser medidos indiretamente, utilizando-se um calibrador tampão ou um comparador de diâmetros interno.

Tendo em vista a diferença dos dois métodos básicos e comparativos de medição, estão apresentados dois métodos de medição para diâmetros: o direto e indireto.

Ambos os métodos produzem resultados quantitativos, porém a grande diferença entre eles está no uso ou não de um dispositivo auxiliar de medição. Na direta, não há necessidade do dispositivo, pois o próprio instrumento já indica o valor medido através do seu mostrador. Já na indireta, o aceite ou valor medido é dado pela comparação com outro dispositivo de medição, por exemplo, um comparador de diâmetro interno calibrado com um anel padrão indicará zero, ou dígito igual a zero, quando o valor da medição é o mesmo do anel padrão.

O organograma mostrado na Figura 2.1 mostra as diferentes possibilidades de medição com variados instrumentos que divergem pela aplicabilidade, custo e acuracidade de medição.

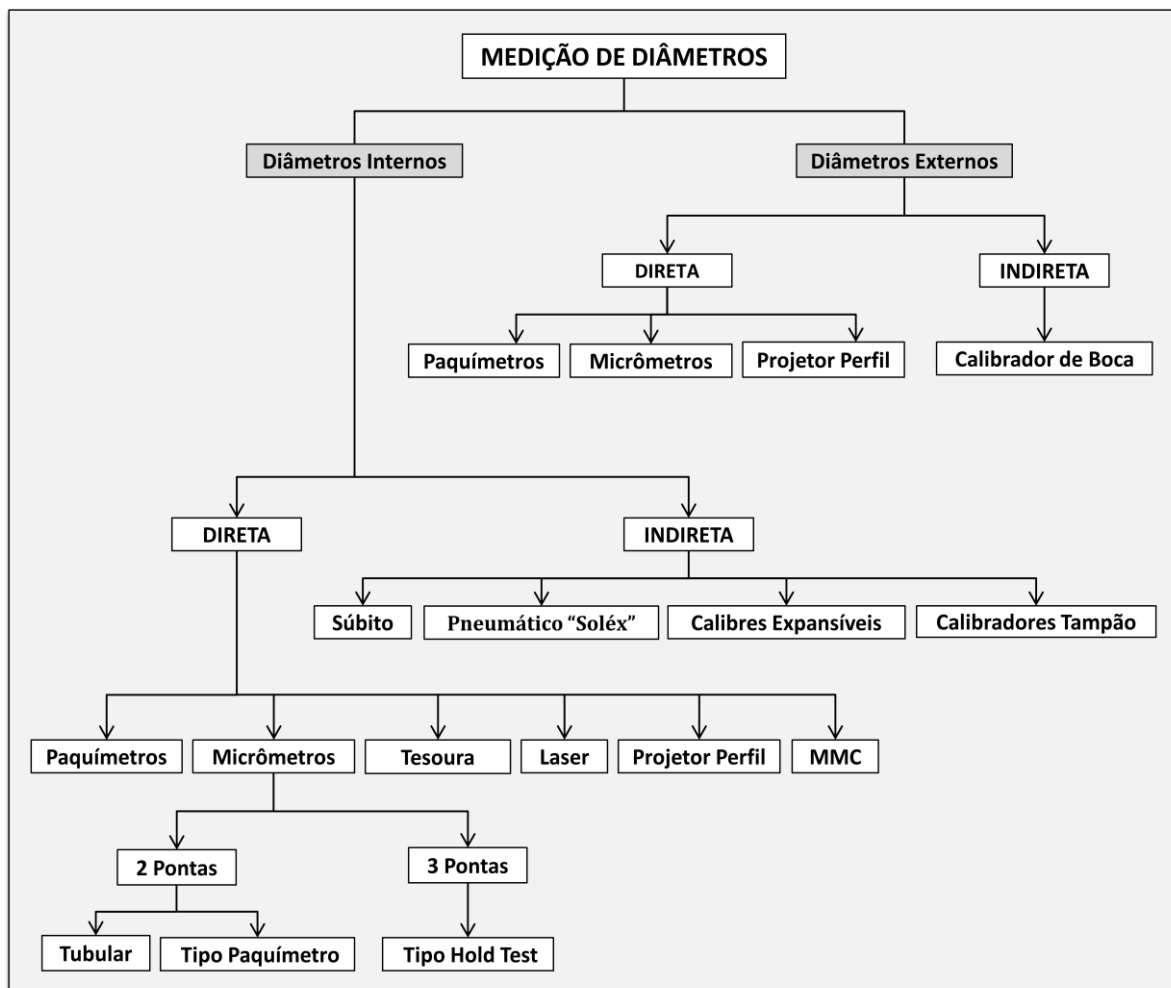


Figura 2.1 - Organograma de Medição Direta e Indireta para Diâmetros

2.1 Medição Direta

O método mais utilizado na maioria das medições de diâmetros é o direto e se dá com o uso de instrumentos convencionais, pelo fato de ser um método prático e que dispensa o uso de outros dispositivos de medição. Dentre os instrumentos mais utilizados pode-se destacar os micrômetros, os paquímetros, o medidor à laser, o projetor de perfil e a máquina de medir por coordenadas.

2.1.1 Micrômetros

Em 1848, o parisiense Jean Louis Palmer apresentou pela primeira vez o Micrômetro (Figura 2.2) como um instrumento que permitiria leituras de centésimos de milímetro, de uma forma muito simples. Na França, em homenagem ao seu inventor, este instrumento é chamado de Palmer.

Sendo um instrumento com uma exatidão de leitura superior à do paquímetro, o micrômetro é um dos instrumentos mais usados para medições externas e internas de precisão (PANAMBRA, 1961).

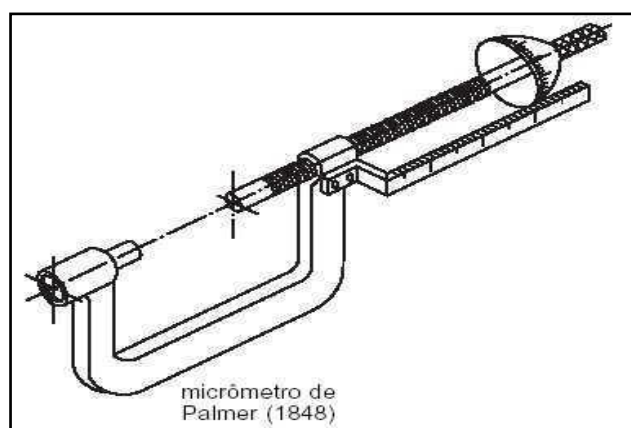


Figura 2.2 – Micrômetro de Palmer patenteado em 1848

O princípio de funcionamento do micrômetro é baseado no deslocamento axial de um parafuso micrométrico com passo de alta exatidão dentro de uma porca ajustável. Ao girar o parafuso, este avança de forma proporcional ao passo da rosca (normalmente 0,5 mm no sistema métrico ou 0,025 polegadas). A circunferência dessa rosca é dividida em 50 partes iguais (25 nos equipamentos em polegadas), possibilitando leituras da ordem de 0,01 mm ou 0,001 pol. A precisão do instrumento está diretamente relacionada à precisão da rosca, e ao paralelismo entre as faces de medição (SALMON, 1956).

A capacidade de medição dos micrômetros normalmente varia de 25mm a 2000mm, sendo que os modelos menores (25 a 300mm), são geralmente escalonados em 25mm. Os micrômetros até 300mm são fabricados em arco inteiro. Já os maiores são em arco perfurado ou tubo soldado, para que se obtenha uma boa relação entre peso e rigidez.

A resolução de medição nos micrômetros pode ser de 0.01mm, 0.001mm.

Os micrômetros foram os primeiros instrumentos que atenderam ao princípio de Ernest Abbé, operando com o mesmo princípio das máquinas de medir modernas, ou seja, são construídos de forma a minimizar os erros de 1ª ordem e em alguns casos até de 2ª ordem.

Bryan (1979) propôs uma generalização do Princípio de Abbé e exprime que: “o erro de Abbé é o deslocamento que ocorre na linha de medição causado pelos possíveis movimentos angulares que surgem devido ao Braço de Abbé. Se o Braço não existir, há uma concordância com o princípio de Abbé”.

Na Figura 2.3, um exemplo clássico do enunciado proposto por Abbé é demonstrado:

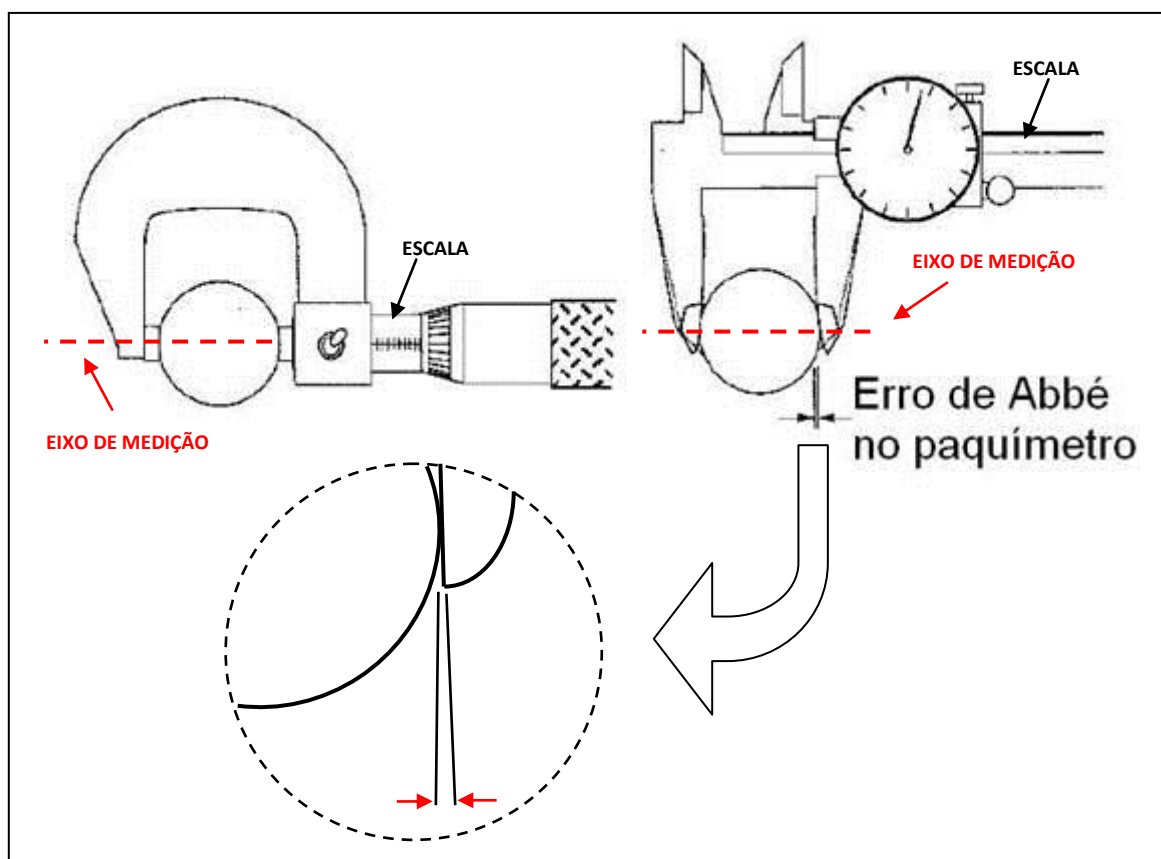


Figura 2.3 – Demonstração do Princípio de Abbé

Na primeira situação mostrada na Figura 2.3, observa-se um instrumento que está em concordância com o princípio de Abbé, ou

seja, a linha de medição coincide com a linha da escala. Já o paquímetro transgride o princípio de Abbé, pois o eixo de medição não coincide com o da escala. Observa-se ainda, numa vista ampliada o erro de Abbé, que se acentua proporcionalmente na medida em que a distância entre o eixo de medição e a escala aumenta. Um dos fatores de influência deste erro é a força que o operador aplica no instrumento.

Portanto, em muitos instrumentos quando a linha de referência do sistema de medição não é colinear com o eixo de medição da peça, o Princípio de Abbé é transgredido.

- Micrômetros Externos

Constituído das seguintes partes, como mostra a Figura 2.4:



Figura 2.4 – Micrômetro Externo

O arco é construído em aço especial ou fundido, tratado termicamente para eliminar as tensões internas. O isolante térmico, fixado ao arco, minimiza sua dilatação porque isola a transmissão de calor das mãos do operador para o instrumento. O fuso micrométrico é construído de aço especial temperado e retificado para garantir exatidão do passo da rosca. As faces de medição devem ser planas e paralelas. Em alguns instrumentos, os contatos são de metal duro, de alta resistência ao desgaste.

A porca de ajuste permite a regulagem da folga do fuso micrométrico, quando necessária. A escala centesimal está localizada no tambor que corporifica o fuso micrométrico. Portanto, a cada volta, seu deslocamento é igual ao passo do fuso. A catraca assegura uma pressão de medição constante. A trava permite imobilizar o fuso numa medida predeterminada.

- Micrômetros Internos

- I. *Medição por dois pontos*

Os micrômetros internos de dois contatos (duas pontas) são os com bicos para medições internas (“tipo paquímetro”).

- Com bicos para medições internas (“Tipo Paquímetro”)**

É um instrumento muito usado para medições internas de diâmetros, porém com uma capacidade de medição limitada.

Com bicos de medição, mede a partir de 5 mm, com variação de 25 em 25 mm. É denominado micrômetro tipo paquímetro, devido o seu formato, como pode ser observado na Figura 2.5:



Figura 2.5 – Micrômetro Interno Tipo Paquímetro

- II. *Medição com três pontas*

Este tipo de micrômetro é usado exclusivamente para realizar medidas de dimensões cilíndricas internas. Sua característica principal é a de ser autocentrante, devido à forma e à disposição de suas pontas de contato, que formam, entre si, um ângulo de 120°.

A resolução de leitura é de um milésimo de milímetro. O micrômetro interno é de fácil uso, robusto e de simples construção. É um instrumento muito utilizado nas oficinas de fabricação mecânica e em laboratórios de controle, graças à sua alta precisão e escala micrométrica (KIEFFER, 1948). A Figura 2.6 mostra o uso de um micrômetro de três pontas:



Figura 2.6 – Micrômetro Interno de Três Pontas

2.1.2 Paquímetros

Um instrumento muito popular para tomada de medições rápidas e precisas, se comparado aos diversos instrumentos de medição manual é o paquímetro que foi inventado por Pierre Vernier, em 1631. Ele utiliza duas escalas graduadas: a escala principal (fixa) semelhante ao de uma régua e uma escala graduada móvel chamada de Nônio ou Vernier. A escala móvel que desliza paralelamente à escala principal permitindo leituras a uma fração da unidade da escala principal. É muito usado para medir dimensões lineares internas, externas e de

profundidade de uma peça. Sua escala é graduada em milímetros ou em polegadas (COMPAIN, 1952).

Na Figura 2.7 observa-se as diversas partes de paquímetro:

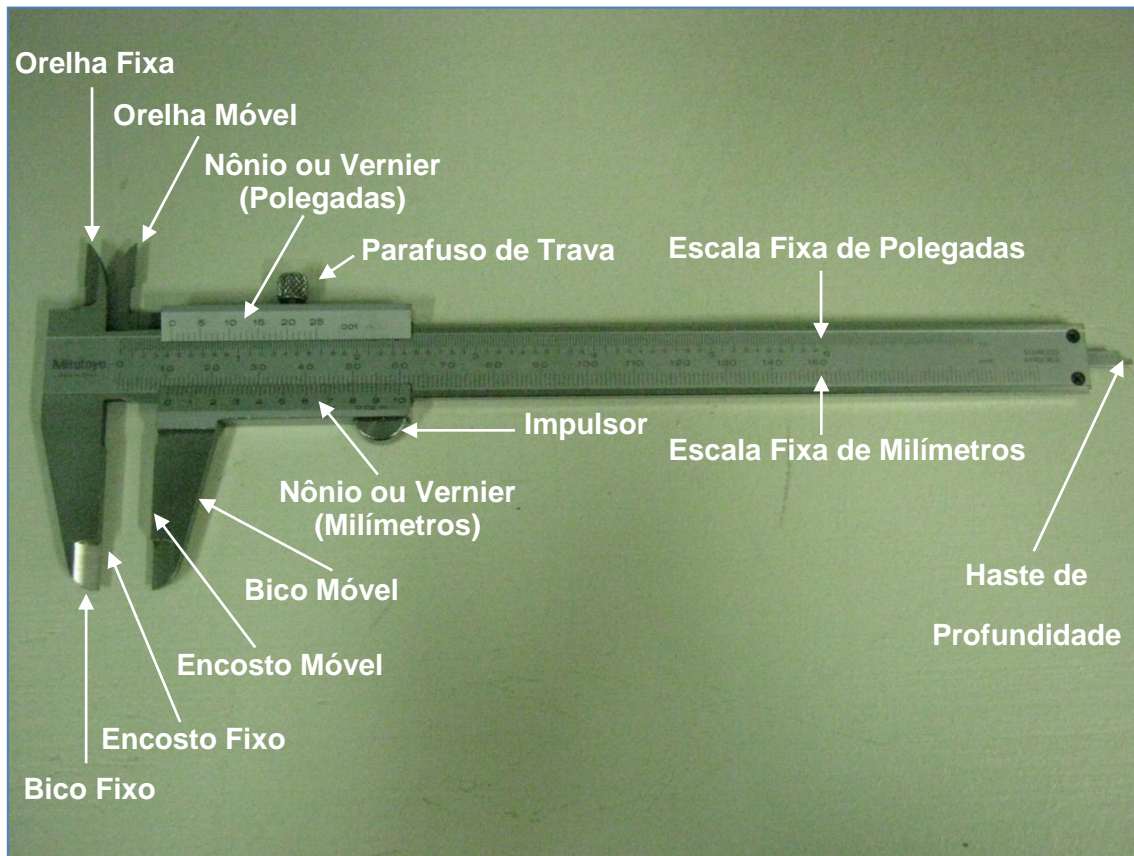


Figura 2.7 – Paquímetro Universal

É um instrumento versátil, barato e de fácil utilização. São fabricados em aço inoxidável temperado, de alta resistência ao desgaste e livre de tensões internas. Muito utilizado em medições rápidas. Estes instrumentos são fabricados em diversos modelos os quais se diferenciam no tamanho dos encostos, orelhas, dimensões a serem medidas, materiais, aplicações, entre outros.

Os paquímetros são amplamente utilizados em laboratórios e indústrias.

Na Figura 2.8 observa-se a utilização em diversas aplicações:

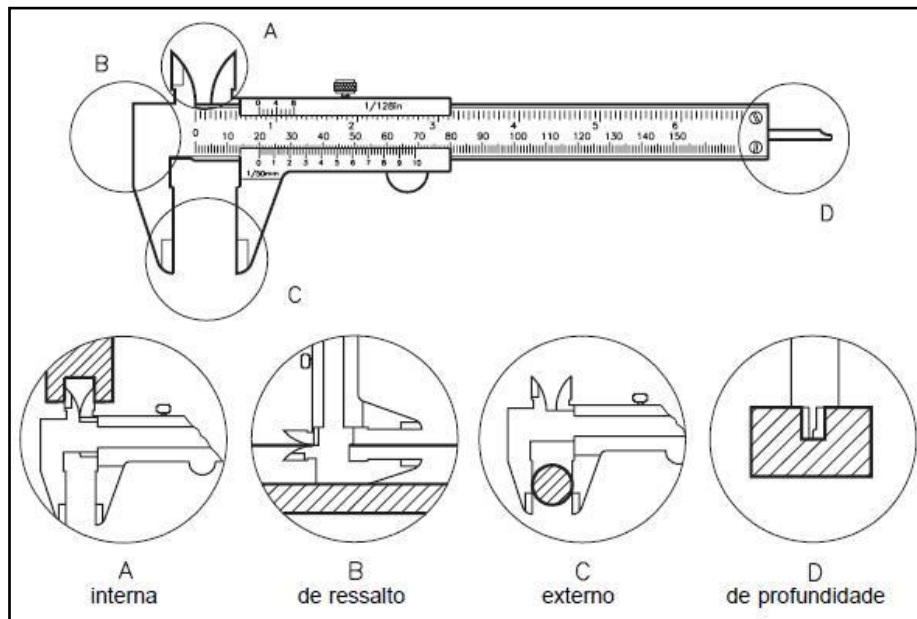


Figura 2.8 – Medições internas, externas, de ressalto e de profundidade

A versatilidade de medições apresentadas na Figura 2.8 aliada ao baixo custo do instrumento fez com que o paquímetro do tipo universal se tornasse um instrumento muito popular.

Há outras variedades de modelos, diferenciados quanto ao tipo de aplicação, custo e acuracidade de medição como: paquímetros com relógio indicador; de corpo cilíndrico; de profundidade; digital, especiais, prismáticos, entre outros.

2.1.3 Laser

Uma técnica de medição muito utilizada em sistemas de inspeção industrial é a 3D por triangulação laser, proposta inicialmente em sua geometria básica de sistema de medição à laser por Trucco e Verri (1998). Este sistema consiste na varredura por um feixe laser capaz de detectar diâmetros externos de peças com resolução abaixo de 0,001mm, conforme modelo utilizado. Dentre as principais vantagens estão a medição sem contato, excelente estabilidade térmica e auto calibração.

O sistema de medição laser permite a inspeção do diâmetro em processos onde outras tecnologias não podem ser aplicadas, como a inspeção contínua em saídas de extrusoras, medição de peças a altas temperaturas, inspeção em materiais frágeis ou que apresentam fino polimento de superfície.

A Figura 2.9 mostra o sistema de medição a laser:



Figura 2.9 – Sistema de Medição a Laser

O sistema a laser possui vantagens como observação direta de leitura instantânea, leitura máxima, leitura mínima, amplitude e média, sejam para tolerâncias de forma, orientação, posição ou batimento, sem a necessidade de análises complexas por parte do operador.

Conforme os transdutores e dispositivos utilizados para a medição, sua capacidade de leitura e processamento é dada em diversas unidades de leitura.

2.1.4 Projetor de Perfil

Com excepcional vantagem na medição de contornos, perfis complexos e dimensões de peças, principalmente as de pequenas dimensões, o projetor não necessariamente obriga o operador ser

qualificado, pois se trata de uma ferramenta de medição de fácil manuseio, usado cada vez mais no controle de peças fabricadas (KIEFFER, 1948).

Na Figura 2.10 mostra as partes que compõe um projetor de perfil:

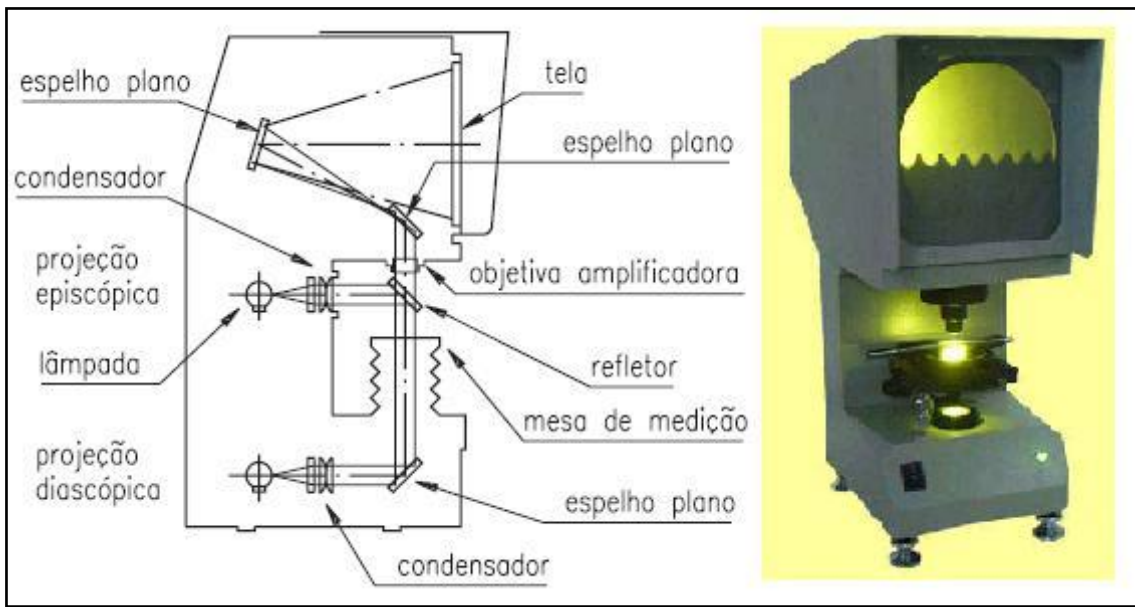


Figura 2.10 – Projetor de Perfil

A grande contribuição deste sistema de medição se dá pelas razões abaixo citadas:

- Em medições diretas suas projeções ampliadas são feitas por meio de escala, no caso de medições lineares, ou por meio de transferidores, no caso de medições angulares.
- Em medições comparativas, coloca-se um anteparo, sobrepondo à projeção, um desenho da peça, feito na escala correspondente à ampliação usada.
- Em controle de ajustagem de duas peças, projetando-se simultaneamente os contornos das peças que devem se corresponder.

As diferentes projeções são verificadas na Figura 2.11:

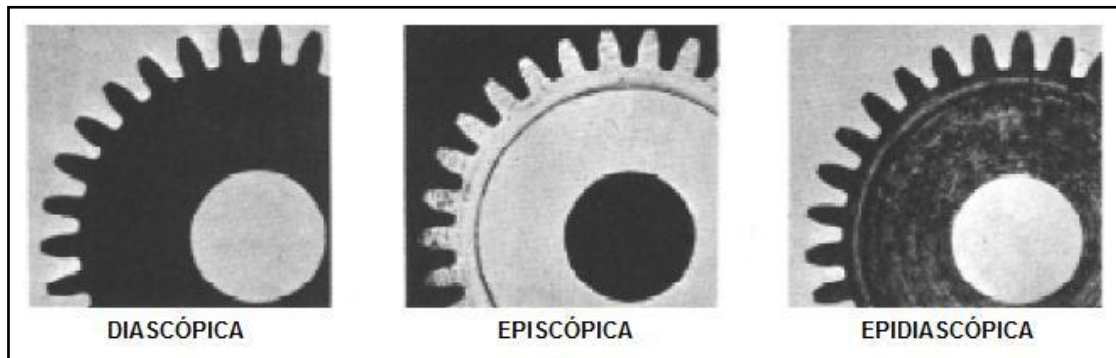


Figura 2.11 – Projeção Diascópica, Episcópica e Epidiascópica

A diferença entre as medições diascópica e episcópica se dá pelo fato de que na diascópica a iluminação incide na peça, de tal forma que o contorno da peça examinada é obtido como se fosse uma silhueta escura. Já na episcópica, a iluminação se concentra na superfície da peça, cujos detalhes superficiais ficam evidentes na tela.

Em medições de diâmetro, o projetor de perfil tem grande importância, principalmente na inspeção de diâmetros pequenos. Por outro lado, alguns erros de forma ou peças com diâmetros muito grandes não podem ser medidas no projetor.

2.1.5 Máquina de Medir por Coordenadas

As máquinas de medir por coordenadas (MMC) são usadas extensamente na maioria das indústrias, sendo hoje uma máquina de medição universal. A acuracidade de medição é da ordem de alguns micras, o que permite a realização de medições antes feitas por outros instrumentos (KUNZMANN e WÄLDELE, 1988).

Em geral as MMC's possuem mancais pneumáticos, embora existam algumas máquinas com guias de roletes ou esferas recirculantes. Os mancais pneumáticos permitem um movimento com mínimo de atrito, favorecendo alcançar elevado nível de acuracidade. Quanto aos medidores de deslocamento, tem-se o uso generalizado de

escalas eletro ópticas incrementais, operando com resoluções de 0,1 a 2 μm . Tais características lhes atribuem grande versatilidade e capacidade de medição.

As melhorias na flexibilidade e na exatidão, acopladas com diminuições de tempo e custo das medições, justificam a rápida aceitação dessas máquinas na metrologia industrial.

As máquinas de medir por coordenadas podem ser apresentadas em cinco tipos mais comuns e importantes no mercado: Ponte Móvel, Ponte Fixa, Cantilever, Braço Horizontal e Pórtico. No meio industrial destaca-se a Máquina de Medir do Tipo Ponte Móvel (NI e WÄLDELE, 1995).

A Figura 2.12 mostra uma MMC do Tipo Ponte Móvel:



Figura 2.12 – Máquina de Medir por Coordenadas do Tipo Ponte Móvel

Segundo Weckenmann, Knauer e Killmaier (2001), a definição da estratégia de medição, pode ter influência nos resultados das medições. Portanto, é essencial estudar a melhor estratégia de medição com a análise da geometria da peça a ser avaliada.

Os pontos coordenados da peça são obtidos através do sistema de medição denominado sonda. Inicialmente, dispunha-se somente de sondas rígidas: esferas, cones, discos e cilindros. Atualmente, sondas eletromecânicas ou apalpadores do tipo *touch-trigger* (Figura 2.13) são

os mais utilizados em MMC, proporcionando agilidade ao uso das máquinas de medir (ORREGO, DI GIACOMO e ABACKERLY, 2000).

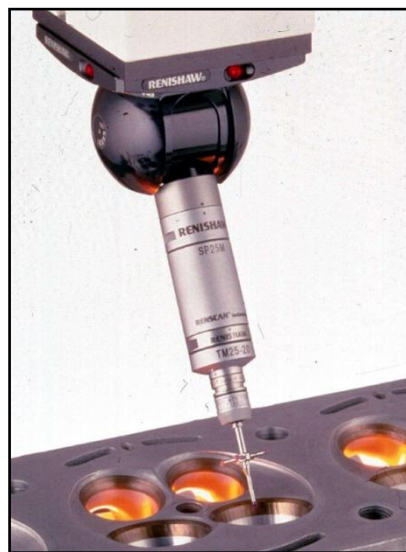


Figura 2.13– Apalpadores do Tipo *Touch-Trigger*

Embora tenha inúmeras qualidades, o custo da MMC é muito elevado e alguns modelos restringem-se às medições de desvios geométricos de peças, como por exemplo, erros de batimentos radiais ou possíveis ovalizações. Mesmo com um sistema de alta acuracidade, os resultados de suas medições podem ser influenciados por uma ampla fonte de erros (MIGUEL, KING e DAVIS, 1996).

2.2 Medição Indireta

Na medição indireta, o uso de um dispositivo de medição auxiliar é indispensável, visto que o resultado de medição é dado por comparação. Dentre os instrumentos mais utilizados, pode-se destacar:

2.2.1 Calibradores Expansíveis

Os calibradores expansíveis são instrumentos dedicados especialmente para medições de furos pequenos, os quais não podem ser medidos por micrômetros internos ou calibres telescópicos.

Estes calibres (Figura 2.14) possuem uma capacidade de medição entre 0 e 10mm, na grande maioria. Seu funcionamento é semelhante à

um micrômetro interno de 3 pontas, diferenciando-se na leitura, por não possuir uma escala no tambor.



Figura 2.14 – Calibres Expansíveis

Seu funcionamento se dá por comparação com o auxílio de micrômetros externos. Uma vez que o diâmetro do furo foi medido, o resultado será dado por comparação com um micrômetro externo.

Estes calibradores são muito utilizados em inspeções de diâmetros calibrados de peças seriadas, devido à rapidez e acuracidade de medição.

2.2.2 Calibradores Telescópicos

Calibradores telescópicos são muito utilizados para verificar dimensões e possíveis ovalizações em diâmetros internos de peças, pelo fato de ser um instrumento que constitui 2 pontas de contato, conforme mostra a Figura 2.15.



Figura 2.15 – Jogo de Calibres Telescópicos

Para realizar medições é necessário obter no mínimo quatro pontos distintos, intercalados em 90° , numa seção circular.

2.2.3 Micrômetro Interno Tubular

Composto de um elemento micrométrico e diversas extensões, o micrômetro tubular atende quase que somente a casos especiais, principalmente as grandes dimensões com hastes de extensão que variam de 25 a 2.000 mm. Estas podem ser acopladas umas às outras, variando em progressão aritmética de 25 mm de razão os seus tamanhos.

A Figura 2.16 ilustra o posicionamento para a medição.

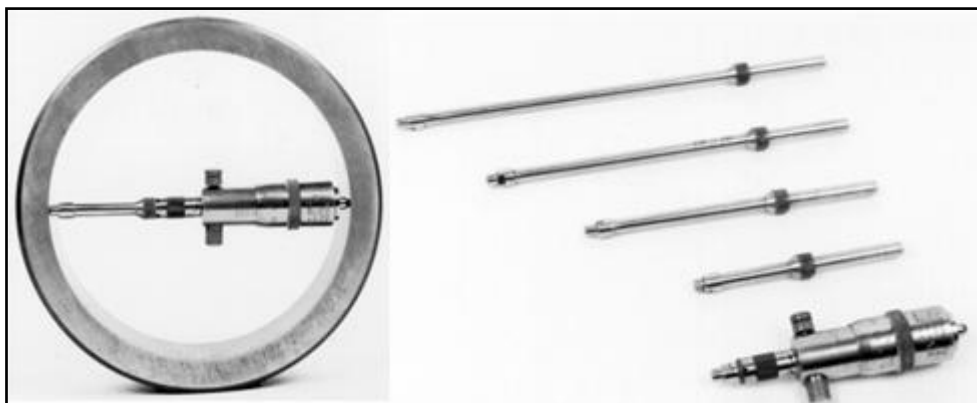


Figura 2.16 – Micrômetro Interno Tubular com hastes intercambiáveis

As extensões são compostas de tubos externos que protegem as “varetas” de medição propriamente ditas, feitas de aço ferramenta, retificadas com alta acuracidade de medição e com superfícies de contato lapidadas. Estas “varetas” estão recuadas para dentro de um tubo por meio de molas e deslocam-se para a posição de medição conforme rosqueia-se a extensão ao elemento micrométrico ou a outra extensão. Assim sendo, a força de atarraxar não exercerá nenhuma influência sobre o resultado de medição.

2.2.4 Medição Pneumática “Soléx”

O método de medição “Solex” consiste em transformar direta ou indiretamente as variações dimensionais de uma peça em variações de vazão de ar.

As variações de vazão são facilmente traduzidas em variações de pressão que podem ser observadas diretamente num manômetro.

O sistema de medição “Solex” visto na Figura 2.17, consiste basicamente em:

- Um controlador de pressão de ar chamado de micro-medidor, o que garante uma pressão inicial rigorosamente constante. Este dispositivo consiste num tubo T mergulhado num reservatório de água R até a profundidade H. Uma coluna ou tubo de líquido M é ligado ao reservatório, com uma escala métrica ou em polegadas, em que as variações dimensionais da peça medida são indicadas;
- Uma fonte de ar comprimido P, com a condição de pressão inicial P superior à pressão H;
- Um calibrador tampão, contendo os orifícios S1 e S2 com vazão constante de corrente de ar.

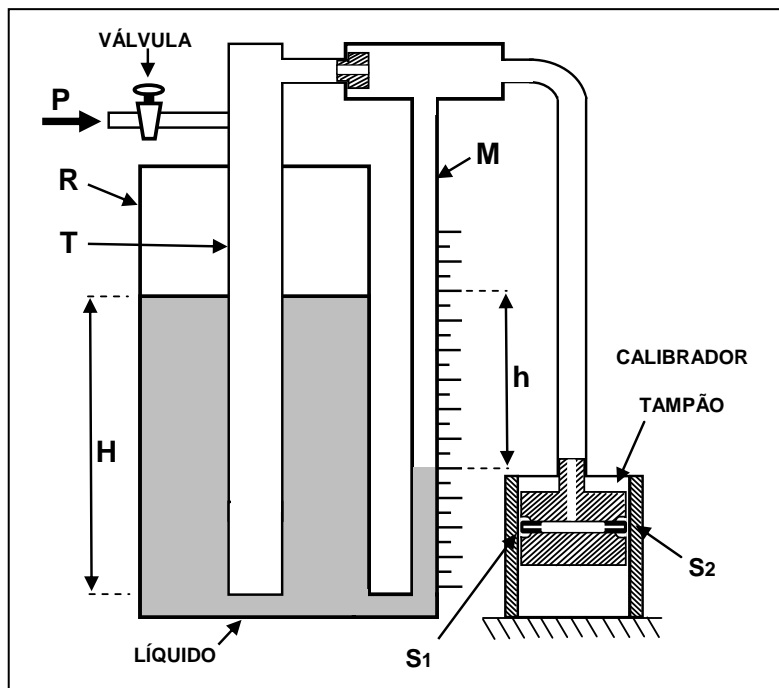


Figura 2.17 – Sistema de Medição Pneumático “Solex”

A altura do líquido na coluna é uma medição da variação de pressão resultante da fuga de ar entre um ou mais orifícios do calibrador tampão e a superfície do furo a ser medida. A variação da pressão do ar e consequente fuga ocorrem proporcionalmente à folga entre os diâmetros do calibrador tampão e sob inspeção. Se o diâmetro da peça é exatamente o tamanho nominal do calibrador, ou seja, o calibrador “corporifica” o furo sob inspeção, então a leitura será zero. Assim, o calibrador tampão (Figura 2.18) pode ser usado para explorar o diâmetro interno em qualquer posição. Se houver ovalização, conicidade ou outros erros todos serão indicados pela variação da pressão de ar e consequentemente pelo movimento do líquido da coluna.

A Figura 2.18 mostra um calibrador tampão pneumático:



Figura 2.18 – Calibrador Tampão Pneumático para Medições em Diâmetros Internos

O comparador pneumático é um sistema muito utilizado nas indústrias automotivas e metal mecânica em geral para checagem rápida em diâmetros internos, diâmetros externos, espessuras, entre outros.

2.2.5 Calibrador de Tesoura

Calibradores muito utilizados para medições de diâmetros internos em locais de difícil acesso. De fácil manuseio e barato, o calibrador de tesoura é projetado para medidas predefinidas, ou seja, não há intercambiabilidade dentro de uma faixa de alguns milímetros para outras medidas.

Na Figura 2.19, observa-se o calibrador aplicado na determinação do diâmetro interno na região do sulco de uma peça cilíndrica:

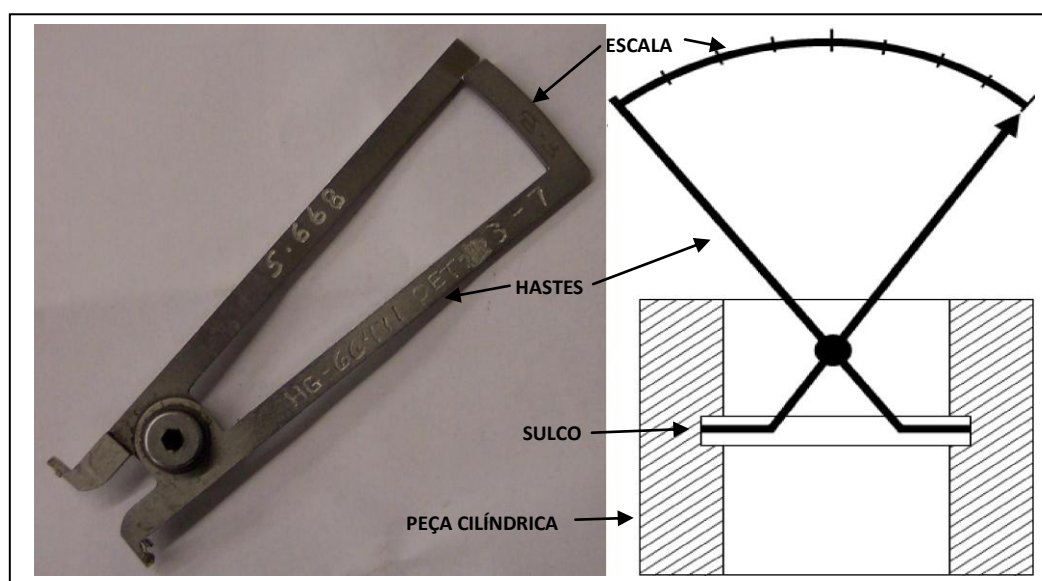


Figura 2.19– Calibrador Tipo Tesoura para Diâmetros Internos

A medição é realizada internamente ao objeto ou peça cilíndrica, de forma que a linha de medição esteja na região do sulco, o diâmetro é encontrado de forma que este seja o mais perpendicular possível em relação a linha de centro do furo da peça. Assim que as pontas de medição tocarem diametralmente na peça, haverá um deslocamento de uma das hastes da tesoura, sobre a escala de medição que apontará se o diâmetro está ou não aprovado. Pode-se dizer que é um calibrador do tipo passa/não passa.

O deslocamento medido na linha de medição é amplificado na escala de medição, o que torna o instrumento mais sensível (TARASEVICH, 1963).

2.2.6 Calibrador Tampão do Tipo Passa/Não Passa

O calibrador do tipo tampão é muito utilizado para medições em diâmetros internos, principalmente na fabricação seriada de peças, no qual o tempo para medição é de extrema importância.

Além de fácil utilização, o que dispensa qualificação do operador, é um dispositivo de medição com custo baixo, se comparado a quantidade de peças a serem controladas.

A Figura 2.20 mostra um calibrador Tampão:



Figura 2.20 – Calibrador Tampão do Tipo Passa/Não passa

O funcionamento do calibrador é muito simples: o lado passa deverá entrar totalmente no furo inspecionado. Já o lado não passa não deverá entrar no furo inspecionado e sim tocar dois pontos diametralmente opostos, sem que atravesse o diâmetro medido (PARKINSON, 1943).

O problema da medição utilizando calibradores, principalmente em peças fabricadas em escala de produção, são os possíveis erros de forma e textura superficial significativa das peças (NIELSEN, 2004).

2.2.7 Comparador de Diâmetro Interno

É um instrumento barato e de controle prático. Possui extensões intercambiáveis de medição, possibilitando a medição de peças com grandes profundidades. O instrumento não é de medição direta, sendo assim, o mesmo deve ser zerado usando contra calibradores ou micrômetros (KIEFFER, 1948).

O comparador de diâmetro interno (Figura 2.21) é composto de uma haste micrométrica acoplada a um relógio comparador.

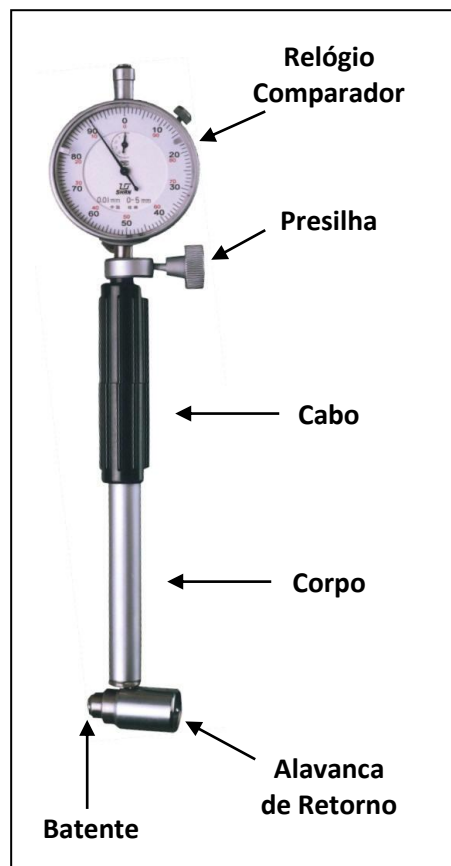
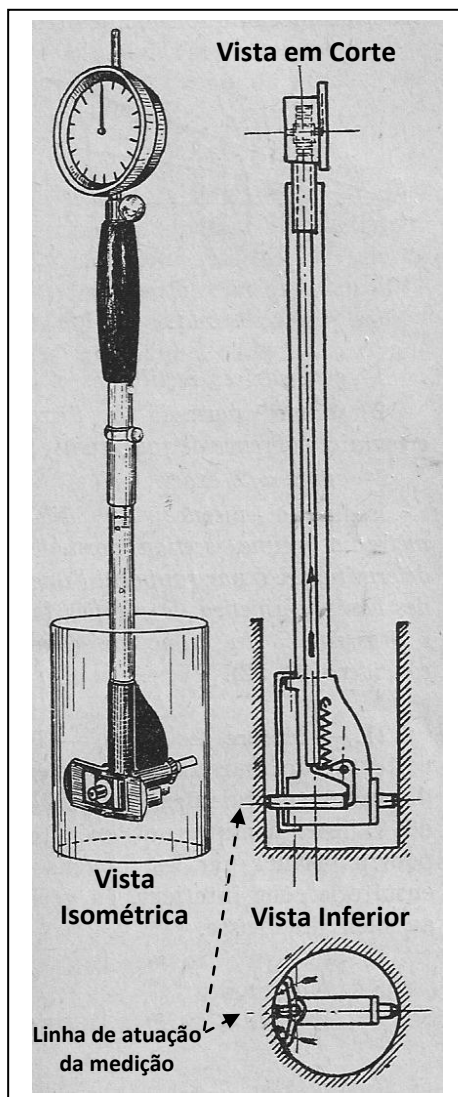


Figura 2.21 – Comparador de Diâmetro Interno

Mais popularmente conhecido como súbito, sua vantagem na medição é a capacidade de verificar ovalizações em furos, pelo fato de tocar a peça em apenas dois pontos diametralmente opostos. Alguns modelos tocam em três ou mais pontos, limitando o instrumento a apenas medir a dimensão do furo. É de fácil manuseio e apropriado

para comparação de diâmetros internos de peças em série e em grande quantidade.

A figura 2.22 mostra uma medição em cilindro utilizando-se o comparador de diâmetro interno, na qual se observa três vistas diferentes na medição.



Figuras 2.22 – Vistas Diferenciadas na Medição do Comparador de Diâmetro Interno

Esse arranjo permite a medição de ovalizações, se medido em diferentes pontos diametrais. A forma de medição correta ocorre quando a linha de atuação de medição é perpendicular à linha de centro do cilindro (COMPAIN, 1952). Nas três vistas apresentadas pode-se observar a posição correta de medição de uma peça cilíndrica.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS DE MEDIÇÃO

Em quaisquer métodos de medição, espera-se obter um resultado o mais fidedigno possível.

A análise de possíveis erros é indispensável para que não haja concepções errôneas sobre o resultado final de uma medição. Para auxiliar e organizar os resultados de uma análise de dados utiliza-se a estatística.

Principalmente em pesquisas, diante da quantidade de dados analisados, é extremamente difícil captar intuitivamente todas as informações que os dados contêm, sendo necessária a redução destas informações a tal ponto de interpretá-las mais claramente. Para tanto, utilizaremos a estatística descritiva.

A estatística descritiva é um número que sozinho descreve uma característica de um conjunto de dados. Trata-se, portanto, de um

número resumo que possibilita reduzir os dados a proporções mais facilmente interpretáveis (TOLEDO, 1978).

A seguir estão apresentados alguns dos fundamentos teóricos sobre erros, distribuição de frequências, medidas de posição, medidas de dispersão, medidas de assimetria e kurtosis, acuracidade, repetibilidade e resolução.

3.1 Teoria de Erros

Toda medição está sujeita a erros de diversas origens, seja do operador, do próprio instrumento, ou ainda do processo de medição. Quando se pretende medir o valor de uma grandeza, pode-se realizar apenas uma ou várias medidas repetidas, dependendo do procedimento ou metodologia de medição adotado. Em cada caso, deve-se extrair deste processo de medição um valor adotado como melhor na representação da grandeza e ainda um limite de erro dentro do qual deve estar compreendido o valor real.

Algumas grandezas possuem seus valores reais conhecidos e outras não. Quando conhecemos o valor real de uma grandeza e experimentalmente encontramos um resultado diferente, dizemos que o valor obtido está afetado de um erro.

Assim pode-se dizer matematicamente que:

$$\text{Erro} = \text{valor medido} - \text{valor convencional}$$

A seguir, serão definidos alguns tipos de erros:

3.1.1 Erros Sistemáticos

Segundo VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia), o erro sistemático é definido como:

Média que resultaria de um número infinito de medições de um mesmo mensurando teoricamente sob as mesmas condições subtraída do valor verdadeiro do mensurando.

Em outras palavras, o erro sistemático¹ é a parcela de erro sempre presente nas medições realizadas em idênticas condições de operação. Um dispositivo mostrador com seu ponteiro “torto” é um exemplo clássico de erro sistemático que sempre se repetirá enquanto o ponteiro estiver torto.

Pode tanto ser causado por um problema de ajuste ou desgaste do sistema de medição, quanto por fatores construtivos. Pode estar associado ao próprio princípio de medição empregado ou ainda ser influenciado por grandezas ou fatores externos, como as condições ambientais. O erro sistemático da indicação de um instrumento de medição é também denominado *Tendência*.

3.1.2 Erros Aleatórios

Segundo VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia), o erro aleatório é definido como:

Resultado da medição subtraído da média que resultaria de um número infinito de medições do mesmo mensurando teoricamente sob as mesmas condições.

Os erros aleatórios ocorrem devido a diversas causas incoerentes, bem como causas temporais que variam durante as observações sucessivas e que fogem a uma análise devido a sua imprevisibilidade. Podem ter várias origens, entre elas:

- Os instrumentos de medida;
- Pequenas variações das condições ambientais (pressão, temperatura, umidade, fontes de ruídos, etc.);
- Fatores relacionados com o próprio observador sujeitos as flutuações, em particular a visão e a audição.

¹ O erro sistemático é o erro subtraído do erro aleatório

A figura 3.1 a seguir mostra em um gráfico as diferenças entre o erro sistemático e o erro aleatório:

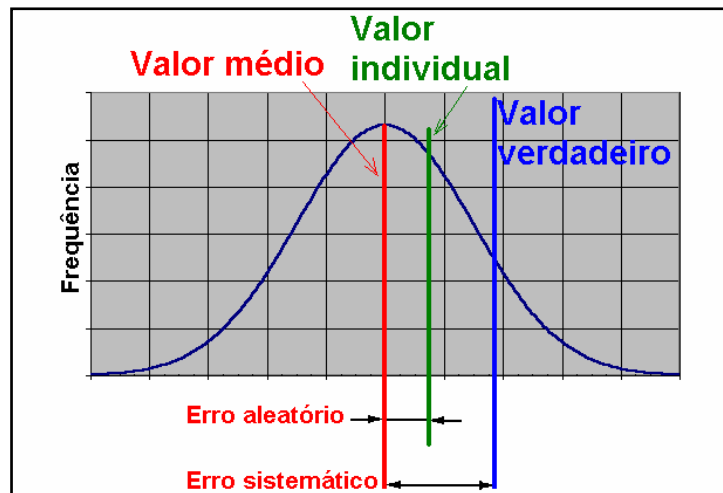


Figura 3.1 - Análise do Erro Aleatório e Erro Sistemático

3.1.3 Histerese

Histerese é um fenômeno não linear que ocorre em sistemas físicos, ou seja, diante de um fenômeno observado não há uma linearidade. A exemplo deste fato pode-se citar um deslocamento de ida e volta de um patim sobre uma guia linear. Por mais preciso que seja o ajuste, há uma pequena diferença em cada posição, se analisado os mesmos pontos na ida e volta do deslocamento.

A combinação de todos os erros seja sistemáticos, aleatórios ou histeréticos determinam o desvio total de uma determinada característica de qualidade. Portanto, é essencial prever erros nos projetos e controlá-los na fabricação, para que não haja perda de qualidade do produto final (AGOSTINHO, RODRIGUES, LIRANI, 1977).

3.1.4 Outros Erros

Grosseiros

O erro grosseiro também chamado erros ilegítimos, não são erros do ponto de vista de teoria de erros. Geralmente, são erros decorrentes da imperícia do operador (VUOLO, 1992). Pode ocorrer em função de leitura errônea, operação indevida, escolha errada de escalas, erros de

cálculos ou dano do instrumento. Seu valor é totalmente imprevisível, porém geralmente sua existência é facilmente detectável.

3.1.5 Acuracidade

Acuracidade é um conceito qualitativo que caracteriza o afastamento entre a estimativa final e o valor esperado de uma grandeza. Este conceito geralmente é associado a erros sistemáticos aditivos, resultantes de imperfeições instrumentais, observacionais, ambientais e teóricas, os quais provocam desvios regulares em todas as medidas.

3.1.6 Repetibilidade

A Repetibilidade é o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas, de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições: método de medição, observador, instrumento de medida, local, condições de utilização e em intervalo de tempo curto entre medições. A repetibilidade pode ser expressa quantitativamente em termos da dispersão dos resultados.

A figura 3.2 mostra as diferenças entre acuracidade e repetibilidade em relação à posição requerida.

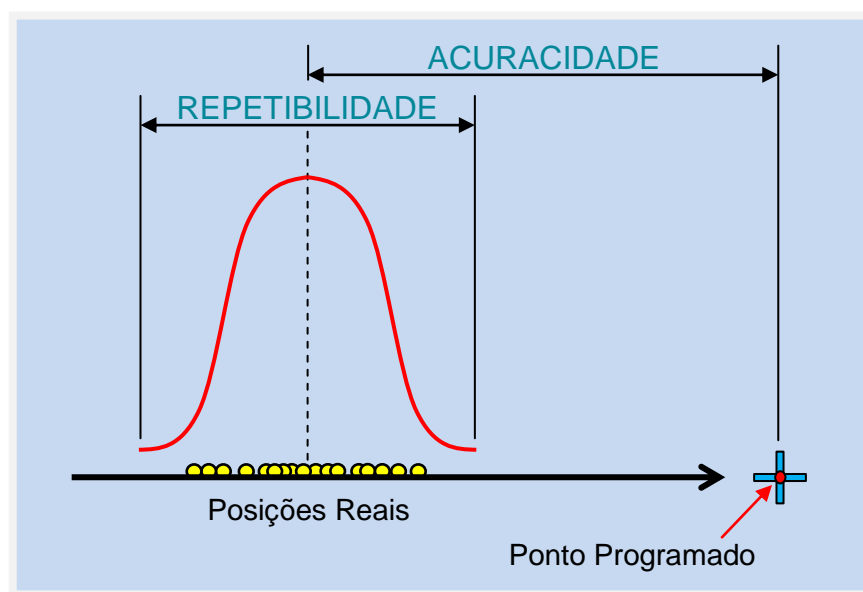


Figura 3.2 – Acuracidade e Repetibilidade

3.1.7 Resolução

Resolução é a expressão quantitativamente da aptidão de um instrumento para distinguir valores muito próximos da grandeza a medir sem necessidade de interpolação.

3.2 Medidas de Posição

Toda distribuição de frequências contém uma variedade de dados coletados em uma tabela, tornando as informações de uma forma clara e concisa ao estudo desejado. Ocorre, todavia, que poderia ser muito difícil trabalhar com a distribuição de frequências completa, razão pela qual se costuma lançar mão de determinadas medidas. Essas medidas resumem certas características importantes da distribuição de frequências. Há diversas medidas que possibilitam condensar as informações dentro da fase analítica da Estatística Descritiva (TOLEDO, 1978). Com isso, serão apresentadas neste tópico as medidas de posição, especialmente as de tendência central, ou seja, medidas nas quais se verifica uma tendência dos dados observados a se agruparem em torno dos valores centrais.

As medidas de posição vistas a seguir serão utilizadas em medidas de assimetria e kurtosis, posteriormente.

3.2.1 Média ou Média Aritmética

A média aritmética é a medida de tendência central mais comumente usada na estatística descritiva para resumir o conjunto de valores representativos dos erros de medição, podendo ser dividida em simples e ponderada.

A equação que define a média aritmética simples de um conjunto de números é igual ao quociente entre a soma dos valores dos conjuntos, conforme mostra a equação 3.1:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n} \quad [3.1]$$

Onde:

\bar{x} = média aritmética

x_i = valor genérico da observação

n = número de observações

A seguir será descrito as duas tendências centrais: a moda e a mediana que, juntas com a média aritmética representam as medidas de posição.

3.2.2 Moda (Mo)

Utilizado primeiramente por Karl Pearson em 1985, o termo Moda é outra medida de tendência central. Genericamente, pode-se definir a moda como o valor mais frequente, quando comparada sua frequência com a dos valores representados em um conjunto ordenado.

3.2.3 Mediana (Md)

Mediana é um valor real que separa o rol em duas partes deixando a sua esquerda o mesmo número de elementos que a sua direita. Portanto, é um valor que ocupa a posição central em uma série.

A mediana é a terceira medida da tendência central e pode ser definida como o valor que divide uma série ordenada de tal forma que pelo menos a metade ou cinquenta por cento dos itens sejam iguais ou maiores do que ela. A mediana é considerada uma separatriz, por ser um promédio que divide a distribuição ou conjunto de dados em partes iguais. Trata-se de uma medida muito utilizada na análise de dados estatísticos, especialmente quando se atribui pouca importância aos valores extremos da variável.

3.2.4 Relação Empírica e Características entre a Média, a Moda e a Mediana

Karl Pearson desenvolveu uma fórmula empírica de relação entre a média, a moda e a mediana. Para que esta relação se verifique, algumas considerações foram feitas:

- A distribuição (curva) de frequências deve ser unimodal;
- A distribuição de frequências deve ser assimétrica;
- O número de observações deve ser suficientemente grande e a escala de unidades que divide a distribuição deve ser pequena.

Assim, tem-se a seguinte relação 3.2:

$$\bar{x} - M_o = 3(\bar{x} - M_d) \quad [3.2]$$

Para calcular cada medida a partir desta relação, têm-se as seguintes expressões:

$$\bar{x} = \frac{3M_d - M_o}{2} \quad [3.3]$$

$$\bar{x} - M_o = 3(\bar{x} - M_d) \quad [3.4]$$

$$M_o = 3M_d - 2\bar{x} \quad [3.5]$$

$$M_d = \frac{2\bar{x} + M_o}{3} \quad [3.6]$$

A média aritmética é preferível às demais medida para estimar a tendência central, quando se trata de muitas classes de populações, por haver menos variabilidade entre as médias aritméticas calculadas a partir de várias amostras aleatórias do que entre as medianas e a moda.

A média aritmética pode ser calculada através dos dados brutos, sem recorrer a qualquer agrupamento ou ordenação de valores originais, o que não ocorre com a mediana e a moda.

A mediana é preferível a média quando há interesse em conhecer exatamente o ponto médio da distribuição, aquele valor que a divide em duas partes exatamente iguais.

A moda é utilizada essencialmente quando se pretende obter uma medida rápida e aproximada da tendência central.

3.3 Medidas de Dispersão

É importante ressaltar que a análise completa dos dados requer não apenas sua apresentação através de gráficos e tabelas ou o cálculo de medidas de posição. Caracterizar um conjunto de valores apenas através de uma média é inadequado, uma vez que todos os dados diferem entre si, em maior ou menor grau.

Se uma determinada análise estatística fosse aplicada a produção de peças utilizando só a média, poderia ocorrer falta de informações importantes ao controle do processo. Uma vez que os dois turnos de produção, o turno de dia chamado de TA e turno da noite chamado de TB, por exemplo, possui uma média igual. O desempenho do turno A pode ser muito superior a do turno B, ou seja, o TA pode produzir peças regularmente durante todos os dias em uma semana, já o TB poderá iniciar a semana produzindo muito mais e terminar a mesma com a produção em baixa.

Se esta mesma análise fosse feita em dimensionais das peças, poderia revelar dados importantes como mau funcionamento de máquinas, improdutividade de funcionários, entre outros aspectos.

Assim, é necessário que a média esteja acompanhada de uma medida de dispersão e para avaliar o grau de variabilidade ou dispersão dos valores de um conjunto de números, são utilizadas as medidas de dispersão, proporcionando um conhecimento mais completo do fenômeno analisado, permitindo estabelecer comparações entre

fenômenos de mesma natureza e mostrando até que ponto os valores se distribuem acima ou abaixo da tendência central.

3.3.1 Desvio Padrão (S)

É a medida de dispersão mais empregada, pois leva em consideração a totalidade dos valores da variável em estudo. É um indicador de variabilidade bastante estável. O desvio padrão baseia-se nos desvios em torno da média aritmética e a sua fórmula básica pode ser traduzida como: a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios, conforme mostra a equação 3.7:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad [3.7]$$

Onde:

s = desvio padrão

x_i = valor genérico da observação

\bar{x} = média

A equação acima é empregada quando se trata de uma população de dados não-agrupados. Porém, quando o desvio padrão representar uma descrição da amostra e não da população, caso mais frequente em estatística, o denominador da expressão será igual a $n - 1$, conforme equação 3.8:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [3.8]$$

3.3.2 Variância (S^2)

Variância é o quadrado do desvio padrão. Assim, se os dados são populacionais ou amostrais a equação 3.9 é definida por:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad [3.9]$$

3.4 Medidas de Assimetria (Skewness) e Curtose (Kurtosis)

As medidas de assimetria e curtose, juntamente com as medidas de posição e de dispersão, vistas anteriormente, proporcionam a descrição e compreensão completa da distribuição de frequências.

As distribuições de frequências não diferem apenas quanto ao valor médio e a variabilidade, como também quanto à sua forma. Portanto, as características mais importantes são o grau de deformação ou assimetria e o grau de achatamento ou afilamento da curva de frequências.

Para conhecer as medidas de assimetria e curtose, é necessário o conhecimento de momentos.

3.4.1 Momentos

Os momentos podem ser caracterizados como quantidades numéricas calculadas a partir de uma distribuição de frequências ou de probabilidades, e que são utilizadas para fornecer descrições resumidas da distribuição estudada. Dentro da ampla classe de momentos encontram-se duas importantes medidas: a média e a variância.

Momento Natural (Absoluto) de Ordem r

O momento natural de ordem r de um conjunto de números é definido da seguinte forma:

- Para Dados Brutos:

$$m'_r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^r}{n} \quad [3.10]$$

- Para Dados Tabelados:

$$m'_r = \frac{\sum_{j=1}^k x_j^r f_j}{n} \quad [3.11]$$

Onde:

m' = momento natural de ordem r

r = número inteiro positivo

Para um conjunto de números x , têm-se os momentos naturais de primeira, segunda, terceira e quarta ordens.

Primeiro Momento Natural ou de primeira ordem:

$$m'_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^1}{n} \quad [3.12]$$

O momento natural de primeira ordem é a própria média aritmética.

$$m'_1 = \bar{x} \quad [3.13]$$

Segundo Momento Natural ou de segunda ordem:

$$m'_2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} \quad [3.14]$$

Terceiro Momento Natural ou de terceira ordem:

$$m'_3 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^3}{n} \quad [3.15]$$

Quarto Momento Natural ou de quarta ordem:

$$m'_4 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^4}{n} \quad [3.16]$$

Momento Centrado na Média de Ordem r

O momento de ordem r centrado na média \bar{x} é definido da seguinte forma:

- Para Dados Brutos:

$$m_r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^r}{n} \quad [3.17]$$

- Para Dados Tabelados:

$$m_r = \frac{\sum_{j=1}^k (x_j - \bar{x})^r f_j}{n} \quad [3.18]$$

Onde:

m_r = momento de ordem r centrado na média

3.4.2 Assimetria (Skewness)

Estas medidas referem-se à forma da curva de uma distribuição de frequência, mais especificamente do polígono de frequência ou do histograma.

Denomina-se assimetria o grau de afastamento de uma distribuição da unidade de simetria.

Em uma distribuição simétrica, tem-se igualdade dos valores da média, mediana e moda, ou seja, apresentam um mesmo valor, ou ainda, coincidem num mesmo ponto.

Por outro lado, na distribuição assimétrica a média, mediana e a moda recaem em pontos diferentes da distribuição, isto é, apresentam valores diferentes, onde o deslocamento desses pontos pode ser para a direita ou para a esquerda. Quanto ao grau de deformação, a curva de frequência pode ser:

- *Curva de Frequências Simétrica (Figura 3.3): sem deformação.*
- *Curva de Frequências Assimétrica à Direita (Figura 3.4): deformação positiva.*
- *Curva de Frequências Assimétrica à Esquerda (Figura 3.5):: deformação negativa.*

Simétrica: $\bar{x} = M_d = M_o$

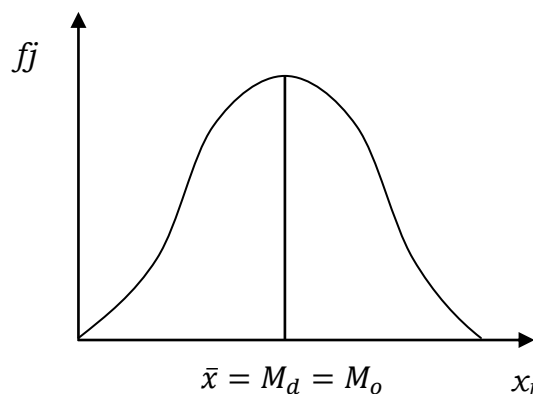


Figura 3.3 – Curva de Frequências Simétrica

Na curva de frequência simétrica apresenta como característica as três medidas de tendência centrais mais usadas, moda, média aritmética e mediana serem iguais.

Assimétrica à Direita: $M_o < M_d < \bar{x}$

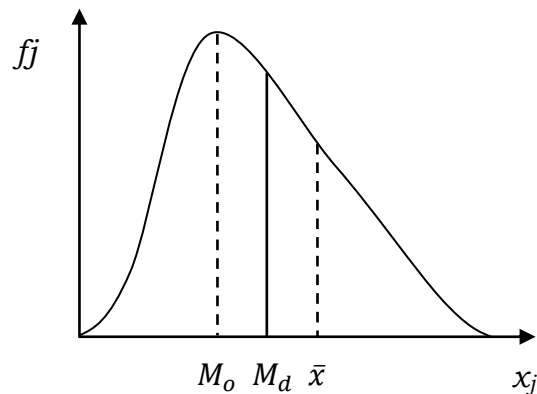


Figura 3.4 – Curva de Frequências Assimétrica à Direita

Na curva de frequência assimétrica à direita há uma predominância de valores superiores à moda.

Assimétrica à Esquerda: $\bar{x} < M_d < M_o$

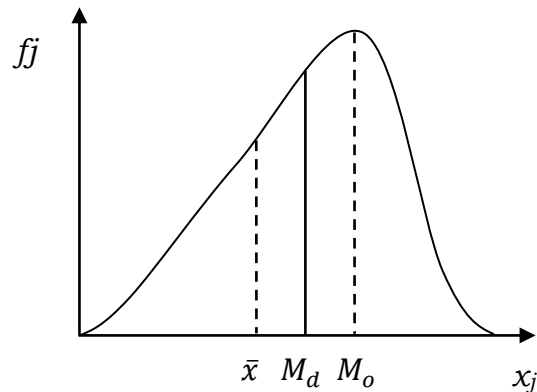


Figura 3.5 – Curva de Frequências Assimétrica à Esquerda

Na curva de frequência assimétrica à esquerda há uma predominância de valores inferiores à moda.

Toda distribuição deformada é sempre assimétrica. Entretanto, a assimetria pode dar-se na cauda esquerda ou na direita da curva de frequências.

Existem várias fórmulas para o cálculo do coeficiente de assimetria. As mais utilizadas são:

- Primeiro Coeficiente de Assimetria de Pearson:

$$e_1 = \frac{\bar{x} - M_o}{s} \quad [3.19]$$

Onde:

e_1 : grau de assimetria

M_o : valor modal (moda)

s : Desvio padrão

\bar{x} : Média S

- Segundo Coeficiente de Assimetria de Pearson:

$$e_2 = \frac{3 (\bar{x} - M_d)}{s} \quad [3.20]$$

Quando

$e = 0$, diz-se que a distribuição é simétrica.

$e > 0$, diz-se que a distribuição é assimétrica positiva (à direita)

$e < 0$, diz-se que a distribuição é assimétrica negativa (à esquerda)

3.4.3 Curtose (Kurtosis)

A curtose indica até que ponto a curva de frequências de uma distribuição se apresenta mais afilada ou mais achatada do que uma curva padrão, denominada curva normal. De acordo com o grau de curtose, há três tipos de curvas de frequências quando observada a concentração de valores em torno de sua moda:

- *Curva ou Distribuição de Frequências Mesocúrtica*

Se a curva de frequências apresentar um grau de achatamento, equivalente ao da curva normal será denominada curva mesocúrtica, conforme

figura 3.6:

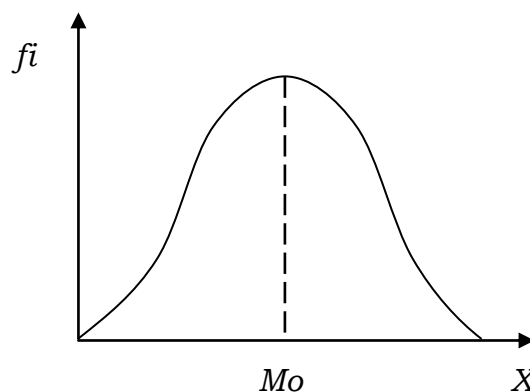


Figura 3.6 – Curva de Frequências Normalmente Achatada (Mesocúrtica)

- *Curva ou Distribuição de Frequências Platicúrtica*

Se a curva de frequências apresentar um alto grau de achatamento, superior ao da curva normal será denominada curva platicúrtica, conforme figura 3.7:

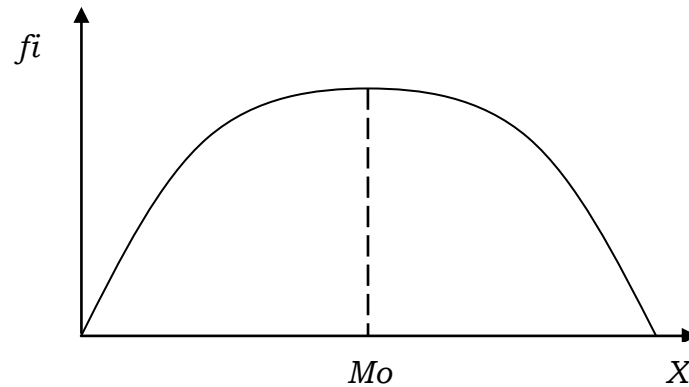


Figura 3.7 – Curva de Frequências Excessivamente Achatada (Platicúrtica)

- *Curva ou Distribuição de Frequências Leptocúrtica*

Se a curva de frequências apresentar um alto grau de afilamento, superior ao da curva normal será denominada curva leptocúrtica, conforme figura 3.8:

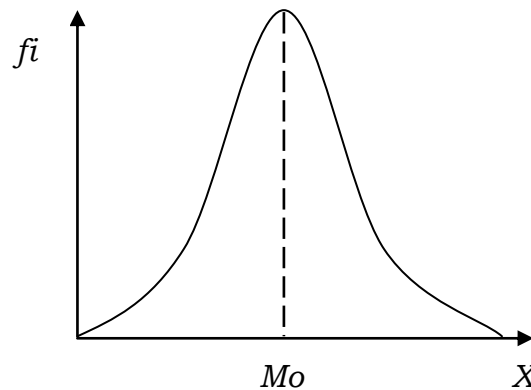


Figura 3.8 – Curva de Frequências Excessivamente Afilada (Leptocúrtica)

Para avaliar o grau de curtose de uma curva de distribuição de frequências, há dois tipos de medidas:

Coefficiente Percentílico de Curtose

É a medida mais elementar usada para avaliar o grau de curtose de uma distribuição ou curva de frequências, definido pela expressão:

$$k = \frac{D_q}{C_{90} - C_{10}} \quad [3.21]$$

Onde:

k : coeficiente percentílico de curtose

D_q : desvio quartílico

C_{90} : nonagésimo centil

C_{10} : décimo centil

Se:

$k = 0,263$: a curva ou distribuição é mesocúrtica

$k > 0,263$: a curva ou distribuição é platicúrtica

$k < 0,263$: a curva ou distribuição é leptocúrtica

Coefficiente Momento de Curtose:

É a medida dada pelo quociente entre o momento centrado de quarta ordem e o quadrado do momento centrado de segunda ordem (variância), conforme expressão:

$$b_2 = \frac{m_4}{m_2^2} \quad [3.22]$$

ou

$$b_2 = \frac{m_4}{s_4} \quad [3.23]$$

Onde:

b_2 : coeficiente momento de curtose

m_4 : momento centrado de quarta ordem

m_2 : momento centrado de segunda ordem

s_4 : variância

3.5 Incerteza de Medição

Quando se obtém um resultado de medição, é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou numa norma. Esse acréscimo ao resultado de medição é a incerteza de medição.

Segundo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (2003), a incerteza de medição pode ser definida como sendo o parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser atribuídos ao mensurando. Tal parâmetro pode ser o desvio padrão ou múltiplo dele ou a metade de um intervalo correspondente a um dado nível de confiança.

A incerteza associada a um resultado pode ser especificada em incerteza padrão, incerteza padrão combinada e incerteza expandida. Para este trabalho será visto apenas a incerteza padrão do tipo A e do tipo B.

3.5.1 Incerteza de Medição Padrão

De acordo com os métodos usados para determinar o valor numérico das incertezas, estas podem ser classificadas em incertezas do Tipo A e incertezas do Tipo B.

- INCERTEZA PADRÃO DO TIPO A

Quando as componentes podem ser calculadas por meios estatísticos e seu valor descreve a dispersão da série de medições, esta avaliação de incerteza é do tipo A. Neste caso, a média dos valores obtidos em um dado experimento é a estimativa do mensurando e a raiz quadrada da variância é a incerteza padrão associada ao estimador.

O desvio padrão caracterizando uma componente de uma avaliação tipo A é chamado de incerteza padronizada tipo A e é obtido de uma função densidade probabilidade derivada da observação de uma distribuição de frequência (LIRA, 2001).

Quando o componente de n medições representam uma amostra, a incerteza padrão do tipo A é determinada pela equação:

$$u = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [3.24]$$

Onde:

u = incerteza padrão

x_i = valor genérico da observação

\bar{x} = média

- INCERTEZA PADRÃO DO TIPO B

É denominada incerteza do tipo B, quando a incerteza é estimativa de uma grandeza que não tenha sido obtida por observações repetidas e sim através de considerações de efeitos físicos que afetam os resultados (Piratelli, 1997; Decker e Pekelsky, 1999).

O conjunto de informações pode ser obtido através de dados do fabricante, dados fornecidos por certificados de calibração, referências de manuais de instrução, dados provenientes de medidas prévias, resultados de medições anteriores, experiência ou do comportamento do instrumento.

Segundo LINK (1997), em uma avaliação do tipo B, é necessário considerar e incluir, pelo menos, os originários das seguintes fontes: incerteza associada ao padrão de referência e qualquer instabilidade em seu valor ou indicação; incerteza associada ao equipamento de medida ou calibração; incerteza associada ao equipamento a ser medido ou calibrado; incerteza associada ao procedimento de calibração e a

incerteza associada ao efeito das condições ambiente em um ou mais dos itens acima.

3.6 Distribuição Normal de Probabilidade

A quantificação de uma fonte de incerteza inclui a fixação de um valor e a determinação da distribuição a qual se refere este valor. As distribuições mais comuns são a normal, retangular e triangular (SCHMID; MARTÍNEZ, 2004).

A distribuição de probabilidade contínua mais importante e mais utilizada é a distribuição normal, geralmente citada como curva normal ou curva de Gauss (Figura 3.9). Sua importância em análise estatística resulta do fato de que muitas técnicas estatísticas, como análise de variância, de regressão e alguns testes de hipótese, assumem e exigem a normalidade dos dados. Além disso, a ampla aplicação dessa distribuição vem em parte devido ao teorema do limite central. Este teorema declara que na medida em que o tamanho da amostra aumenta, a distribuição amostral das médias amostrais tende para uma distribuição normal (Triola, 1998).

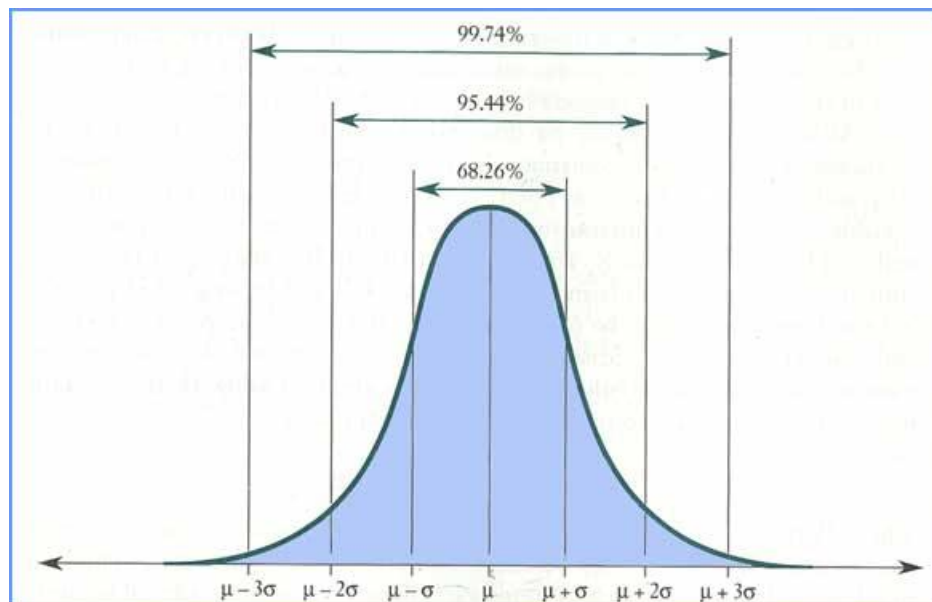


Figura 3.9 – Curva de Distribuição Normal de Probabilidades (Gaussiana)

A figura 3.9 mostra a curva da distribuição normal de probabilidades, a qual possui a forma de um sino simétrico em relação à média. Esta distribuição é descrita matematicamente através da função densidade de probabilidade, expressa pela equação:

$$Y = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(q-\bar{x})^2}{2s^2}} \quad [3.25]$$

onde:

- \bar{x} = média;
- s = desvio padrão

Na curva de distribuição, as linhas verticais representam os desvios padrões. A um desvio padrão, tem-se 68,26% das observações contidas. A dois desvios padrões, tem-se 95,44% dos dados compreendidos e finalmente a três desvios, tem-se 99,74%. A análise da curva permite a conclusão lógica do que se observa na prática: as ocorrências tendem a concentrar-se em torno de uma média e se tornam mais raras ou menos prováveis à medida que dela se afastam.

A distribuição mais usada para calcular a incerteza padrão é a normal (gaussiana), pois é geralmente utilizada para descrever erros experimentais. Entretanto, existem outros tipos de distribuições de probabilidade mais simples que a normal como a trapezoidal, a retangular e a triangular, usadas onde o intervalo é bem definido, mas a distribuição de erros não é bem conhecida.

A Figura 3.10 ilustra as curva de distribuição trapezoidal, retangular e triangular, onde μ_t é a média da distribuição.

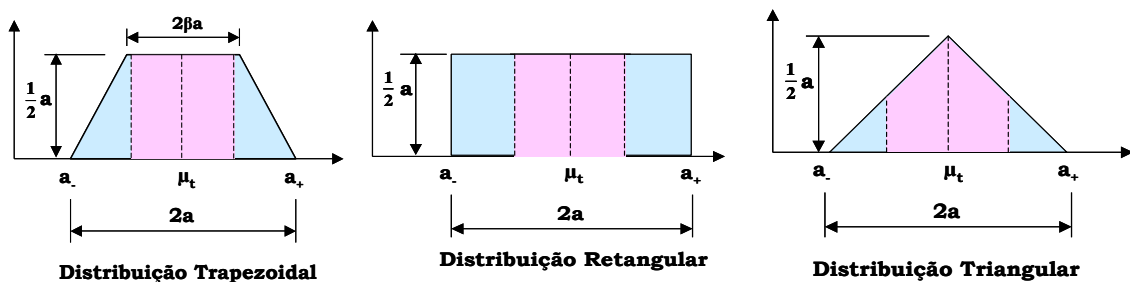


Figura 3.10 – Distribuições de Probabilidade

A distribuição retangular é utilizada na ausência de qualquer informação.

3.7 Método dos Mínimos Quadrados

Quando se deseja construir uma curva de calibração costuma-se fazer a suposição, perfeitamente razoável, de que a curva deve passar “o mais perto possível” dos pontos experimentais. O modo mais empregado de obter corretamente essa máxima proximidade é o método dos mínimos quadrados, que fornece resultados não tendenciosos e com variância mínima, dentro de certas suposições de natureza estatística. O método dos mínimos quadrados é também chamado de Princípio de Gauss.

Segundo Fonte (1994), “ um caso em que se aplica a teoria dos mínimos quadrados é a regressão linear, que experimenta adaptar a um conjunto de pontos e valores dados, a melhor reta, que neste caso será a reta que minimiza a soma quadrática das diferenças entre os valores dados aos valores da reta, nesses pontos”.

Para superar a dificuldade de sinais opostos e minimizar a soma dos quadrados dos desvios, conforme mostra a equação 3.26:

$$\sum_{i=1}^m d_i^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad [3.26]$$

Supondo que de uma observação de dados, escolhe-se \bar{y} como sendo uma função linear, então $\bar{y} = ax + b$ torna-se uma função quadrática dos parâmetros a e b, conforme mostra a equação 3.27:

$$\sum_{i=1}^m d_i^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - a - bx_i)^2 \quad [3.27]$$

Os métodos de cálculo permitem encontrar os valores de a e b que minimizam esta expressão.

3.7.1 Regressão Linear

A Figura 3.11 mostra gráfico obtido com os dados x e y da tabela:

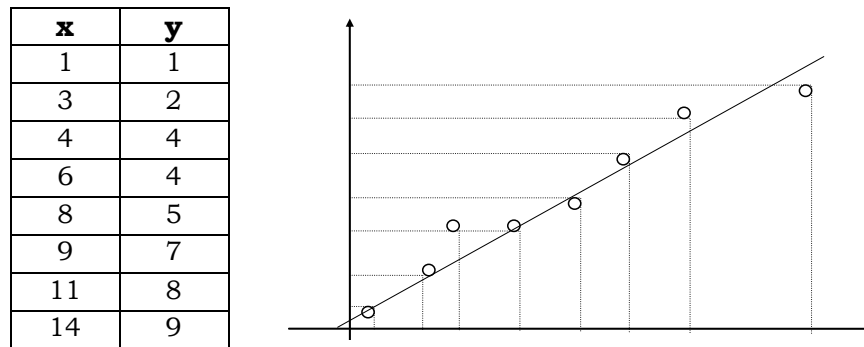


Figura 3.11 – Gráfico de Regressão Linear dos Valores x e y Tabelados

Levando em conta os erros experimentais de natureza estatística e supondo uma relação linear entre x e y tem-se a seguinte equação da reta:

$$ax + by = l \quad [3.28]$$

A questão é determinar os melhores valores para os coeficientes a e b , ou seja, aqueles que minimizam a soma dos quadrados dos desvios.

Supondo que as somas se estendam sobre todos os pontos de dados, têm-se as seguintes equações:

$$a_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad [3.29]$$

$$a_1 = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad [3.30]$$

Além disso, os denominadores desaparecem apenas se os x_i

forem idênticos.

Aos valores de a_0 e a_1 , quando usados na equação 3.31 produzem a curva linear de ajuste por mínimos quadrados. Esta equação é também conhecida como regressão linear de y em x .

$$y = a_1x + a_0 \quad [3.31]$$

Para o cálculo dos valores de a_0 e a_1 , é necessário calcular a somatória dos valores x_i , y_i , x_i^2 , e dos produtos $x_i y_i$ (Tabela 3.4), a partir dos dados de x e y , mostrados na Tabela da Figura 3.11.

	x	y	x²	xy
	1	1	1	1
	3	2	9	6
	4	4	16	16
	6	4	36	24
	8	5	64	40
	9	7	81	63
	11	8	121	88
	14	9	196	126
Soma	56	40	524	364

Tabela 3.1 – Somatória dos Valores x_i , y_i , x_i^2 , e dos Produtos $x_i y_i$

Assim, a equação da reta dos mínimos quadrados será:

$$y = \frac{7}{11}x + \frac{6}{11} \quad \text{ou} \quad 11y - 7x = 6 \quad [3.32]$$

CAPÍTULO 4

SISTEMA AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO

O sistema automatizado de medição aqui apresentado foi desenvolvido para a medição de diâmetros internos. São apresentadas algumas características do sistema proposto como: a eficiência do uso de transdutores lineares aplicados a um robô industrial, a intercambiabilidade e rapidez do sistema de medição para produções de peças seriadas e a medição de diferentes diâmetros.

O aumento do uso de robôs na indústria moderna, em processos de manufatura e controle de qualidade e em laboratórios de ensino e pesquisa é uma realidade. Com a utilização de robôs, é possível minimizar erros de medições inerentes ao operador. Em consequência à esta diminuição de erros, há um aumento significativo da eficiência da medição de peças seriadas.

Lee e Park (2000) utilizaram robôs e desenvolveram algoritmos para inspeção de peças de forma livre por varredura a laser. Boillot e Uota (2002) utilizaram a medição com braço robótico e sensor óptico

laser para a verificação de cordões de solda em carrocerias de veículos automotores. Picard (2002) desenvolveu um algoritmo para avaliar e corrigir o posicionamento na montagem de partes de veículos através de robôs. Paziani (2005) utilizou um robô articulado como base de um sistema dedicado e automatizado de medição de erros de reticidade e circularidade.

Neste trabalho, um robô articulado foi utilizado para medir diâmetros com ajuda de um artefato porta sensores de medição. Um dispositivo porta peças foi projetado para posicionar os anéis de teste e anel padrão na medição dos diâmetros internos.

As características de posicionamento de um robô industrial não são adequadas para que sejam feitas medições com alta precisão, ou seja, a repetibilidade do robô para estas aplicações não é boa o suficiente. No entanto, a metodologia proposta neste trabalho utiliza transdutores do tipo LVDT e um programa computacional e uma nova concepção de sistema que viabiliza a medição de diâmetros internos com auxílio de um robô industrial, sem que a repetibilidade do robô interfira nos resultados de medição.

Um dispositivo contendo dois transdutores indutivos de deslocamento foi utilizado para a realização da medição comparativa entre um anel padrão e anéis de teste.

Um programa computacional foi desenvolvido de forma que o resultado da medição fosse obtido através da comparação dos anéis de medição com o anel padrão.

Este procedimento é análogo à medição indireta com o uso do comparador de diâmetros internos, conhecido como *súbito*.

4.1 Posicionamento dos Sensores

O robô utilizado neste trabalho é do tipo articulado da marca ABB e serviu como base do sistema para medição de diâmetros internos.

A movimentação do robô até a peça se deu partindo de um ponto determinado como origem. Com os sensores de deslocamento já posicionados dentro da peça, são realizados movimentos de translação no plano perpendicular ao furo e assim determina-se o diâmetro da peça.

4.2 O Artefato Porta Sensores, Porta Peças e Anéis de Medição

Todos os artefatos mecânicos e anéis de medição foram projetados com auxílio de programas computacionais comerciais tendo como objetivo o baixo custo das peças, a facilidade da montagem mecânica dos anéis na mesa de medição e a agilidade no ajuste de dispositivo para medições de diferentes diâmetros internos.

O artefato porta sensores foi projetado a fim de posicionar os sensores de deslocamento utilizados para referência do anel padrão e medição dos anéis de teste. A disposição dos sensores de deslocamento foi definida de forma que os sensores toquem pontos diametralmente opostos.

Os anéis de testes foram construídos geométrica e dimensionalmente parecidos com o anel padrão, para que não houvesse grandes diferenças no posicionamento durante a troca de peças para medição, porém, foram fabricados propositalmente com diâmetros internos diferentes.

O artefato porta peças foi projetado para determinar a posição do anel medido. A geometria do artefato garante que a posição de centro

dos anéis, após a troca com outro anel para medições, seja aproximadamente a mesma, uma vez que os diâmetros externos dos anéis de teste e anel padrão são fabricados com dimensões iguais. Uma mesa de granito garantiu a fixação deste artefato.

Os perfis de circularidade do diâmetro externo dos anéis de teste e anel padrão não interferem no resultado final das medições devido à aplicação da medição diferencial dos transdutores.

4.3 As Interfaces de Controle e Medição

A interface de medição consiste de dois sensores indutivos de deslocamento do tipo LVDT e de uma coluna de medição Tesa TT500 utilizada para transmitir os dados provenientes dos sensores de deslocamento para uma placa de aquisição de dados do tipo AD.

A interface de controle consiste de uma placa conversora de sinais de tensão AD/DA obtidos dos transdutores de deslocamento. A placa de aquisição AQB11/12 converte dados da coluna de medição vindos dos transdutores e permite a realização da comunicação entre o microcomputador e o robô para controle de posicionamento.

4.4 O Programa Computacional para o Sistema de Medição

Um programa computacional foi desenvolvido em ambiente *Delphi*, para realizar a comunicação entre o microcomputador e o sistema de controle do robô através de uma placa de aquisição do tipo AD/DA. Assim, foi feita a aquisição de dados provenientes do robô e dos transdutores, respectivamente.

A programação do robô foi desenvolvida em conjunto com o programa computacional em linguagem Delphi, de forma que os dados obtidos pelos sensores de deslocamento do tipo LVDT auxiliam na

programação para determinar a maior distância entre dois pontos na circunferência interna dos anéis medidos.

4.5 Análises, Simulações e Testes Experimentais

A partir da análise das formas de medição de diâmetros internos chegou-se à forma proposta neste trabalho que simula um comparador de diâmetro interno com a utilização de dois sensores de deslocamento posicionados diametralmente opostos na garra de medição.

Testes foram realizados para avaliar a movimentação do robô e realização da medição propriamente dita.

O sistema foi calibrado com anel padrão e posteriormente utilizado para medição de anéis de teste.

Dois anéis de teste com diâmetros diferentes do anel padrão foram medidos. A qualidade do resultado de medição foi demonstrada a partir da análise da repetibilidade dos valores obtidos.

A validação dos resultados das medições do trabalho proposto foi feita através da medição dos anéis de teste e anel padrão junto ao Laboratório de Metrologia da LAMAFE – EESC/USP.

CAPÍTULO 5

DESCRIÇÃO DO SISTEMA AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÃO DE DIÂMETROS INTERNOS

Neste capítulo será apresentada detalhada a descrição do sistema automatizado proposto de uma forma bem detalhada, bem como às partes projetadas com suas características construtivas.

Para um melhor entendimento e análise dos aspectos abordados este capítulo foi dividido em três partes. Inicialmente são mostradas as partes do sistema proposto. Em seguida descreve-se o dispositivo mecânico com todo aparato mecânico utilizado no projeto e, finalmente, apresentam-se os testes experimentais realizados no robô.

5.1 Partes do Sistema

A Figura 5.1 resume esquematicamente o sistema automatizado de medição proposto:

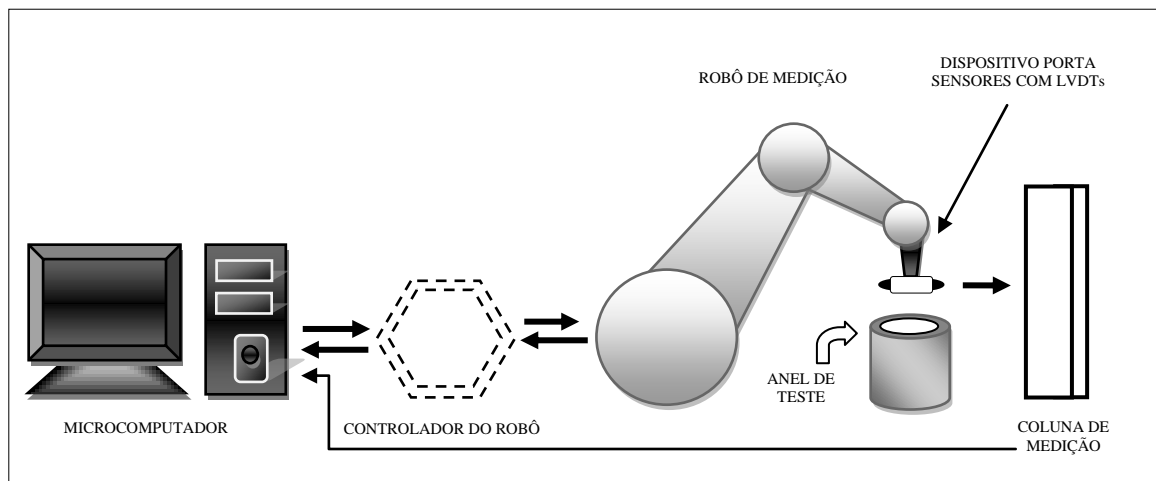


Figura 5.1 – Esquema do Sistema Automatizado de Medição de Diâmetros Internos (SAMDI)

Os sinais de medição obtidos pelos transdutores de deslocamento da garra do robô serão enviados à coluna de medição que fará a conversão analógico-digital e em seguida, os mesmos, serão enviados ao microcomputador para qualificação dos dados. A interface entre os equipamentos de medição e as rotinas de análise de dados é feita por meio de uma placa de aquisição com módulo de conversão analógico digital (A/D) e digital analógico (D/A).

A “garra de medição” foi desenvolvida de modo que possa ser utilizada em medições externas e internas de peças cilíndricas com ajustes intercambiáveis, propiciando um maior número de medições de peças com diâmetros diferenciados. Para este trabalho será utilizado apenas a medição de diâmetros internos.

A linguagem de programação utilizada no SAMDI é estruturada em ambiente *Delphi*.

Inicialmente foi realizada a calibração do anel padrão, e conseqüentemente, medições com anéis de teste.

A Figura 5.2 mostra o sistema de medição proposto:

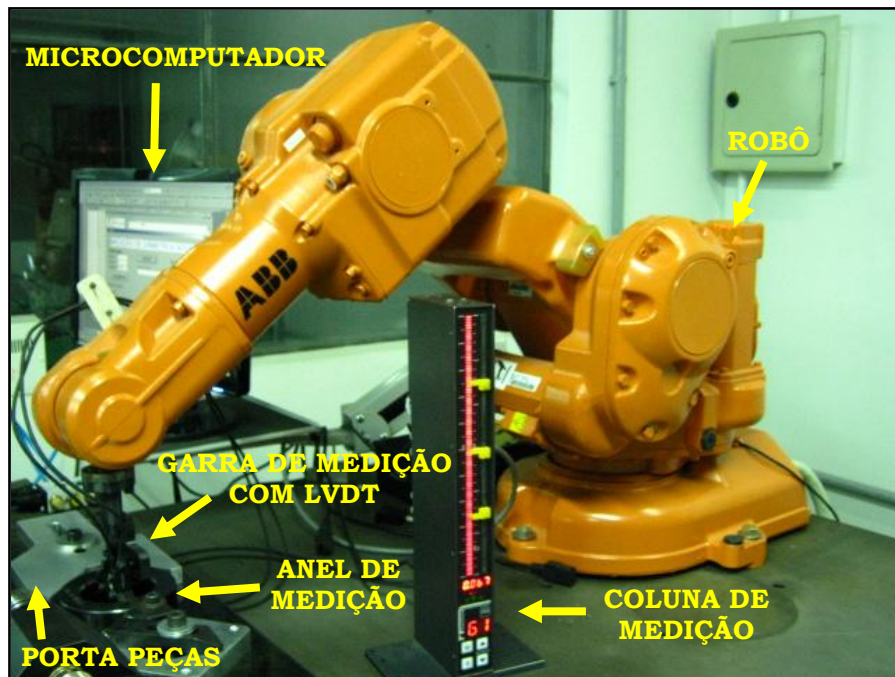


Figura 5.2 – Sistema de Medição Proposto

5.2 Dispositivo Mecânico e Interfaces de Controle e Medição

O dispositivo mecânico é formado pelo robô, dispositivo de medição ou “garra de medição”, porta peças, calibradores e anéis de teste, conforme Figura 5.2.

As interfaces de controle e medição compreendem a coluna de medição, os transdutores de deslocamento, a placa de aquisição e o programa computacional com linguagem de programação Delphi.

A seguir descreve-se cada uma das partes mecânicas e interfaces de controle e medição que compõem o sistema de medição proposto.

5.2.1 Robô

O Robô industrial de seis eixos é desenvolvido de tal forma que possa se comunicar amplamente com sistemas externos.

O modelo utilizado é o IRB140 da ABB, desenvolvido especificamente para indústrias de manufatura que utilizam automação baseada em sistemas robotizados.

Na Figura 5.3 observa-se o modelo IRB140 utilizado e a vista isométrica do mesmo com os seis eixos de movimentação que o compõem.

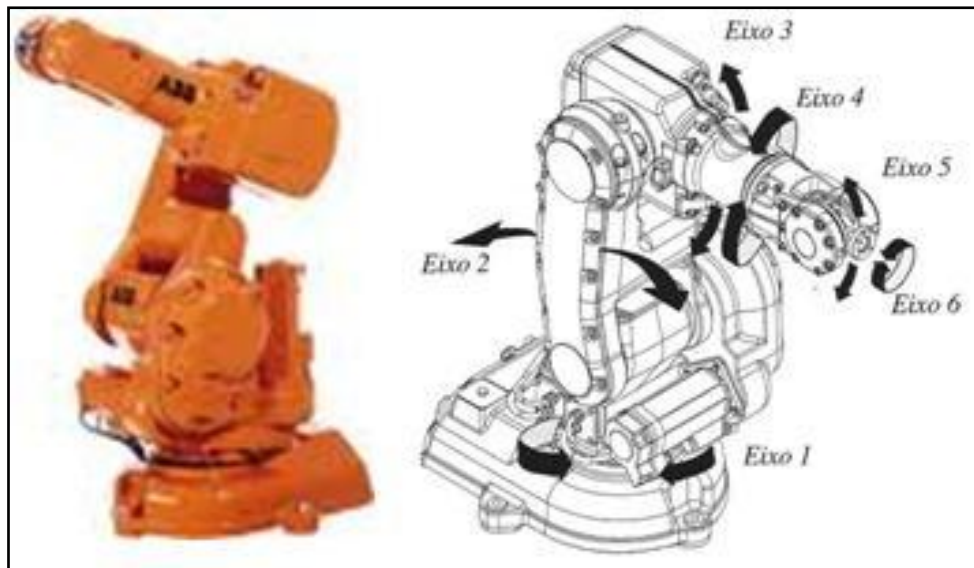


Figura 5.3 – Robô Articulado IRB140 e Vista Isométrica com Seis Eixos de Movimentação

Este manipulador possui um sistema dedicado de segurança, baseado em um circuito de dois canais que é continuamente monitorado. Se algum componente falhar, a alimentação elétrica fornecida para os motores será desligada e, conseqüentemente, os freios serão ativados.

O robô permite uma distância máxima na sua área de trabalho de até 1092mm (Figura 5.4) e uma capacidade de carga de até 5 kg, suficientes para garantir a medição proposta neste trabalho.

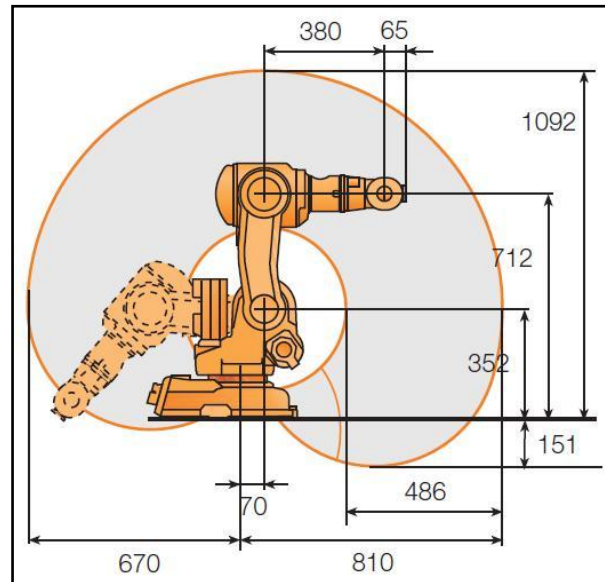


Figura 5.4 - Área de Trabalho do Robô IRB140

O controlador do robô reúne todos os circuitos eletrônicos de controle e supervisão para funcionamento e desempenho do robô, exceto a placa de medição serial que se encontra dentro do manipulador. A Figura 5.5 mostra o controlador e suas partes como a unidade de programação:



Figura 5.5 – Controlador do Robô e Unidade de Programação

5.2.2 Artefato Porta Sensores (“Garra de Medição”)

A garra de medição foi desenvolvida para medições em diâmetros internos e externos. Porém, para este trabalho foi utilizada somente para medições internas.

O material utilizado para construção deste artefato foi a liga de Aço Sae 4140, proporcionando uma boa resistência mecânica e usinabilidade. Dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT foram utilizados junto à garra.

A Figura 5.6 mostra o artefato porta sensores projetado com os transdutores alocados:

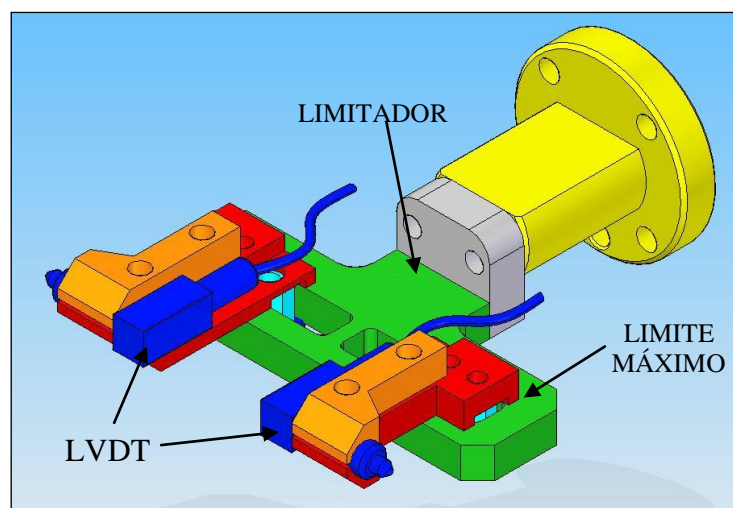


Figura 5.6 – Vista Isométrica do Artefato Porta Sensores com transdutores do tipo LVDT alocados

Podem-se observar os transdutores de deslocamento presos aos artefatos e com suas ponteiros sobressalentes para a realização das medidas internas. A peça denominada limitador determina o limite máximo e mínimo do diâmetro a ser medido. Se ajustada no limite mínimo, fará a medição do diâmetro menor e no limite máximo permitirá a maior medida determinada em projeto.

O limitador foi projetado para medir diferentes diâmetros, entretanto neste trabalho só foi ajustado de modo que realizasse uma medida estabelecida como padrão, juntamente com o anel padrão.

A Figura 5.7 mostra a vista isométrica inferior da “garra de medição”:

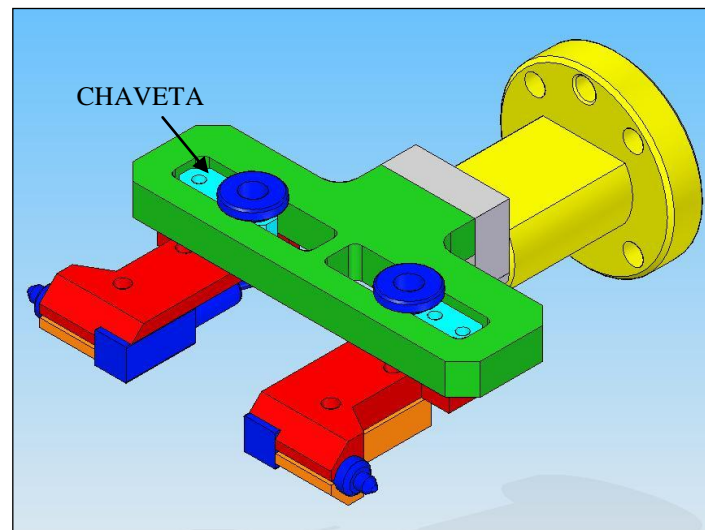


Figura 5.7– Vista Isométrica Inferior do Artefato Porta Sensores com Transdutores

Na vista isométrica traseira, a chaveta tem como função servir de “stop” para determinar o intervalo de medição.

5.2.3 Coluna de Medição

A demodulação de sinal analógico de medição proveniente dos sensores de deslocamento do tipo LVDT foi feita através da coluna de medição da TESA TT500 (Figura 5.8). A comunicação da coluna com a placa de aquisição é feita através de um cabo paralelo.



Figura 5.8– Coluna de Medição da Tesa TT500

As especificações técnicas da coluna de medição são:

- Faixa de Operação: ± 5 mm;
- Resolução: máx. $0,1\mu\text{m}$;
- Erro de Linearidade: $< 0,012\%$;
- Erro Térmico: $0,008\%/^{\circ}\text{C}$;
- Histerese: $< 0,005\%$;
- Frequência de Amostragem: máx. 50 Hz;
- Frequência de Portadora: 13 KHz;
- Tensão de Saída do Sensor: 3 V;
- Corrente de Saída do Sensor: 3 mV;
- Impedância: $2\text{K}\Omega$;
- Sensibilidade: $73,75 \text{ mV/V/mm} \pm 0,5\%$.

5.2.4 Porta Peças

O porta peças foi desenvolvido a fim de posicionar a peça a ser medida de forma que não interfira no espaço de trabalho do artefato porta sensores e proporcione boa fixação e posicionamento à peça medida.

O material utilizado para construção deste artefato foi a liga de Alumínio 1050, proporcionando uma boa resistência mecânica, dureza e leveza à peça.

A fixação do artefato porta peças foi feita sobre uma mesa de granito, o que proporcionou uma boa estabilidade e alinhamento da peça medida.

A Figura 5.9 mostra o porta peças montado sobre uma mesa de granito, na qual será fixada:

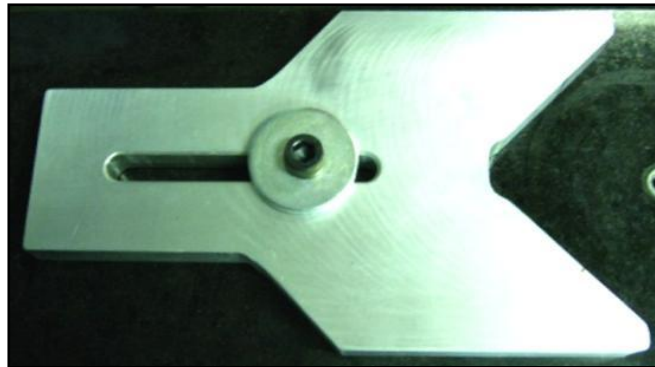


Figura 5.9– Porta Peças

5.2.5 Anel Padrão e Anéis de Teste

O padrão utilizado para calibrar o sistema foi um anel da marca Mitutoyo com diâmetro interno nominal de 69,995mm.

Dois anéis de teste foram desenvolvidos com medidas internas diferenciadas do padrão em aproximadamente 50 micras, ou seja, um anel foi projetado com diâmetro interno nominal de 69,945mm e o outro com 70,045mm. Todas as outras dimensões dos anéis de teste estão pertinentes às cotas do anel padrão.

O material utilizado para construção dos anéis de teste foi a liga de Aço Sae 4140, proporcionando uma boa resistência mecânica e usinabilidade. Foi realizado o tratamento de oxidação nos anéis de teste.

Na Figura 5.10 mostra o anel padrão e o anéis de teste:



Figura 5.10– Anel Padrão e Anéis de Teste

5.2.6 Placa de Aquisição

A placa de aquisição de dados AQB11/12 da marca T&S Equipamentos Eletrônicos foi utilizada a fim de converter sinais de tensão analógicos/digitais e digitais/analógicos obtidos dos transdutores de deslocamento.

A placa é dividida em módulos que determinam funções específicas como: entrada e saída analógica, entrada e saída digital e contagem de pulsos. Estes módulos são divididos em canais independentes em que cada canal implementa a função do módulo.

O módulo que converte um sinal analógico para um sinal digital ou conversor A/D da placa AQB11/12 corresponde a um circuito integrado *Burr Brown ADS7804* com circuito de amostragem e retenção (*sample hold*) interno e tempo de conversão de $10\mu\text{s}$. A conversão de uma tensão analógica corresponde a uma palavra digital de 12 bits. Os fundos de escala disponíveis na placa correspondem às faixas de -1 V a +1 V, -5 V a +5 V e -10 V a +10 V determinados por *jumpers*. Os ajustes de zero e fundo de escala foram realizados através de potenciômetros montados na própria placa. O ganho total da placa foi alterado para um fundo de escala de $-300\ \mu\text{m}$ a $+300\ \mu\text{m}$, proporcionando uma resolução maior, de forma que aloque uma maior quantidade de números A/D para representar $1\ \mu\text{m}$. Desta forma, o fundo de escala de $600\ \mu\text{m}$, representado por uma faixa de 4096 números A/D, produziu uma resolução de aproximadamente $0,15\ \mu\text{m}$ por número A/D, praticamente a mesma resolução do sensor de deslocamento LVDT que é de $0,1\ \mu\text{m}$ segundo o fabricante. Contudo, para que esta resolução seja satisfatória, dever-se-á utilizar o menor fundo de escala da coluna de medição.

O módulo que converte um sinal digital para um sinal analógico ou conversor D/A da placa AQB11/12 corresponde a um circuito integrado *Analog Devices ADS7545*. A conversão de uma palavra digital de 12 bits corresponde a uma tensão analógica proporcional na faixa de -5 V a +5 V ou na faixa de 0 V a 10 V, ajustáveis através de potenciômetros.

O módulo utilizado como multiplexador analógico corresponde a um circuito integrado *Burr Brown MPC506*, o que permite a seleção de uma entre 16 entradas analógicas possíveis, correspondentes aos canais de módulo de conversão A/D. A seleção do canal desejado varia de 0 a 15 no endereço do multiplexador. Para garantir que a saída do multiplexador seja estável após a mudança de canal, é necessário aguardar um período de 5 μ s antes de iniciar a leitura do conversor A/D.

O módulo para as portas de entradas e saídas digitais (*PIO*) corresponde a um circuito integrado Intel 8255, com todos os bits livres. Estes bits estão agrupados em três portas de oito bits cada, que compõem os três canais do módulo PIO, cujo modo de operação pode ser individualmente programado por algoritmos computacionais, para cada canal. A programação de modo de operação do dispositivo é realizada por meio de palavras escritas no endereço Controle PIO. Leituras e escritas nos canais de entrada ou saídas digitais são feitas nos seus respectivos endereços.

O módulo utilizado para contadores digitais (*CTD*) corresponde a um circuito integrado Intel 8254, com a função de realizar a contagem dos pulsos, medida de tempo e divisão de frequência. Três contadores de 16 bits implementam os canais deste módulo, cuja operação pode ser programada independentemente. A programação do modo de operação do contador é feita por meio de escritas no endereço Controle CTD.

O oscilador é utilizado para a geração de bases de tempo precisas e conhecidas, ou seja, bases geradas a partir de um oscilador de alta precisão (cristal piezoelétrico de 0,1%) de 8 MHz, que passa por quatro divisores, gerando frequências de 4, 2, 1 e 0,5 MHz.

A seleção e comunicação entre os dispositivos da placa AQB11/12 e o PC através de instruções de I/O são feitas pelo decodificador. A seleção do endereço base da AQB11/12 são determinados pelos *jumpers* desta placa. O decodificador é responsável também pela isolação e decodificação entre os sinais do PC e a placa AQB11/12.

Na Figura 5.11 tem-se o diagrama de blocos da placa de aquisição de dados AQB11/12:

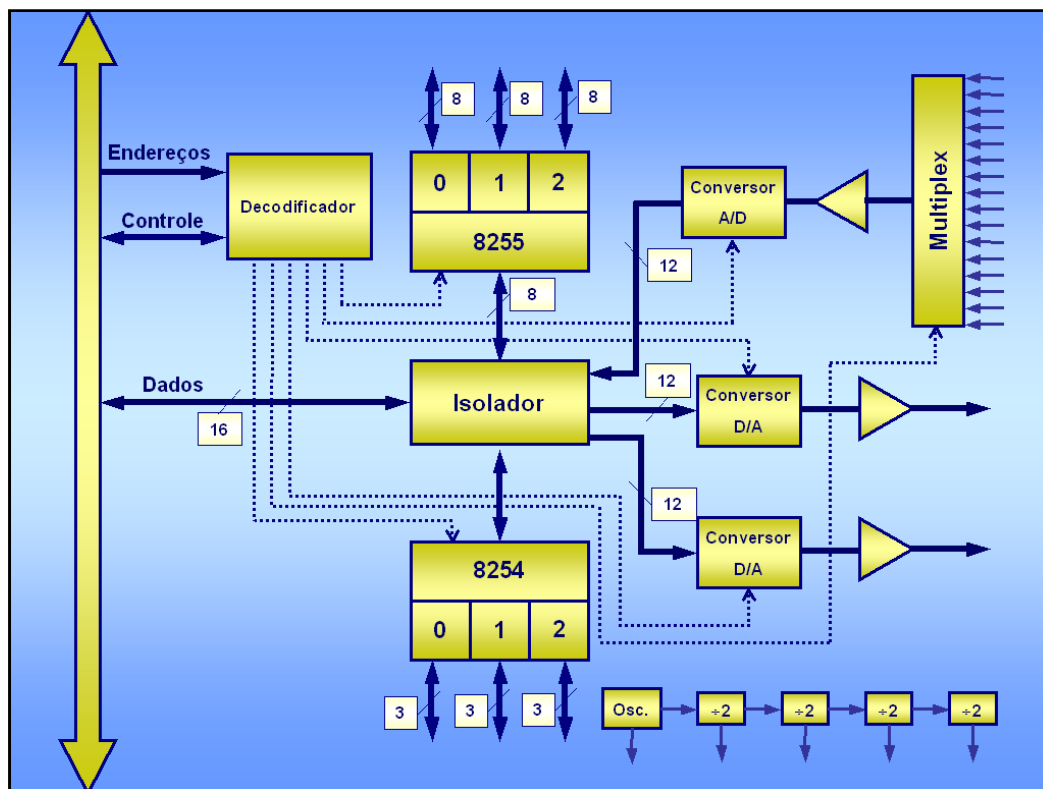


Figura 5.11 - Diagrama de Blocos da Placa de Aquisição de Dados AQB11/12
(PAZIANI, 2005)

5.2.7 Programa Computacional e Algoritmos

Para programação do robô foi utilizada a linguagem Delphi, que é uma linguagem em alto nível e orientada a objetos. Esta linguagem é de fácil utilização para o programador e possibilita um algoritmo com aspecto organizado. A interface visual do Delphi também facilita o desenvolvimento do algoritmo, possibilitando a criação de uma tela em que o usuário manipula as entradas de dados, o que já não depende mais da ordem de programação. A linguagem de programação utilizada é compatível com a placa de aquisição de dados AQB11/12 para o acionamento dos comandos de movimentação do robô, conforme descrito posteriormente.

A seguir será apresentado o diagrama de blocos para a rotina de calibração e rotina de medição:

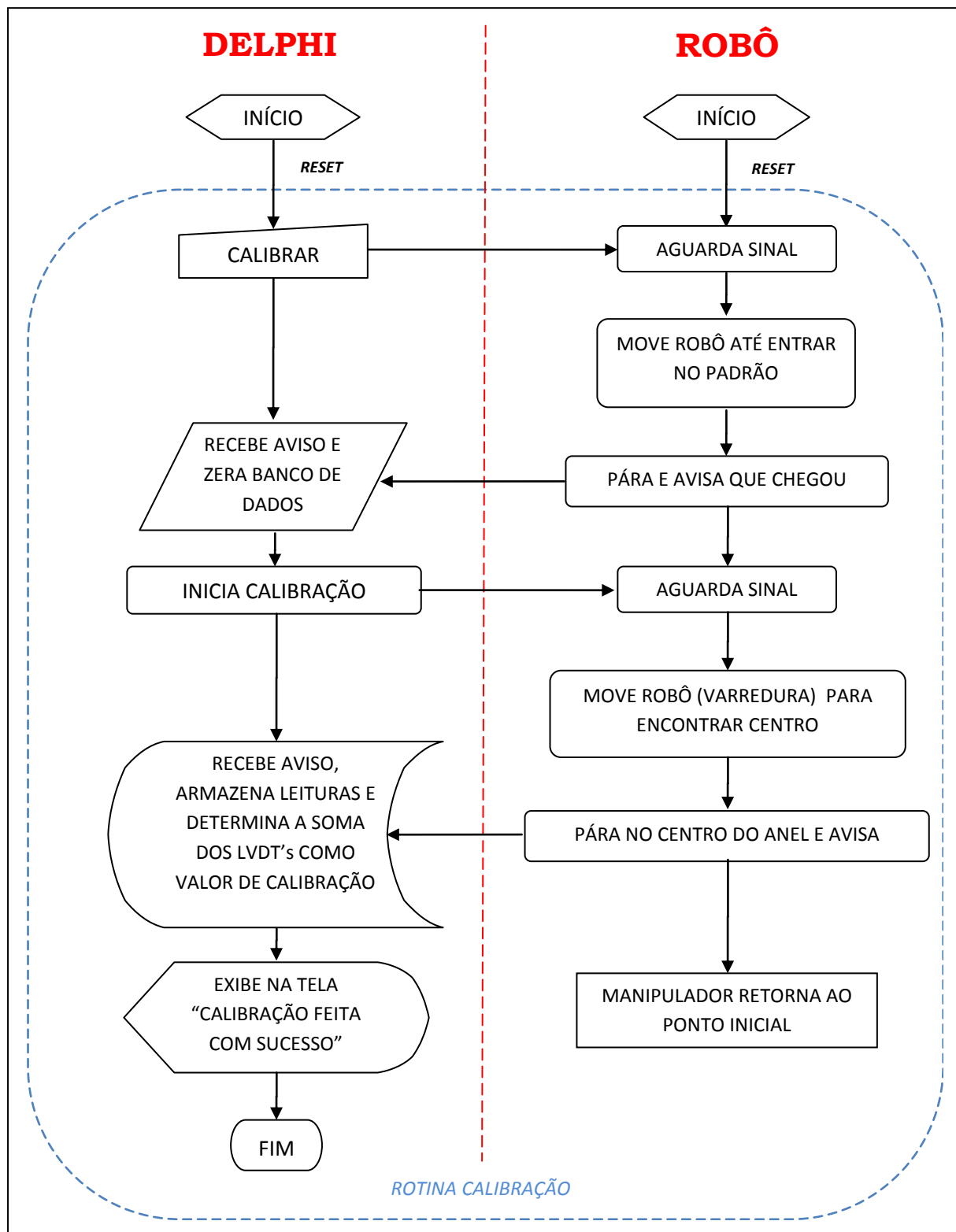


Figura 5.12 – Diagrama de Blocos para Rotina de Calibração

A rotina de medição tem sua estrutura lógica muito semelhante à rotina de calibração, conforme Figura 5.13 a seguir:

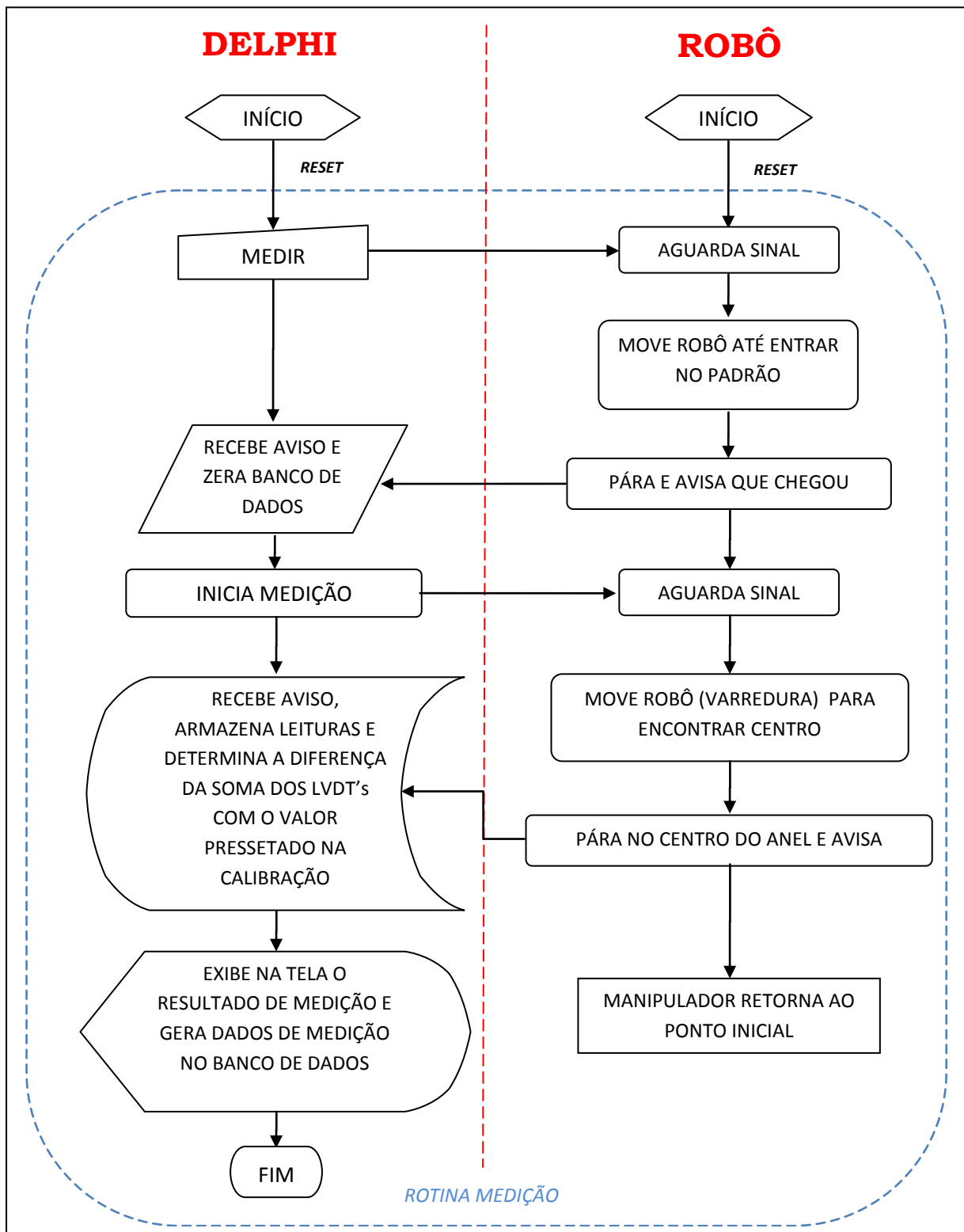


Figura 5.13 – Diagrama de Blocos para Rotina de Medição

Alguns trabalhos como o de MARQUEZ (2003) e PAZIANI (2005) utilizando programação Delphi aplicada em manipuladores serviram como base para este trabalho tanto na criação do algoritmo de medição quanto no comportamento e análise dos resultados obtidos.

Tanto a rotina de calibração do anel padrão quanto a rotina de medição dos anéis de teste é muito semelhante. A programação feita no manipulador é a mesma, o que muda é no programa computacional.

5.3 Testes Experimentais

Para realização dos testes experimentais, foi necessária a realização de alguns procedimentos como a determinação do ponto central da ferramenta (TCP), a determinação da curva de calibração dos transdutores lineares de deslocamento, alinhamento do porta peças e artefatos mecânicos, calibração dos anéis de teste e movimentação do robô.

Todas as calibrações, alinhamentos e testes experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Metrologia da LAMAFE – EESC/USP.

5.3.1 Ponto Central da Ferramenta (TCP)

O Ponto Central da Ferramenta (TCP, do inglês “*Tool Central Point*”) é o ponto matemático de origem pelo qual o robô se move através do espaço. Quando o TCP é determinado, as informações do sistema de coordenadas do punho do manipulador (xyz) são armazenadas num ponto matemático.

Com a definição do Ponto Central da Ferramenta, as coordenadas espaciais de um ponto são transferidas da base do manipulador para o punho. Assim, a programação dos movimentos do robô se torna possível.

A seguir tem-se uma figura 5.14 de um robô com as coordenadas da base (XYZ) e do punho (xyz).

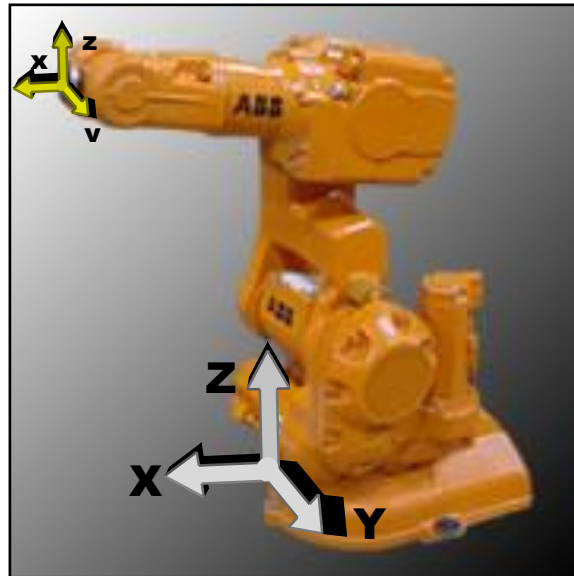


Figura 5.14 – Manipulador com as coordenadas da base (XYZ) e do punho (xyz)

O procedimento para definição do TCP foi realizado seguindo os seguintes passos:

Primeiro passo: Duas pontas secas foram utilizadas. Uma ponta foi usada como referência, montada em um bloco em “V” magnético. Outra ponta seca foi adaptada ao artefato porta sensores, no lugar em que um dos sensores ficará posicionado. A figura 5.15 mostra as duas pontas secas.



Figura 5.15 – As duas pontas secas utilizadas para realização do TCP

Segundo passo: O manipulador foi movimentado de forma que as duas pontas secas se toquem levemente, em quatro orientações diferentes, conforme figura 5.16:



Figura 5.16– Movimentação do manipulador em quatro orientações diferentes

Terceiro passo: A ponta seca da “garra de medição” foi retirada e no artefato porta sensores foram alojados os transdutores lineares de deslocamento, de tal forma que a leitura realizada pela coluna eletrônica de medição seja a mais próxima de zero possível. A figura 5.17 ilustra os transdutores de deslocamento alojados na “garra de medição”:

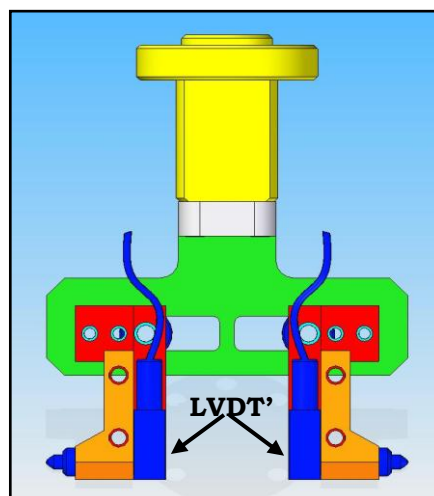


Figura 5.17 – Artefato porta sensores sem a ponta seca e com os transdutores lineares de deslocamento

5.3.2 Determinação da Curva de Calibração dos Transdutores de Deslocamento, Calibração da “Garra de Medição” e Calibração dos Anéis

Curva de Calibração dos Transdutores de Deslocamento

A curva de calibração dos LVDT's foi determinada conforme as cinco etapas descritas:

1ª etapa: Um tambor micrométrico com resolução de 0,0001mm da marca *Mitutoyo* foi colocado sobre uma base junto a um LVDT de forma que sua haste de medição e a ponta do LVDT se tocassem, em sentidos opostos.

2ª etapa: Um programa computacional em ambiente Delphi foi desenvolvido para transformar a variação de um micron do transdutor em números AD.

3ª etapa: O tambor micrométrico foi zerado no limite inferior de atuação do LVDT, ou seja, de 308 μ m e -308 μ m.

4ª etapa: Os dados de deslocamento e números AD obtidos no experimento foram enviados para uma planilha. Assim, a curva de calibração dos transdutores lineares de deslocamento foi determinada através do método de mínimos quadrados (regressão linear).

5ª etapa: Todo o procedimento de calibração dos transdutores foi repetido, porém numa faixa de atuação do LVDT de 200 μ m e -200 μ m.

A Figura 5.18 mostra a primeira, segunda e terceira etapas:



Figura 5.18 – Etapas do Procedimento de Calibração dos LVDT's

Calibração da “Garra de Medição”

A calibração ou zeragem da “Garra de Medição” foi determinada conforme as etapas a seguir:

1ª etapa: Um micrômetro externo de 50-75mm da marca *Mitutoyo* foi calibrado em 70mm. Para isso, foi utilizado um bloco padrão cerâmico de 70mm da marca *KOBA*, classe 0, conforme Figura 5.19:



Figura 5.19 – Ajuste de Medida do Micrômetro com Bloco Padrão

2ª etapa: Com o micrômetro externo calibrado em 70mm, foi feita a calibração da “Garra de Medição”. As faces internas do micrômetro foram posicionadas de forma que tocassem os LVDT’s, conforme mostra a Figura 5.20:



Figura 5.20 – Posicionamento das Faces Internas do Micrômetro com os LVDT’s

3ª etapa: Depois de posicionados micrômetro e “Garra de Medição”, utilizou-se o mesmo programa desenvolvido para calibração dos transdutores, para que possibilite uma melhor posição de atuação dos LVDT's próximos a 2000 números AD, ou seja, na posição inicial em que ocorrer a translação (Figura 5.28), espera-se que os dois transdutores estejam o mais próximo possível de 0µm ou 2000 números AD.

Calibração dos Anéis de teste

A calibração dos anéis de teste foi realizada na máquina de calibração e medição da marca SIP, modelo 302M, conforme Figura 5.21:



Figura 5.21 – Máquina de Calibração e Medição da marca SIP, modelo 302M

O procedimento de calibração dos anéis de teste foi realizado obtendo-se a média e incerteza do tipo A. Cada anel foi medido 5 vezes com temperatura e umidade relativa do ar controlados.

5.3.3 Movimentação do Robô

Para movimentação do robô é necessário programá-lo, de forma a manipular o posicionador nos pontos desejados na tua área de trabalho. Para tanto, utiliza-se a programação *on-line* que é realizada

com auxílio de um controlador manual. Para este trabalho foi utilizado a linguagem *RAPID*.

Cada instrução de posicionamento do manipulador contém o tipo de trajeto, posição, velocidade de deslocamento, dimensão da zona de precisão e ferramenta.

Os **tipos de trajeto** podem ser: Linear, Reorientado (*joint moin*) e Circular. Ambos definem o modo utilizado pelo manipulador para movimentar o TCP.

O trajeto linear é representado pelo comando *MoveL*. Sua função é deslocar o TCP da origem até o ponto de destino de modo linear. Este trajeto une o ponto inicial e final através de uma reta, conforme figura 5.22:

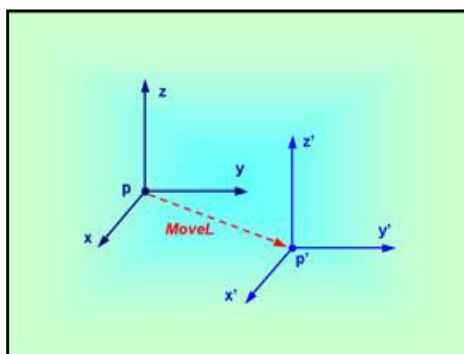


Figura 5.22 – Trajeto Linear

O trajeto reorientado é representado pelo comando *MoveJ*. Sua função é deslocar o TCP de modo não retilíneo (Figura 5.23). Nesse modo todos os eixos alcançam o ponto de destino mais simultaneamente.

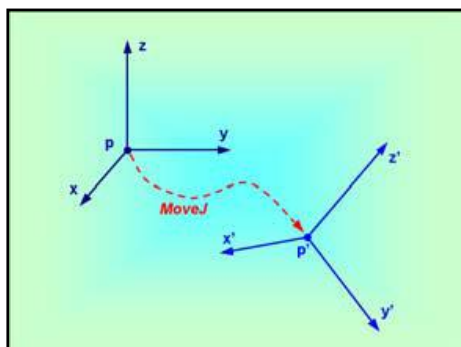


Figura 5.23 – Trajeto Reorientado

O trajeto circular é representado pelo comando *MoveC*. Sua função é deslocar o TCP para o destino de modo circular, conforme figura 5.24:

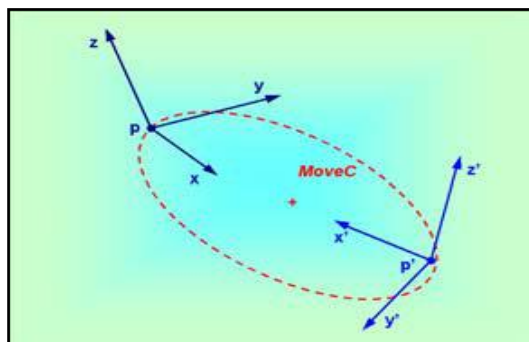


Figura 5.24 – Trajeto Circular

A **posição de destino** corresponde às coordenadas espaciais de um ponto na área de trabalho do manipulador. A determinação deste ponto pode ser realizada de modo manual e é representado pelo comando *ModPos*.

A **velocidade de deslocamento** é determinada para cada movimento, conforme necessidade do programador. Para este trabalho foram programadas velocidades baixas, tendo em vista a medição interna dos anéis e o passo utilizado no movimento de translação do manipulador. A velocidade é determinada em milímetros por segundo.

A **dimensão de zona de precisão** corresponde ao espaço delimitado por uma esfera que circunda um ponto de passagem, conforme figura 5.25. Para esta aplicação, o argumento utilizado foi o *fine*, determinado pelo fabricante com uma zona de precisão de diâmetro igual a zero.

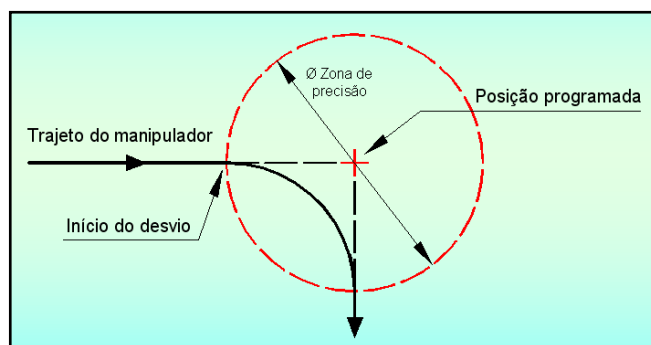


Figura 5.25 – Zona de Precisão

A **ferramenta** determinada no programa é a mesma utilizada no punho do manipulador para realização do TCP. Portanto, todos os deslocamentos são programados com a mesma ferramenta, neste caso, a “garra de medição”.

5.3.4 Alinhamento do Porta Peças

Para que o tempo total de zeragem do padrão e medição dos anéis seja o mais rápido possível, é necessário que as distâncias entre robô e peça a ser medida sejam alinhadas, minimizando os movimentos realizados pelo manipulador até o interior do anel.

Com o ponto de origem determinado, foi realizado o alinhamento do porta peças, juntamente com o padrão, conforme figura 5.26:

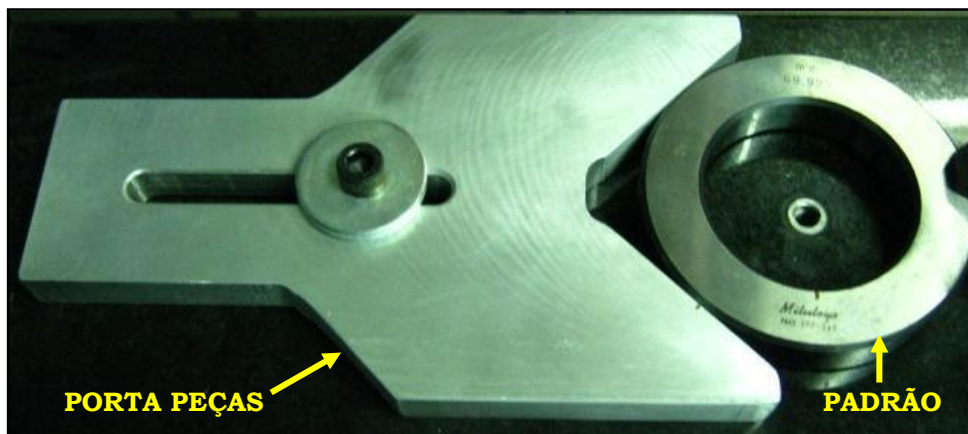


Figura 5.26 – Porta Peças Alinhado

Uma vez que os anéis de teste foram construídos geometricamente iguais ao anel padrão, diferindo apenas no diâmetro interno, não há a necessidade de reposicionar o porta peças. Assim, todos os diâmetros externos são iguais, assegurando que o intervalo de medição entre os transdutores não ultrapasse o limite máximo e mínimo para ambos os anéis.

5.3.5 Medição

Com o TCP e alinhamento do porta peças determinados e o programa computacional desenvolvido, a medição do diâmetro interno do anéis foi realizada.

Na programação, uma interface gráfica de controle foi desenvolvida, conforme ilustra a figura 5.27:

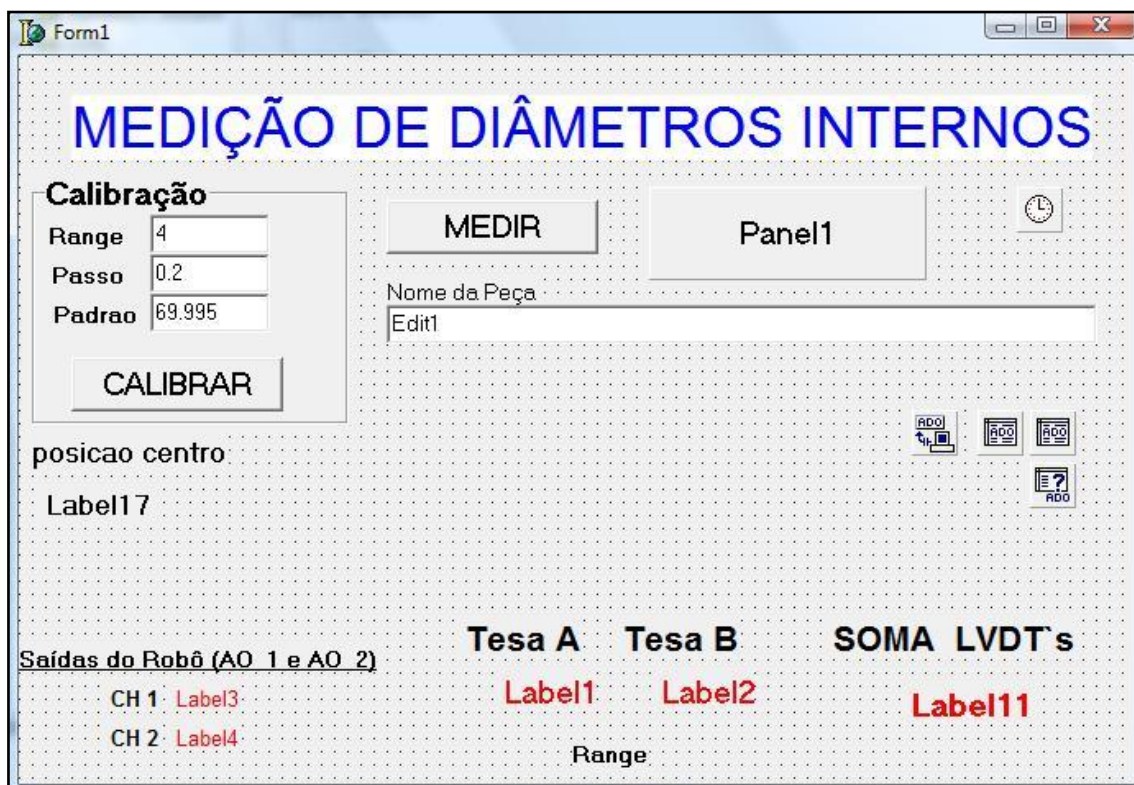


Figura 5.27 – Interface Gráfica de Controle

Esta interface será utilizada para acionar o robô e apresentar informações como: valor dos transdutores lineares em micrômetros e números AD, soma dos LVDT's, range ou percurso total que o manipulador irá transladar dentro do anel, passo de medição do manipulador, anel padrão utilizado para calibração e nome da peça que será gravado no banco de dados. Os botões *calibrar* e *medir* tem como função acionar o sistema para que a medição seja realizada. Neste trabalho usaremos apenas o anel padrão de 69,995mm.

O equacionamento das medidas obtidas pelos transdutores para se obter a medida real (M_{REAL}) de cada medição é dado pela seguinte Eq. 5.1:

$$M_{REAL} = M_{PADRÃO} + (\Delta_{LVDT_{CALIBRAÇÃO}} - \Delta_{LVDT_{MEDIÇÃO}}) \quad [5.1]$$

A medida do padrão ($M_{PADRÃO}$) é inserida na tela de medição, ou seja, o valor é igual a 69,995mm. A diferença dos LVDT's na calibração ($\Delta_{LVDT_{CALIBRAÇÃO}}$) é obtida após o término do movimento de translação na calibração e equivale à “zeragem” do padrão. A variação ($\Delta_{LVDT_{MEDIÇÃO}}$) é obtida após o término do movimento de translação na medição e equivale à diferença dos LVDT's na medição em relação à diferença dos mesmos na calibração.

O procedimento de medição realizado é análogo ao de um comparador de diâmetro interno. Assim, o primeiro passo é calibrar o anel padrão. A “Garra de Medição” será deslocada até o interior do padrão e fará o movimento de translação (Figura 5.28) do robô.

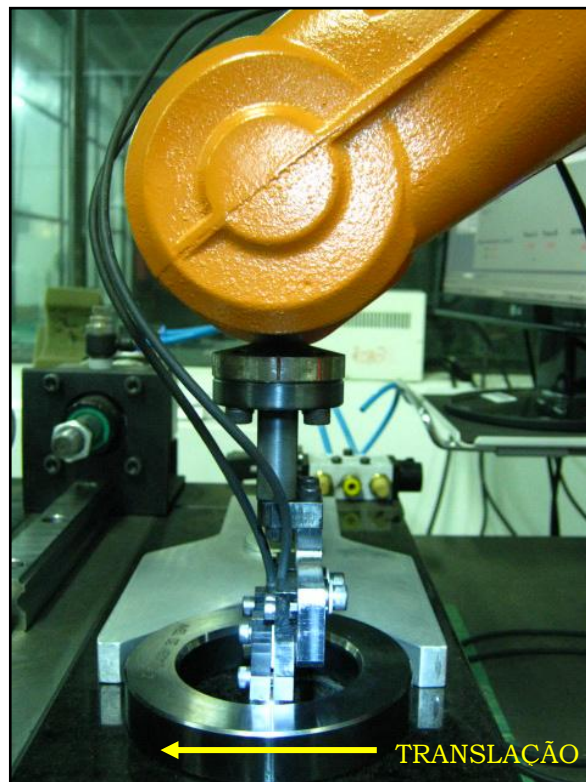


Figura 5.28 – Movimento de Translação do Robô

O movimento de translação assegura e determina a maior distância entre dois pontos na circunferência interna do padrão através da medição diferencial, o que equivale à “zeragem” do comparador de diâmetro interno junto ao padrão requerido.

Tanto o procedimento de calibração quanto o de medição são realizados através das seguintes etapas:

- Início do movimento a partir do Ponto Inicial programado;
- Movimentação do robô para que o porta sensores adentre ao anel de medição e execute a “varredura” de medição, ou seja, translate o manipulador dentro do anel medido;
- Fim do movimento. Robô volta para o Ponto Inicial.

Depois de realizada a calibração, é feito a troca do anel padrão pelo anel de medição e o mesmo procedimento é adotado.

O resultado de medição é mostrado automaticamente na interface gráfica de medição. Na mesma interface há um campo para ser preenchido com o nome da peça. Uma vez preenchido, os dados de medição são transferidos para um banco de dados sequencial.

Foram realizadas medições no SAMDI com os anéis de teste 1 e 2 e comparadas à medida do anel padrão.

Outras medições foram realizadas com o sistema automatizado de medição para diâmetros internos e comparadas com outros métodos de medição de diâmetros como: medição com a máquina de medir por coordenadas (MMC), medição com uso de comparador de diâmetro interno (súbito) e medição com micrômetro interno com 3 pontas.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS, ANÁLISE E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes experimentais obtidos do Sistema Automatizado de Medição de Diâmetros Internos (SAMDI). A análise e discussão dos resultados foram realizadas sobre os testes descritos no capítulo 5 deste trabalho.

Foram analisados os resultados das calibrações do anel padrão, transdutores de deslocamento, garra de medição e medição dos diâmetros internos dos anéis de teste. A seguir uma análise estatística dos resultados obtidos foi feita.

Testes comparativos do SAMDI com outros métodos de medição foram realizados.

6.1 Resultados da Calibração do Anel Padrão e Anéis de Teste

O anel padrão utilizado neste trabalho foi calibrado na *Máquina Universal SIP*, conforme já demonstrado no capítulo 5. Após medir cinco vezes o diâmetro do anel padrão e dos anéis de teste, foram obtidos os seguintes resultados:

		Valor Medido (mm)		
		Anel Padrão	Anel de Teste 1	Anel de Teste 2
Nº de Medidas	1	Ø 69.9962	Ø 69.9479	Ø 70.0432
	2	Ø 69.9961	Ø 69.9482	Ø 70.0424
	3	Ø 69.9959	Ø 69.9473	Ø 70.0445
	4	Ø 69.9959	Ø 69.9475	Ø 70.0413
	5	Ø 69.9960	Ø 69.9481	Ø 70.0426
Média		Ø 69.9960	Ø 69.9478	Ø 70.0428
Incerteza		0.000132	0.000387	0.000117

Tabela 6.1 – Média e Incerteza de Medição dos Anéis

Devido ao objetivo proposto neste trabalho, os anéis foram calibrados apenas na direção radial, ou seja, foi descartada a medição de erro de cilíndricidade dos anéis de medição e anel padrão. Assim, foi determinada uma posição para medi-los. Esta posição é a mesma utilizada na calibração da garra, para que o valor médio da calibração do anel padrão seja o mais fidedigno possível.

A incerteza padronizada de medição dos anéis é a do tipo A, determinada através do desvio padrão.

6.2 Resultados da Calibração dos Transdutores de Deslocamento

O resultado da calibração dos transdutores de deslocamento foi realizado conforme descritos no quinto capítulo. Os resultados obtidos são mostrados a seguir:

Deslocamento X Números AD - LVDT "A" – Faixa de Atuação: 308µm a -308µm		
Tambor Micrométrico (µm)	Faixa de Atuação LVDT (µm)	Números AD - Delphi
0	-308	4095
53	-255	3748
103	-205	3410
153	-155	3085
203	-105	2750
253	-55	2420
308	0	2052
363	55	1690
413	105	1363
463	155	1025
513	205	697
563	255	357
616	308	0

Tabela 6.2 – Dados de Deslocamento X Números AD para Calibração do LVDT "A" -
Faixa de Atuação do LVDT: 308µm a -308µm

Com os dados coletados, obteve-se o gráfico de regressão linear para LVDT A, conforme mostra a Figura 6.1:

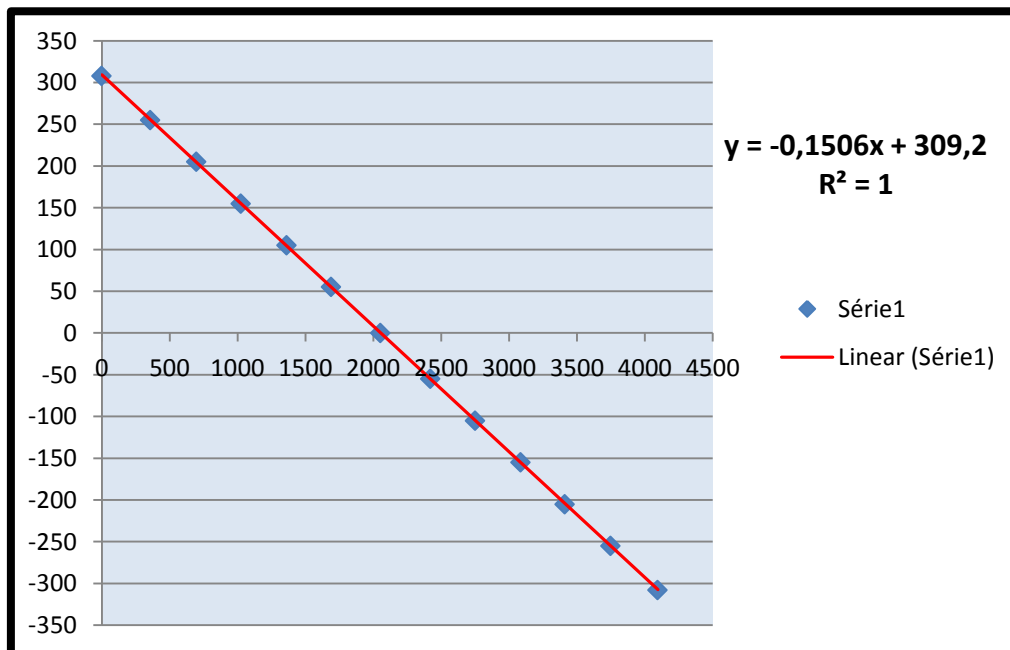


Figura 6.1 – Gráfico de Regressão Linear para LVDT "A" - Faixa de Atuação do LVDT:
308µm a -308µm

A seguir têm-se os dados coletados para LVDT B:

Deslocamento X Números AD - LVDT "B" – Faixa de Atuação: 308µm a -308µm		
Tambor Micrométrico (µm)	Faixa de Atuação LVDT (µm)	Números AD - Delphi
0	-308	4095
53	-255	3770
103	-205	3450
153	-155	3110
203	-105	2782
253	-55	2450
308	0	2090
363	55	1715
413	105	1375
463	155	1040
513	205	710
563	255	380
616	308	30

Tabela 6.3 – Dados de Deslocamento X Números AD para Calibração do LVDT "B" – Faixa de Atuação do LVDT: 308µm a -308µm

Com os dados coletados, obteve-se o gráfico de regressão linear para LVDT B, conforme mostra a Figura 6.2:

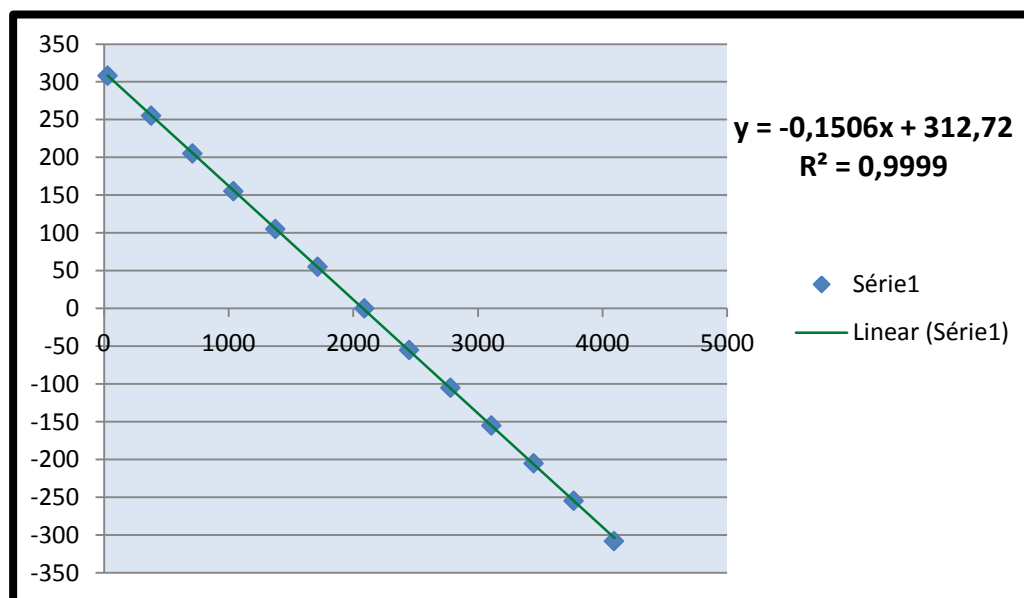


Figura 6.2 – Gráfico de Regressão Linear para LVDT "B" - Faixa de Atuação do LVDT: -308µm a 308µm

Os LVDTs foram calibrados novamente, porém em uma faixa de atuação mais estreita próxima à da utilizada neste trabalho. Foram

analisadas as tendências das duas curvas de calibração nas faixas de $\pm 308\mu\text{m}$ e $\pm 200\mu\text{m}$.

A Tabela 6.4 mostra os dados obtidos do LVDT “A” e “B” para faixa de atuação de $\pm 200\mu\text{m}$:

Relação Deslocamento X Números AD - LVDT A e B – Faixa de Atuação: $200\mu\text{m}$ a $-200\mu\text{m}$			
Tambor Micrométrico (μm)	Faixa de Atuação LVDT (μm)	Números AD LVDT A	Números AD LVDT B
0	-200	3388	3418
20	-180	3255	3280
40	-160	3125	3150
60	-140	2990	3012
80	-120	2856	2880
100	-100	2718	2750
120	-80	2590	2615
140	-60	2454	2482
160	-40	2325	2350
180	-20	2190	2212
200	0	2055	2080
220	20	1925	1950
240	40	1790	1821
260	60	1652	1688
280	80	1524	1544
300	100	1392	1415
320	120	1257	1280
340	140	1122	1150
360	160	980	1020
380	180	850	884
400	200	725	748

Tabela 6.4 – Dados de Deslocamento X Números AD para Calibração do LVDT “A” e “B” – Faixa de Atuação do LVDT: $200\mu\text{m}$ a $-200\mu\text{m}$

Com os dados coletados foram construídos os gráficos de regressão linear para LVDT “A” (Figura 6.3) e LVDT “B” (Figura 6.4).

Gráfico de regressão linear para LVDT “A”:

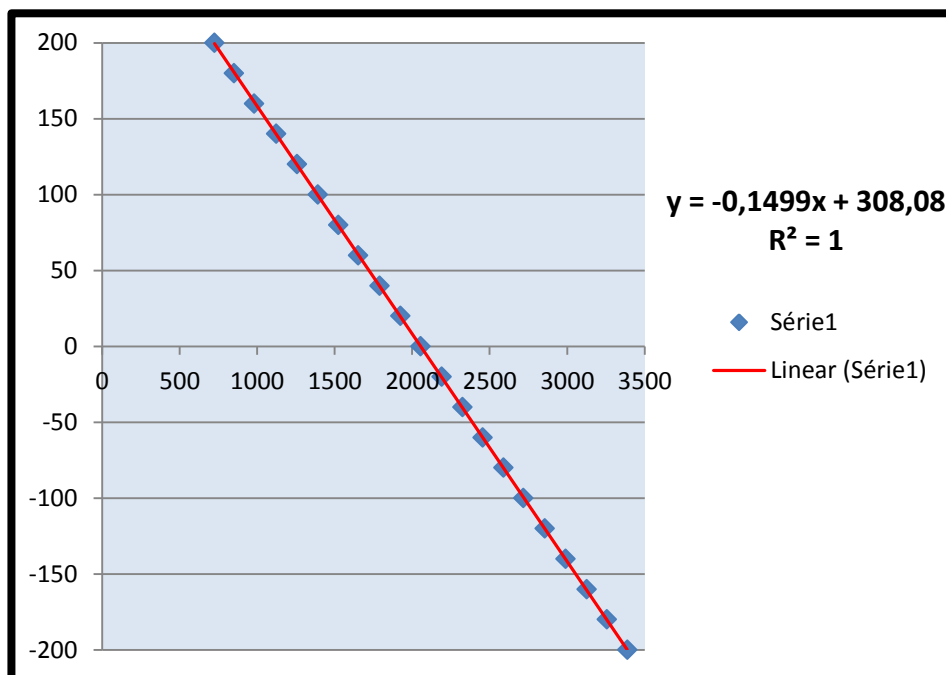


Figura 6.3 – Gráfico de Regressão Linear para LVDT “A” - Faixa de Atuação do LVDT: -200μm a 200μm

Gráfico de regressão linear para LVDT “B”:

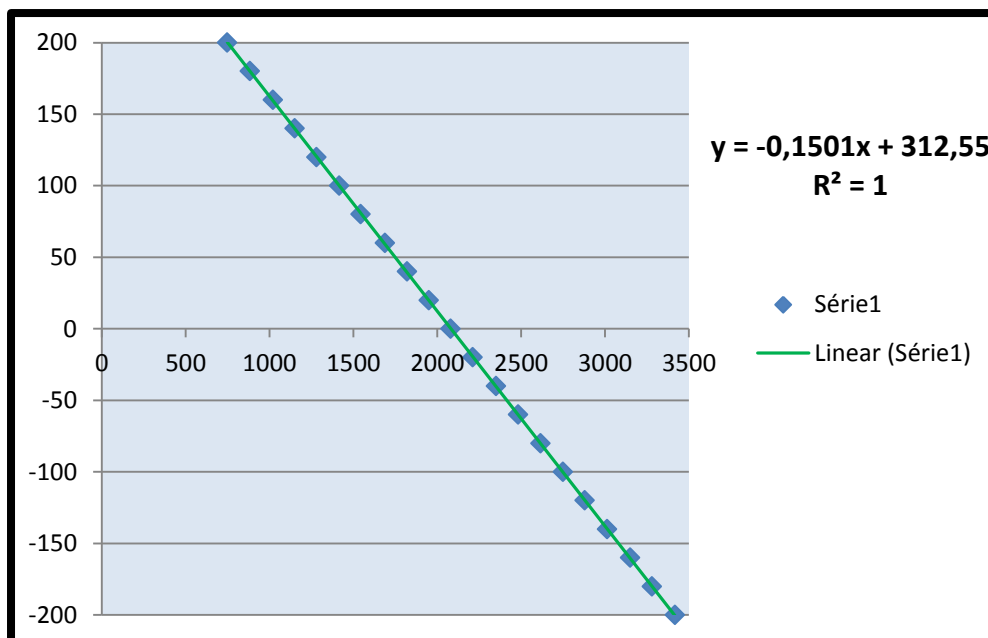


Figura 6.4 – Gráfico de Regressão Linear para LVDT “B” - Faixa de Atuação do LVDT: -200μm a 200μm

A seguir, foram realizadas 5 medidas para cada ida e volta do transdutor linear a fim de obter a média das leituras e equação da curva de calibração dos transdutores.

A tabela 6.5 mostra os dados obtidos dos transdutores para determinação da equação da curva de calibração dos mesmos.

LVDT - 100 μm (5 em 5 μm)																			
MEDIDA 1				MEDIDA 2				MEDIDA 3				MEDIDA 4				MEDIDA 5			
IDA		VOLTA		IDA		VOLTA		IDA		VOLTA		IDA		VOLTA		IDA		VOLTA	
AD	μm	AD	μm	AD	μm	AD	μm	AD	μm	AD	μm	AD	μm	AD	μm	AD	μm	AD	μm
2395	50	2402	50	2400	50	2400	50	2400	50	2406	51	2401	50	2402	50	2399	50	2400	50
2355	44	2358	44	2368	46	2367	45	2356	44	2357	44	2372	46	2372	46	2364	45	2372	46
2330	40	2327	39	2337	41	2332	40	2327	39	2337	41	2336	41	2345	42	2330	40	2338	41
2310	37	2298	35	2287	33	2298	35	2300	35	2300	35	2306	35	2301	35	2312	37	2299	35
2280	33	2271	31	2266	30	2264	30	2274	31	2070	31	2273	31	2280	33	2279	32	2270	31
2231	25	2225	24	2227	24	2234	26	2237	26	2237	26	2233	25	2254	28	2238	26	2230	25
2180	17	2210	22	2202	21	2188	18	2200	21	2190	19	2182	18	2192	20	2198	20	2202	21
2152	14	2153	14	2175	16	2145	13	2160	15	2155	14	2163	15	2165	16	2157	14	2169	16
2118	9	2126	10	2130	10	2127	10	2130	10	2120	9	2131	10	2132	11	2128	10	2124	9
2074	2	2087	4	2096	5	2105	6	2101	6	2092	5	2095	5	2090	5	2100	6	2095	5
2045	-2	2055	0	2071	2	2061	0	2064	1	2054	-1	2058	0	2052	-1	2061	0	2058	0
2027	-5	2029	-5	2031	-5	2040	-3	2015	-7	2022	-7	2020	-6	2027	-5	2028	-5	2035	-4
2001	-9	2005	-9	2000	-9	2002	-9	1997	-10	1998	-10	1997	-10	1992	-19	1999	-9	1888	-11
1957	-15	1963	-14	1960	-15	1967	-14	1965	-14	1960	-15	1960	-15	1966	-14	1966	-14	1961	-15
1927	-19	1930	-19	1932	-19	1932	-19	1929	-20	1911	-22	1968	-20	1927	-20	1927	-20	1920	-21
1908	-23	1904	-24	1896	-25	1900	-24	1890	-25	1883	-27	1895	-25	1892	-25	1888	-26	1902	-24
1861	-30	1847	-32	1863	-29	1845	-32	1858	-31	1853	-31	1854	-31	1844	-32	1862	-30	1858	-30
1811	-37	1819	-35	1825	-35	1815	-37	1833	-34	1816	-36	1822	-36	1830	-34	1825	-35	1822	-35
1791	-40	1800	-39	1790	-40	1785	-40	1794	-40	1798	-39	1786	-41	1806	-38	1792	-40	1792	-40
1762	-45	1766	-44	1755	-45	1752	-46	1761	-45	1758	-45	1751	-46	1755	-46	1753	-46	1757	-45
1727	-50	1730	-49	1730	-49	1732	-49	1726	-50	1730	-49	1728	-50	1737	-48	1723	-51	1731	-49
1670	-59			1695	-56			1692	-56			1704	-54			1705	-54		
$y = 0,1494x - 307,81$		$y = 0,1478x - 304,74$		$y = 0,1484x - 305,93$		$y = 0,1479x - 304,97$		$y = 0,149x - 307,27$		$y = 0,149x - 305,7$		$y = 0,149x - 307,59$		$y = 0,1489x - 307,23$		$y = 0,149x - 307,32$		$y = 0,1453x - 298,8$	

Tabela 6.5 – Dados de Deslocamento X Números AD para Calibração do LVDT “A” e “B” – Faixa de Atuação do LVDT: 100 μm a -100 μm

A média dos valores de idas e voltas dos transdutores foi obtida para a faixa de atuação do LVDT igual a $\pm 100\mu\text{m}$. Assim, foi calculada a média final da equação da curva de calibração.

Valor da Equação da Curva de Calibração para os transdutores:

$$y = 0,14837x - 305,736$$

A seguir têm-se o gráfico final de regressão linear para os transdutores de deslocamento:

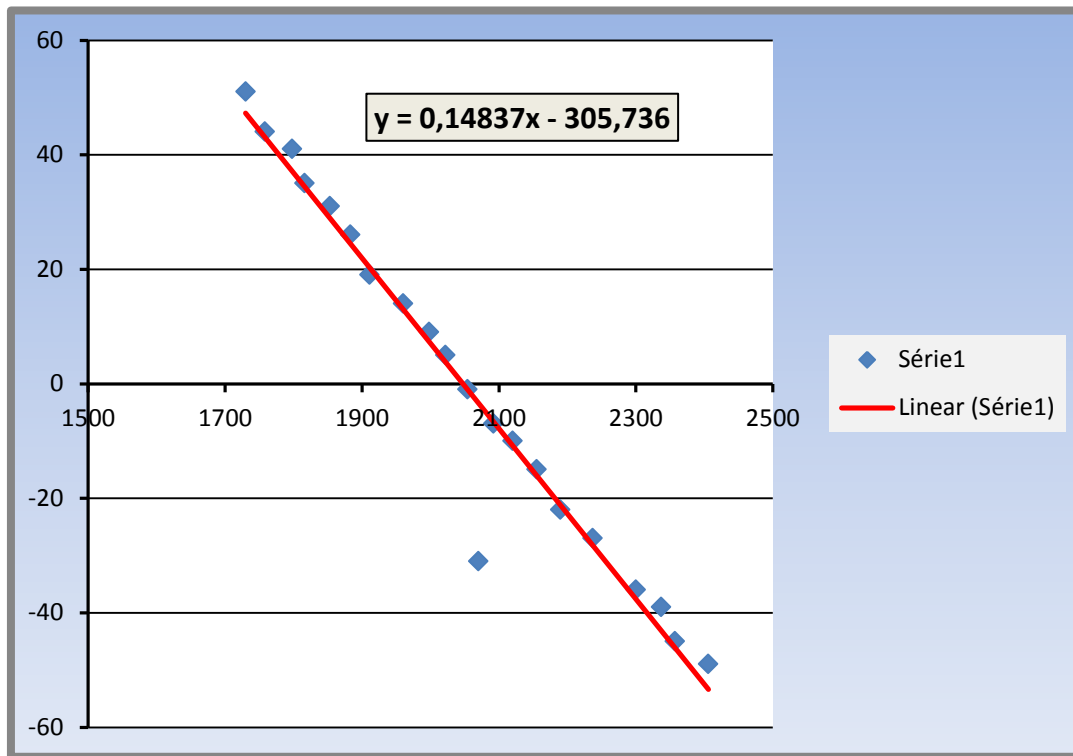


Figura 6.5 – Gráfico de Regressão Linear para LVDTs - Faixa de Atuação do LVDT: -100μm a 100μm

Os resultados obtidos na calibração dos transdutores foram inseridos no programa computacional para medição de diâmetros internos.

6.3 Resultados da Calibração do Dispositivo Porta Sensores

A calibração ou zeragem do dispositivo porta sensores foi realizada e a posição de cada LVDT ficou em aproximadamente 2000 números AD ou zero micras.

Nas tabelas apresentadas no item 6.4 referentes aos resultados de medições dos anéis são mostradas as posições de cada LVDT para cada medição.

A calibração do dispositivo porta peças serviu como mais um parâmetro de controle do SAMDI.

6.4 Resultados das Medições dos Anéis de Teste e suas Discussões

6.4.1 Medições com Anéis de Teste e Anel Padrão

Foram realizadas várias medições com os anéis de teste e anel padrão. Os dados obtidos nas medições realizadas foram automaticamente salvos em um banco de dados no programa desenvolvido em ambiente *Delphi*, o mesmo utilizado para realização da medição dos diâmetros internos.

No banco de dados têm-se valores obtidos de cada medição que serão apresentados em uma planilha do programa. Cada coluna mostra um resultado. Estes resultados são:

- **Valor Encontrado (mm):** Resultado final de medição encontrado no anel de teste, em milímetros.
- **Soma dos LVDT's (μm):** Resultado da soma das últimas posições dos LVDT's, ou seja, após o término do movimento de translação da garra de medição dentro do anel de teste e valor encontrado do maior diâmetro cada LVDT representará uma posição em micrometro e em número AD.
- **Nº AD – LVDT “A”:** O valor de números AD do LVDT “A” após término de cada medida realizada.
- **Nº AD – LVDT “B”:** O valor de números AD do LVDT “B” após término de cada medida realizada.
- **Medida “A” (μm):** O valor em micrometros do LVDT “A” após término de cada medida realizada.
- **Medida “B” (μm):** O valor em micrometros do LVDT “B” após término de cada medida realizada.

A primeira medição foi realizada no anel de teste 1, com diâmetro nominal 69,9478mm, conforme mostra a Tabela 6.6:

Nº de Medições	Valor(mm) Encontrado	Soma_dos LVDT's(μm)	nº AD -LVDT "A"	nº AD - LVDT "B"	Medida "A" (μm)	Medida "B" (μm)
1	69.951	53	1279	2465	116	-63
2	69.95	54	1285	2448	115	-60
3	69.95	54	1347	2388	105	-51
4	69.949	55	1251	2477	120	-65
5	69.948	56	1278	2447	116	-60
6	69.949	55	1333	2399	107	-53
7	69.949	55	1248	2480	120	-65
8	69.95	54	1283	2452	115	-61
9	69.949	55	1276	2450	116	-61
10	69.949	55	1251	2479	120	-65
11	69.95	54	1224	2513	124	-70

Tabela 6.6 – Resultados de Medição do Anel de Teste 1 (Diâmetro 69.9478mm)

A acuracidade de medição apresentada na medição do anel de teste 1 foi igual a 0,003mm.

A segunda medição foi realizada no anel de teste 2, com diâmetro nominal 70,0428mm, conforme mostra a Tabela 6.7:

Nº de Medições	Valor(mm) Encontrado	Soma_dos LVDT's(μm)	nº AD -LVDT "A"	nº AD - LVDT "B"	Medida "A" (μm)	Medida "B" (μm)
1	70.034	-35	2537	1788	-74	39
2	70.034	-35	2491	1836	-67	32
3	70.037	-38	2480	1865	-65	27
4	70.034	-35	2511	1816	-70	35
5	70.035	-36	2477	1854	-65	29
6	70.035	-36	2448	1885	-60	24
7	70.034	-35	2426	1900	-57	22
8	70.035	-36	2523	1809	-72	36
9	70.034	-35	2506	1822	-69	34
10	70.035	-36	2483	1851	-66	30
11	70.034	-35	2502	1825	-68	33

Tabela 6.7 – Resultados de Medição do Anel de Teste 2 (Diâmetro 70.0428mm)

A acuracidade de medição apresentada na medição do anel de teste 2 foi igual a 0,003mm.

A terceira medição foi realizada com os dois anéis de teste, alternando ora o anel de teste 1, ora de teste 2, conforme mostra a Tabela 6.8:

Resultados de medição dos anéis de teste 1 e 2 alternados:

Nº de Medições	Valor(mm) Encontrado	Soma_dos LVDT's(μm)	nº AD -LVDT "A"	nº AD -LVDT "B"	Medida "A" (μm)	Medida "B" (μm)
1	69.951	55	1320	2409	109	-54
2	70.04	-34	1468	2853	87	-121
3	69.952	54	1655	2083	59	-5
4	70.04	-34	1439	2880	92	-125
5	69.951	55	1187	2541	129	-74
6	70.04	-34	1443	2876	91	-125
7	69.952	54	1266	2468	118	-63
8	70.04	-34	1420	2902	94	-129
9	69.951	55	1308	2423	111	-57
10	70.036	-29	1583	2703	70	-99
11	69.951	55	1253	2478	120	-65
12	70.04	-34	1785	2536	39	-74
13	69.952	54	1276	2458	116	-62
14	70.04	-34	1402	2918	97	-131
15	69.95	56	1465	2259	88	-32
16	70.04	-34	1423	2896	94	-128
17	69.95	56	1493	2228	83	-27
18	70.039	-33	2460	1853	-62	29
19	69.952	54	2126	1610	-12	66
20	70.037	-31	1425	2873	94	-124
21	69.948	59	1304	2400	112	-53
22	70.04	-34	1517	2807	80	-114

Tabela 6.8 – Resultados de Medição do Anel de Teste 1 e 2

A acuracidade de medição apresentada na medição dos anéis de teste 1 e 2 foi igual a 0,004mm.

Todas as validações dos resultados das medições com o trabalho proposto foram feitas através da medição dos anéis de teste e anel padrão junto ao Laboratório de Metrologia da LAMAFE – EESC/USP.

6.4.2 Medição Comparativa dos Anéis de Teste no SAMDI com outros Dispositivos de Medição

Foram realizadas medições comparativas do SAMDI com outros dispositivos de medição. Os anéis de teste foram medidos 11 vezes para cada método, conforme mostra a Tabela 6.9:

Nº de Medições	Sistema Automatizado Proposto (SAMDI)	Máquina de Medir por Coordenadas	Micrômetro Interno com Três Pontas	Comparador de Diâmetro Interno	
1 (1)	69.951	69.952	69.95	69.95	
2 (2)	70.040	70.040	70.04	70.04	
3 (1)	69.952	69.952	69.95	69.95	
4 (2)	70.040	70.041	70.04	70.04	
5 (1)	69.951	69.950	69.95	69.94	
6 (2)	70.040	70.041	70.04	70.04	
7 (1)	69.952	69.954	69.94	69.95	
8 (2)	70.040	70.044	70.04	70.04	
9 (1)	69.951	69.954	69.95	69.95	
10 (2)	70.036	70.042	70.04	70.04	
11 (1)	69.951	69.952	69.95	69.95	
12 (2)	70.040	70.042	70.04	70.04	
13 (1)	69.952	69.952	69.95	69.95	
14 (2)	70.040	70.040	70.04	70.04	
15 (1)	69.950	69.953	69.95	69.95	
16 (2)	70.040	70.041	70.04	70.04	
17 (1)	69.950	69.950	69.95	69.95	
18 (2)	70.039	70.040	70.04	70.04	
19 (1)	69.952	69.954	69.94	69.95	
20 (2)	70.037	70.040	70.04	70.04	
21 (1)	69.948	69.952	69.95	69.95	
22 (2)	70.040	70.042	70.04	70.04	
\bar{x}	(1)	69.9509	69.9522	69.9481	69.9490
	(2)	70.0392	70.0411	70.0372	70.0381
S	(1)	0.0011	0.0013	0.0038	0.0028
	(2)	0.0013	0.0011	0.0044	0.0038

Tabela 6.9 – Medição Comparativa dos Anéis de Teste do SAMDI com outros Sistemas de Medição Propostos

O resultado de medição do SAMDI foi obtido, comparado com os demais métodos apresentados.

A média e desvio padrão foram calculados para todos os métodos propostos.

A incerteza de medição dos anéis de teste no sistema SAMDI é igual a 0,0026mm e reflete a incerteza padronizada do tipo A sobre o resultado de medição, com uma probabilidade de enquadramento de 95,45%.

A partir dos resultados de medição obtidos na Tabela 6.9 foram calculados a média, mediana e moda, conforme mostra a Tabela 6.10:

Sistema de Medição Proposto	ANEL DE TESTE 1				ANEL DE TESTE 2			
	SAMDI	MMC	Micrômetro Interno	Súbito	SAMDI	MMC	Micrômetro Interno	Súbito
Média (\bar{x})	69,9509	69,9522	69,9481	60,9490	70,0392	70,0411	70,0372	70,0381
Mediana (Md)	69,9500	69,9520	69,9450	69,9450	70,0380	70,0420	70,0400	70,0400
Moda (Mo)	69,9510	69,9520	69,9500	69,9500	70,0400	70,0400	70,0400	70,0400

Tabela 6.10 – Média, Mediana e Moda Resultante das Medições dos Anéis de Teste

Estes resultados foram obtidos através de uma frequência simples com o número de medições igual a 11 vezes para cada anel de teste medido.

Para a completa análise dos resultados de medição, obtiveram-se as curvas de assimetria para cada sistema de medição proposto nos anéis de teste 1 e 2, conforme Figura 6.6:

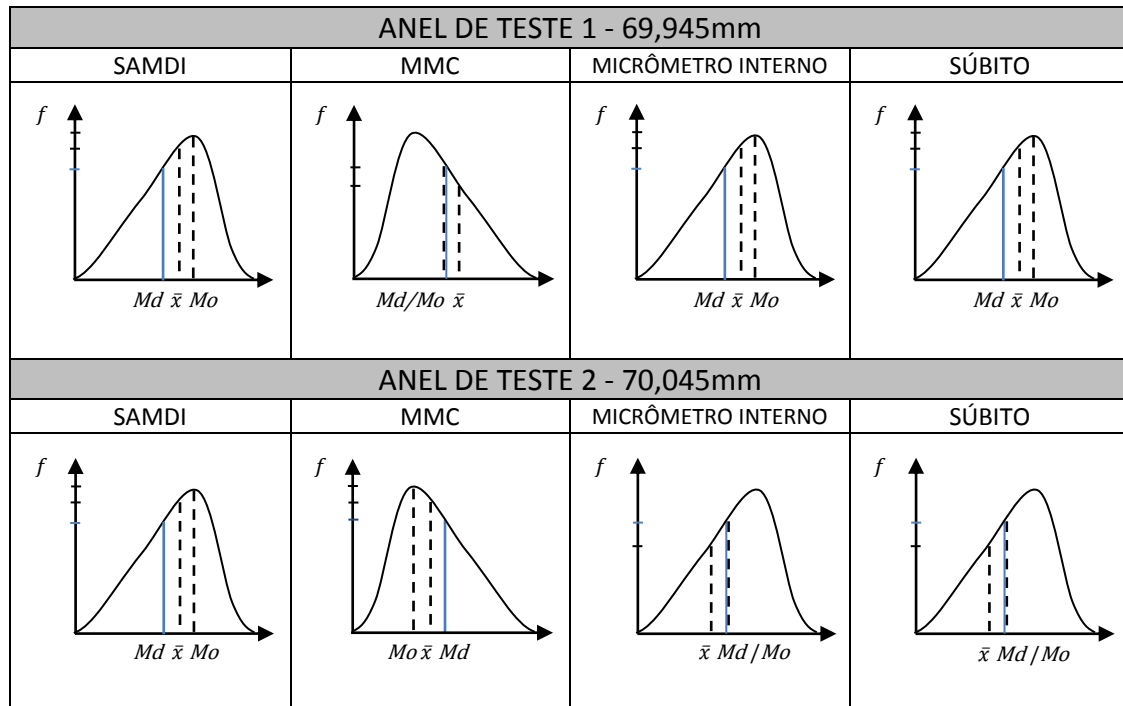


Figura 6.6 – Curvas de Assimetria para os Diversos Sistemas de medição Propostos dos Anéis de Teste

Todos os métodos propostos apresentaram um grau de deformação ou assimetria.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, um Sistema Automatizado e Dedicado à Medição de Diâmetros Internos (SAMDI) foi desenvolvido para a aplicação em medições de anéis, inerentes às medições com comparadores de diâmetro interno.

O sistema foi construído tendo como base um robô industrial de seis eixos que opera sensores de deslocamento do tipo LVDT acoplados ao artefato porta sensores.

Foram desenvolvidos artefatos mecânicos específicos para as medições realizadas no sistema proposto.

Uma interface eletrônica foi implementada com o objetivo de efetuar a aquisição das leituras dos sensores e a comunicação com o sistema de controle do robô para acionamento dos movimentos

necessários para a realização das medições. A interface é composta por uma placa de conversão de dados AD/DA, programas computacionais elaborados em linguagem orientada a objetos Delphi™ e conexões.

O algoritmo de calibração e medição foi elaborado. O programa computacional foi desenvolvido em ambiente Delphi™. Foram realizados testes simulados e experimentais para verificar a eficiência dos algoritmos.

A curva de calibração dos LVDT's foi determinada a partir de testes experimentais.

O artefato porta sensores foi calibrado utilizando blocos padrões de cerâmica de qualidade IT0.

Os anéis de teste e anel padrão foram calibrados na máquina de calibração e medição SIP. Após 5 medidas realizadas, obteve-se a média e incerteza dos anéis de teste e anel padrão.

Os resultados obtidos dos anéis de teste com o sistema de medição de diâmetros internos foram comparados com o anel padrão, diversificando a metodologia de medição.

Os resultados obtidos com o SAMDI foram comparados aos resultados de medições realizadas através de técnicas e instrumentos convencionais sobre os mesmos artefatos.

Além das observações apresentadas, podem-se ressaltar, a partir dos desenvolvimentos teóricos e experimentais, os seguintes pontos essenciais e conclusões:

- O objetivo de implementar um sistema de medição automatizado em um robô industrial foi alcançado, mesmo sabendo das limitações do robô para utilização na Metrologia Dimensional;
- O sistema desenvolvido mostrou-se mecânica e eletronicamente robusto, com possibilidade para ser implementado em ambientes industriais;

- O Sistema Automatizado de Medição de Diâmetros Internos mostrou-se ideal para medição de peças seriadas;
- O tempo de medição do sistema proposto para cada peça foi baixo, considerando que as peças a serem medidas estejam no ambiente de chão de fábrica;
- A acuracidade de medição do SAMDI foi alta, comparada à instrumentos convencionais;
- O custo de implantação do SAMDI corresponde a 70% do valor de uma MM3C de pequeno porte;
- O sistema proposto elimina a influência do operador sobre a medida tomada, além de permitir medição integral do lote, visando a montagem seletiva;

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, surgiram novas propostas, as quais estão aqui relacionadas e sugeridas para trabalhos futuros:

- Construção de novo Dispositivo Porta Sensores contendo três sensores para as medições de erros de circularidade;
- Desenvolvimento de novos algoritmos e programas computacionais para admitir a medição com três sensores;
- Construção de novo Dispositivo Porta Peças para melhorar a troca dos anéis entre uma medida e outra;
- Desenvolvimento de um sistema que faça a medição de diâmetros externos;
- Elaborar um programa computacional no banco de dados para a determinação da incerteza de medição através do SAMDI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

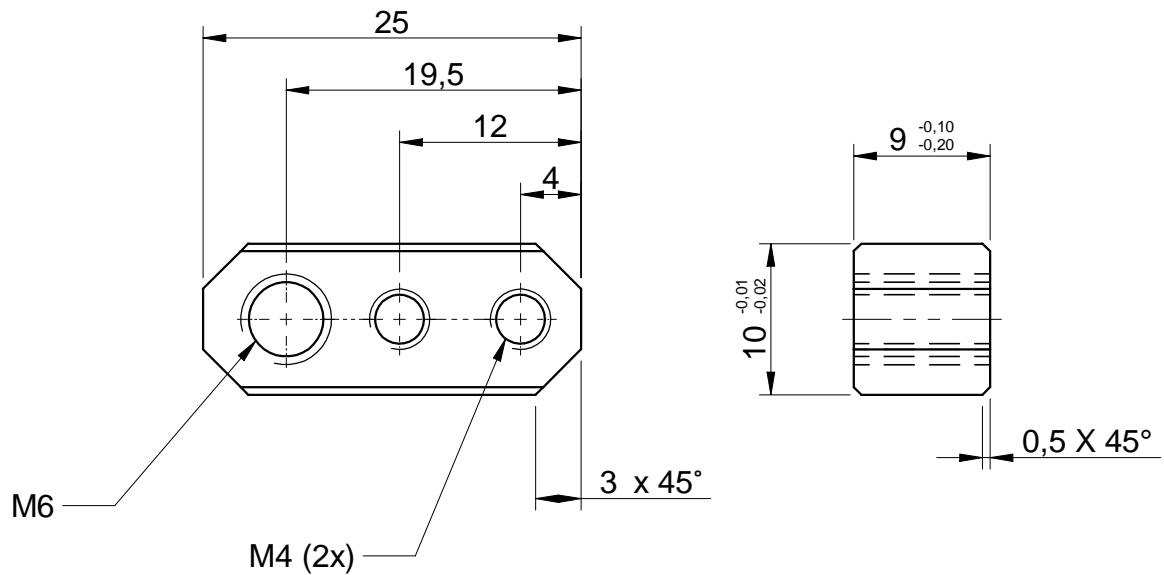
- AGOSTINHO, O.L.; RODRIGUES A.C.; LIRANI, J. (1977). *Tolerância, ajustes, desvios e análise de dimensões*. São Paulo: Blucher.
- BECKWITH, T.G.; and BUCK, N. L. (1991). *Mechanical Measurements*. Reading, Massachussets: Addison-Wesley.
- Boillot, J.P.; Uota, K. (2002). Flexible robotic measuring of weldments on production lines. *Industrial Robot: An International Journal*, v.29, n.1, p.43-48.
- BRYAN, J.B. (1979). *The Abbè principle revisited and updated interpretation*. *Precision Engineering* v.1, n.1, p.129-132.
- COMPAIN, L. (1952). *Métrologie D'Atelier: technologie d'usinage*. 1nd ed. Reading, Paris: Eyrolles.
- DECKER. J.E. AND PEKELSKY, J.R. (1999). *Gauge Block Calibration and the expression of associated measurement uncertainties*. Anais III Seminário de Metrologia Aeroespacial, pp 1-10.
- FONTE, Cidália Maria Parreira da Costa. Ajustamento de observações utilizando o método dos mínimos quadrados. Universidade de Coimbra, 1994.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Guia para Expressão da Incerteza de Medição. Terceira Edição Brasileira, Rio de Janeiro, Agosto de 1993.
- KIEFFER, H. (1948). *Jauges de tolérance et contrôle des pièces*. Lausanne, Editions Scriptor, 1948. In-8°, 312p. + 82p. de publicités. Reliure cartonnée d'éditeur, dos toilé. Première édition en langue française.

- KUNZMANN, H. & WÄLDELE, F. (1988). *Performance of CMMs*. Annals CIRP, v. 39/2, p. 633 – 640.
- Lee, K.H.; Park, H.P. (2000). Automated inspection planning of free-form shape parts by laser scanning. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, v.16, n.4, p.201-210.
- LINK, W. (1997) *Metrologia Mecânica. Expressão da Incerteza de Medição*. PROGRAMA RH METROLOGIA.
- LIRA, F.A. (2001). *Metrologia na indústria*. Editora Érica, São Paulo. 248p.
- MARQUES, A. (2003). *Uma interface eletrônica e computacional para medições a três coordenadas*. 150p. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MIGUEL, P.C., KING, T., DAVIS, J. CMM verification: a survey. *Measurement*, v. 17, p. 1-16, 1996.
- NI, J.; WÄLDELE, F. (1995). *Coordinate Measuring Machine* in: BOSCH, J.A. *Coordinate Measuring Machines and systems*. p.39-74. New York, Marcel Dekker, Inc.
- NIELSEN, H.S. *Communicating Functional Requirements with GD&T*. International Dimensional Workshop, Nashville, EUA, 2004.
- ORREGO, Roxana Maria Martinez ; DI GIACOMO, B. ; ABACKERLY, Álvaro José. Fontes de erros em metrologia a três coordenadas: considerações gerais. *Ciência e Tecnologia*, Piracicaba, v. 8, n. 16, p. 43-56, 2000.
- PANAMBRA: *Controle de Qualidade e Metrologia*. (1961).

- PAZIANI, F. T. (2005). *Desenvolvimento de um sistema automatizado e dedicado de medição*. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- PARKINSON, A.C. (1943). *Engineering inspection: an introduction to work including*. London: Sir Isaac Pitman & Sons, LTD.
- Picard, M.P. (2002). Flexplace: watchmaker precision for robotic placement of automobile body parts. *Industrial Robot: An International Journal*, v.29, n.4, p.329-333.
- PIRATELLI, A. F. (1997). *Método para Avaliação do desempenho de máquinas de medir a três coordenadas através de planejamento de Experimento*, Tese de Doutorado, EESC-USP.
- SALMON, P. (1956). *Métrologie Industrielle*. Paris: Société de Publications Mécaniques.
- SCHMID, W. A.; MARTÍNEZ, R. J. L. *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*. 1 ed. Rev. El Marqués: CENAM, 2004.
- TARASEVICH, Y.; YAVOISH, E. (1963). *Fits, Tolerances and Engineering Measurement*. Moscow: Foreign Languages Publ. House.
- TOLEDO, G.L. (1978). *Estatística Básica*. São Paulo: Atlas.
- TRIOLA, M. F., 1998. *Introdução à Estatística*. 7º Ed., LTC, Rio de Janeiro, RJ.
- TRUCCO, E.; VERRI, A. (1998). *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. 1nd ed, New Jersey: Prentice Hall.
- VUOLO, D.J. (1992). *Fundamentos da Teoria dos Erros*. Ed. Edgard Blücher Ltda . (511.43 V994f.2 – Bib. Central).

WECKENMANN, A.; KNAUER, M.; KILLMAIER, T. Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry. *Journal of Materials Processing Technology* 115, p. 9-13, 2001.

ANEXOS

**OBSERVAÇÕES**

Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0,5x45°

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	± 0,1	± 0,5
>3 a 6	± 0,1	± 1,0
>6 a 30	± 0,2	± 1,5
>30 a 120	± 0,3	± 2,0
>120 a 400	± 0,5	± 3,0
>400 a 1000	± 0,8	± 5,0

Rugosidade superficial conforme DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	▽	▽▽	▽▽▽
✓	√ Rz100	√ Rz25	√ Rz6,3



Máquina:

Peça:

Det: 02 | Qtd: 02 | Material: SAE 1020

Dimensões: QUAD. #1/2"x30

Cliente:

CHAVETA

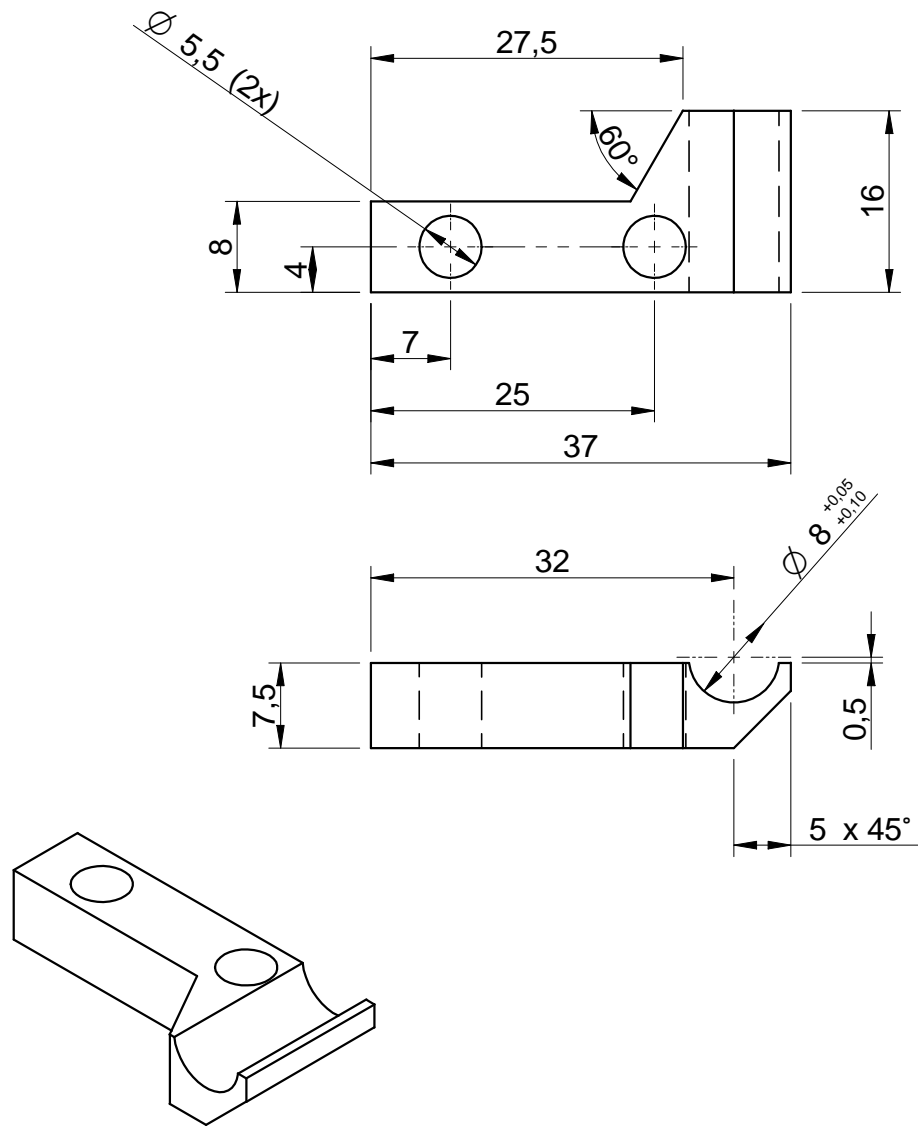
Projetado | Detalhado | Aprovado

Escala:

Desenho n°

Data | 12/9/2009

1:1**CHAVETA****A4**



OBSERVAÇÕES

Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com $0,5 \times 45^\circ$

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$
>3 a 6	$\pm 0,1$	$\pm 1,0$
>6 a 30	$\pm 0,2$	$\pm 1,5$
>30 a 120	$\pm 0,3$	$\pm 2,0$
>120 a 400	$\pm 0,5$	$\pm 3,0$
>400 a 1000	$\pm 0,8$	$\pm 5,0$

Rugosidade superficial conforme DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	∇	$\nabla\nabla$	$\nabla\nabla\nabla$
\checkmark	$\sqrt{Rz100}$	$\sqrt{Rz25}$	$\sqrt{Rz6,3}$

Máquina:

Peça:

TRAVA ESQUERDA

Projetado	Detalhado	Aprovado
User	User	
Data	14/9/2009	

Escala:

1:1

Det: 08 | Qtd: 01 | Material: SAE 1020

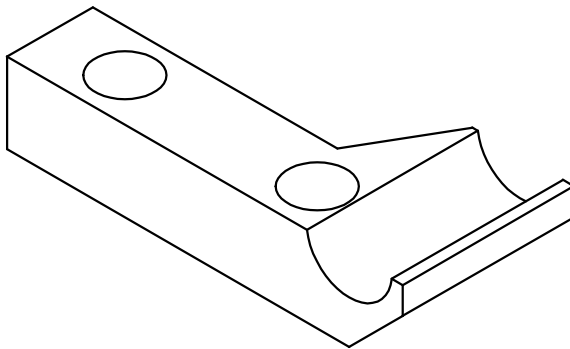
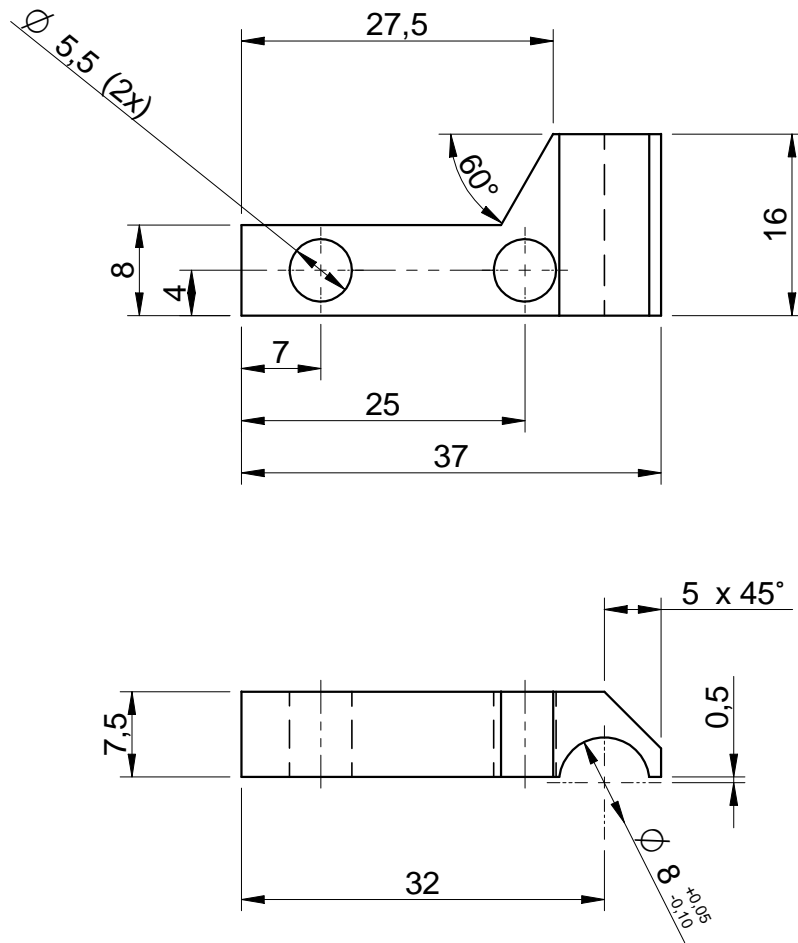
Dimensões: #3/8"x1 1/2"x22

Cliente:

Desenho n°:

TRAVA LVDT ESQUERDA

A4



OBSERVAÇÕES

Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0,5x45°

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	± 0,1	± 0,5
>3 a 6	± 0,1	± 1,0
>6 a 30	± 0,2	± 1,5
>30 a 120	± 0,3	± 2,0
>120 a 400	± 0,5	± 3,0
>400 a 1000	± 0,8	± 5,0

Rugosidade superficial conforme DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	▽	▽▽	▽▽▽
✓	√ Rz100	√ Rz25	√ Rz6,3

Máquina:

Peça:

TRAVA DIREITA

Projetado	Detalhado	Aprovado
User	User	
Data	12/9/2009	

Escala:

1:1

Desenho n°:

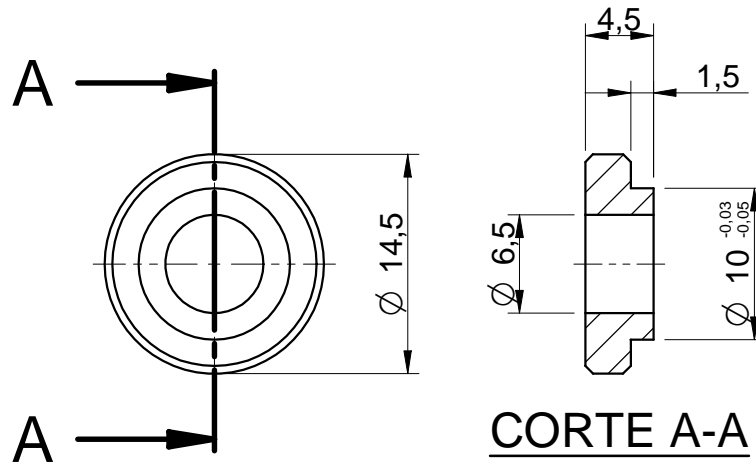
TRAVA LVDT DIREITA

A4

Det: 07 | Qtd: 01 | Material: SAE 1020

Dimensões: #3/8"x1 1/2"x22

Cliente:

**OBSERVAÇÕES**

Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0,5x45°

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	± 0,1	± 0,5
>3 a 6	± 0,1	± 1,0
>6 a 30	± 0,2	± 1,5
>30 a 120	± 0,3	± 2,0
>120 a 400	± 0,5	± 3,0
>400 a 1000	± 0,8	± 5,0

Rugosidade superficial conforme
DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	▽	▽▽	▽▽▽
✓	√ Rz100	√ Rz25	√ Rz6,3



Det: 03 | Qtd: 02 | Material: SAE 1020

Dimensões: Ø5/8"x10

Cliente:

Máquina:

Peça:

ARRUELA TRAVA

Projetado	Detalhado	Aprovado
User	User	
Data	12/9/2009	

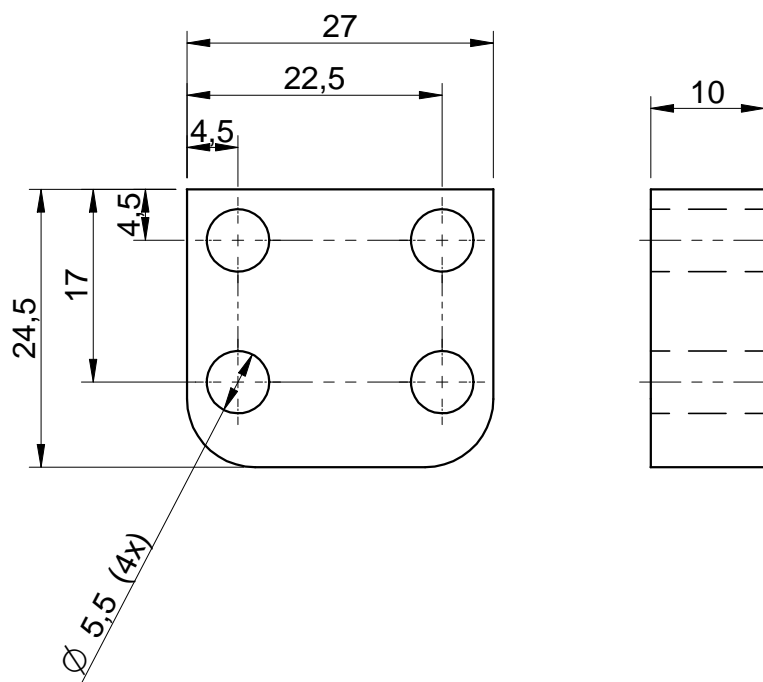
Escala:

1:1

Desenho n°:

ARRUELA TRAVA

A4



OBSERVAÇÕES

Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com $0,5 \times 45^\circ$

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$
>3 a 6	$\pm 0,1$	$\pm 1,0$
>6 a 30	$\pm 0,2$	$\pm 1,5$
>30 a 120	$\pm 0,3$	$\pm 2,0$
>120 a 400	$\pm 0,5$	$\pm 3,0$
>400 a 1000	$\pm 0,8$	$\pm 5,0$

Rugosidade superficial conforme
DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	∇	$\nabla\nabla$	$\nabla\nabla\nabla$
\checkmark	$\sqrt{Rz100}$	$\sqrt{Rz25}$	$\sqrt{Rz6,3}$

Máquina:

Peça:

BASE ESPAÇADORA

Projetado	Detalhado	Aprovado
Data		12/9/2009

Escala:

1:1

Det: 04 | Qtd: 01 | Material: SAE 1020

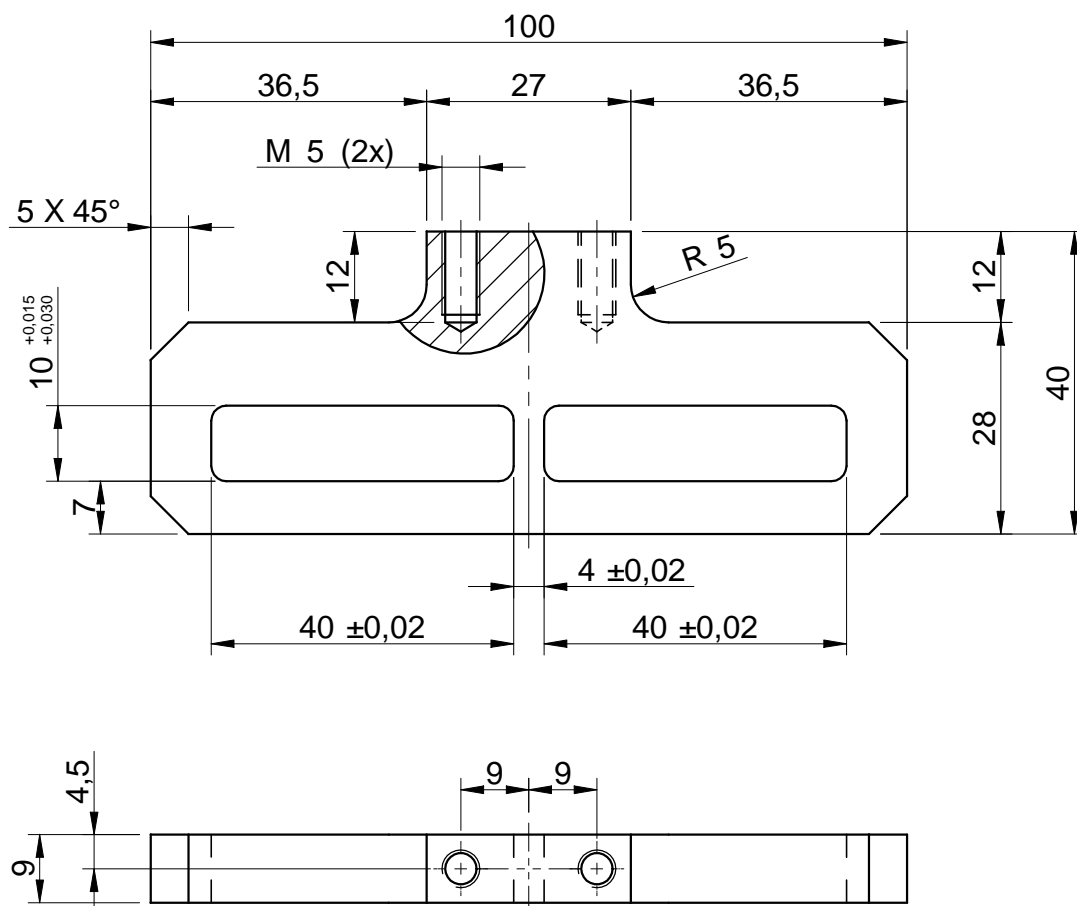
Dimensões: #1/2"x1"x32

Cliente:

Desenho n°:

BASE ESPAÇADORA

A4



OBSERVAÇÕES

Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0,5x45°

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	± 0,1	± 0,5
>3 a 6	± 0,1	± 1,0
>6 a 30	± 0,2	± 1,5
>30 a 120	± 0,3	± 2,0
>120 a 400	± 0,5	± 3,0
>400 a 1000	± 0,8	± 5,0

Rugosidade superficial conforme DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	▽	▽▽	▽▽▽
✓	√ Rz100	√ Rz25	√ Rz6,3

Máquina:

Peça:

BASE DE REGULAGEM

Projetado	Detalhado	Aprovado
Data		12/9/2009

Escala:

1:1

Desenho n°:

BASE REGULAGEM

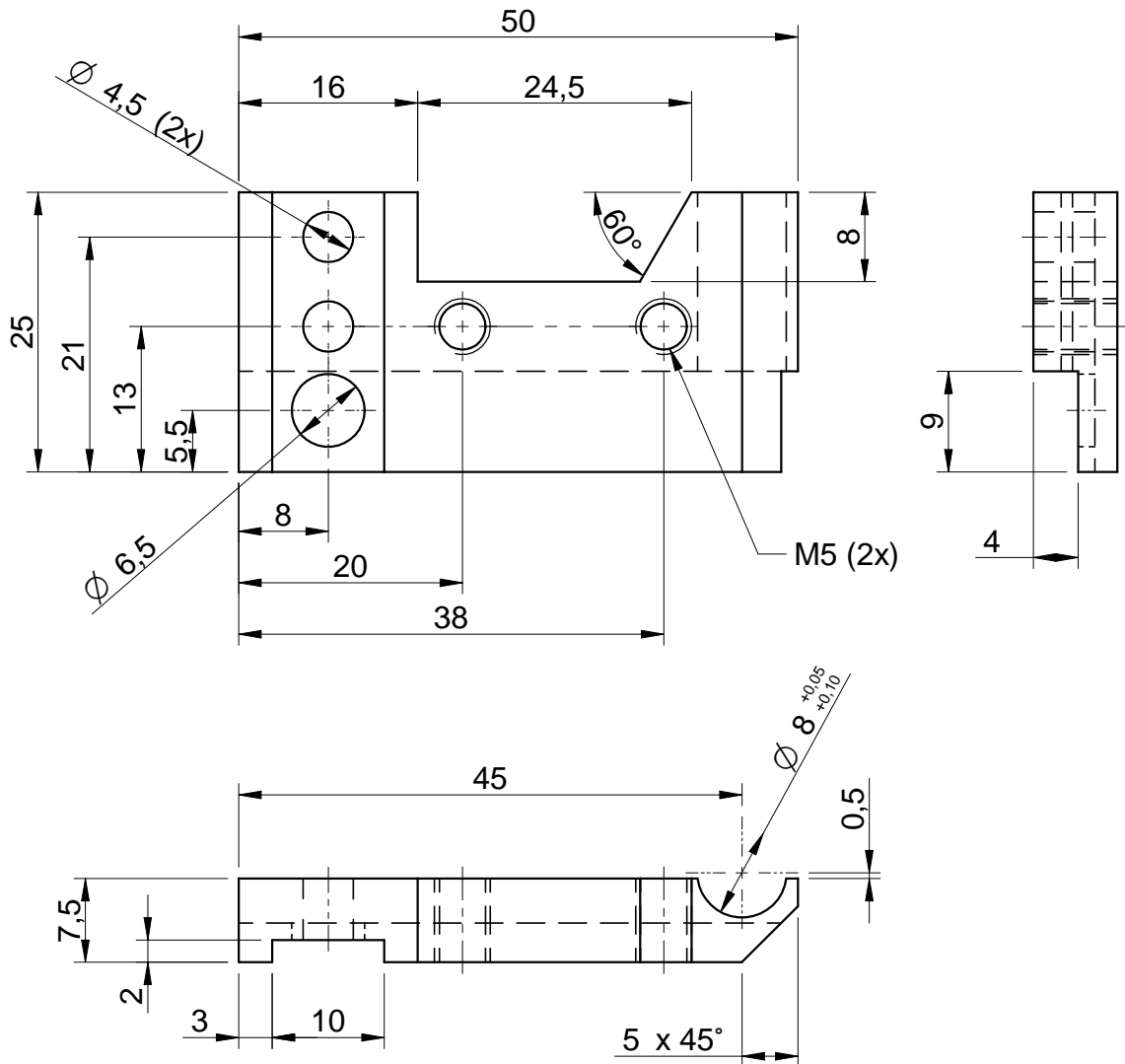
A4

Det: 01 | Qtd: 01 | Material: SAE 1020

Dimensões: #3/8"x2"x105

Cliente:





OBSERVAÇÕES

Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0,5x45°

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	± 0,1	± 0,5
>3 a 6	± 0,1	± 1,0
>6 a 30	± 0,2	± 1,5
>30 a 120	± 0,3	± 2,0
>120 a 400	± 0,5	± 3,0
>400 a 1000	± 0,8	± 5,0

Rugosidade superficial conforme DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	▽	▽▽	▽▽▽
✓	√ Rz100	√ Rz25	√ Rz6,3



Det: 06 Qtd: 01 Material: SAE 1020

Dimensões: #3/8"x2"x30

Cliente:

Máquina:

Peça:

BERÇO DIREITO

Projetado Detalhado Aprovado

Escala:

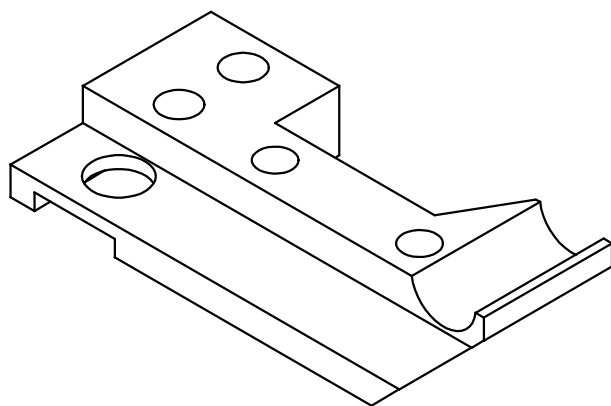
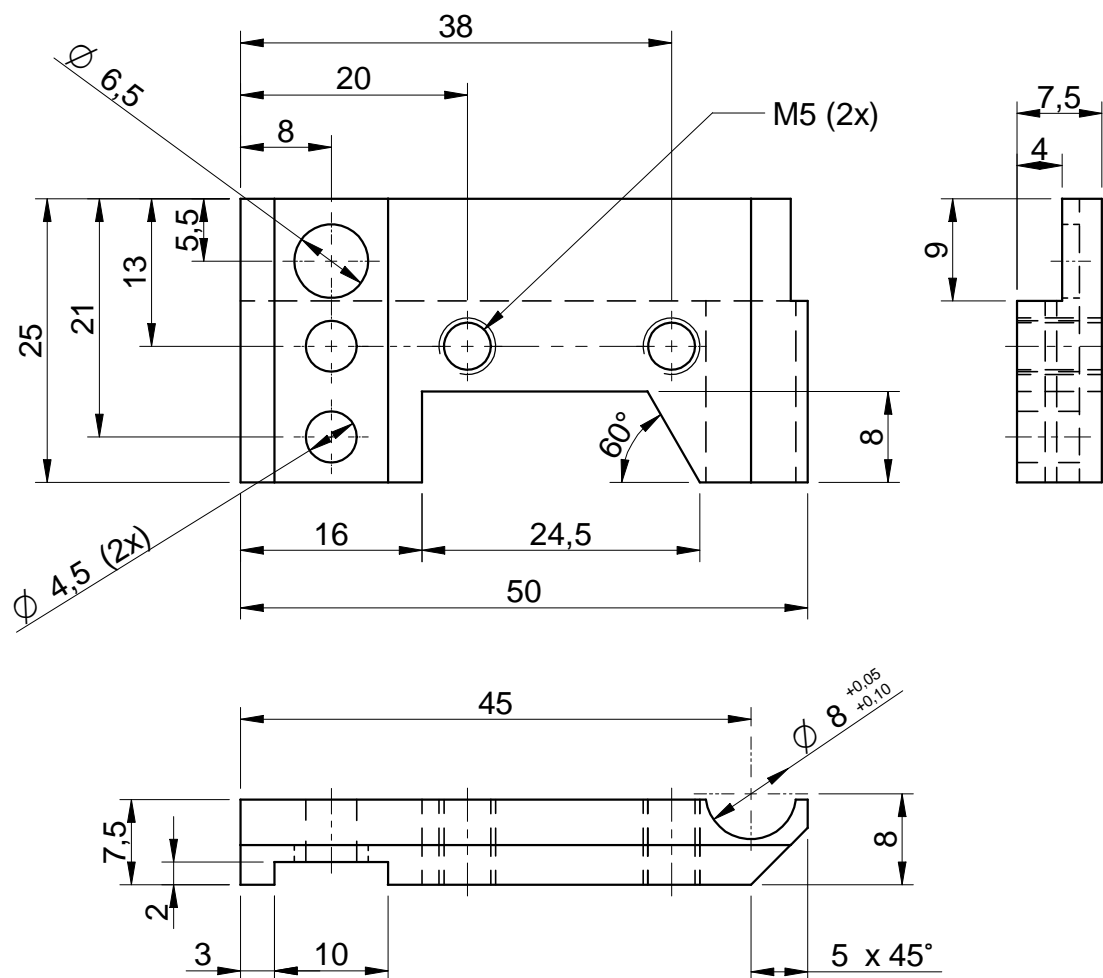
Desenho n°

Data 12/9/2009

1:1

BERÇO DIREITO

A4



OBSERVAÇÕES

Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0,5x45°

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	± 0,1	± 0,5
>3 a 6	± 0,1	± 1,0
>6 a 30	± 0,2	± 1,5
>30 a 120	± 0,3	± 2,0
>120 a 400	± 0,5	± 3,0
>400 a 1000	± 0,8	± 5,0

Rugosidade superficial conforme DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	▽	▽▽	▽▽▽
✓	√ Rz100	√ Rz25	√ Rz6,3

Máquina:

Peça:

BERÇO ESQUERDO

Projetado	Detalhado	Aprovado
Data	12/9/2009	

Escala:

1:1

Desenho n°:

BERÇO ESQUERDO

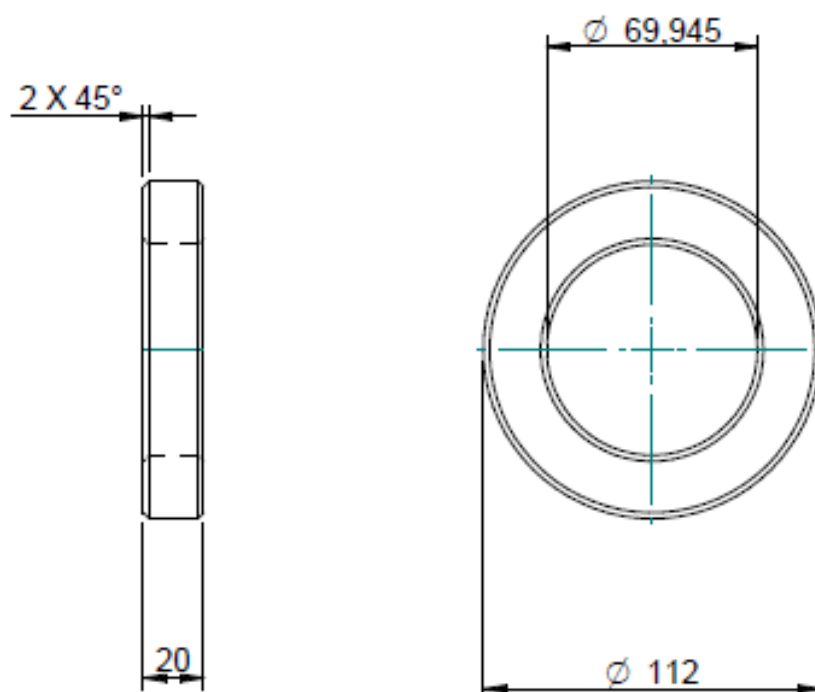
A4

Det: 05 | Qtd: 01 | Material: SAE 1020

Dimensões: #3/8"x2"x30

Cliente:





ISOMÉTRICA 1:2,5

OBSERVAÇÕES

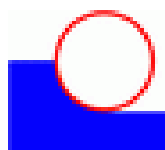
Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0,5x45°

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	± 0,1	± 0,5
>3 a 6	± 0,1	± 1,0
>6 a 30	± 0,2	± 1,5
>30 a 120	± 0,3	± 2,0
>120 a 400	± 0,5	± 3,0
>400 a 1000	± 0,8	± 5,0

Rugosidade superficial conforme
DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	∇	$\nabla\nabla$	$\nabla\nabla\nabla$
✓	√ Rz100	√ Rz25	√ Rz6,3



Det: Qtd: Material: SAE 1020

Dimensões: Ø4 1/2"x25

Cliente:

Máquina:

Peça: **ANEL TESTE 69.945**

Projetado Detalhado Aprovado

RODRIGO RODRIGO

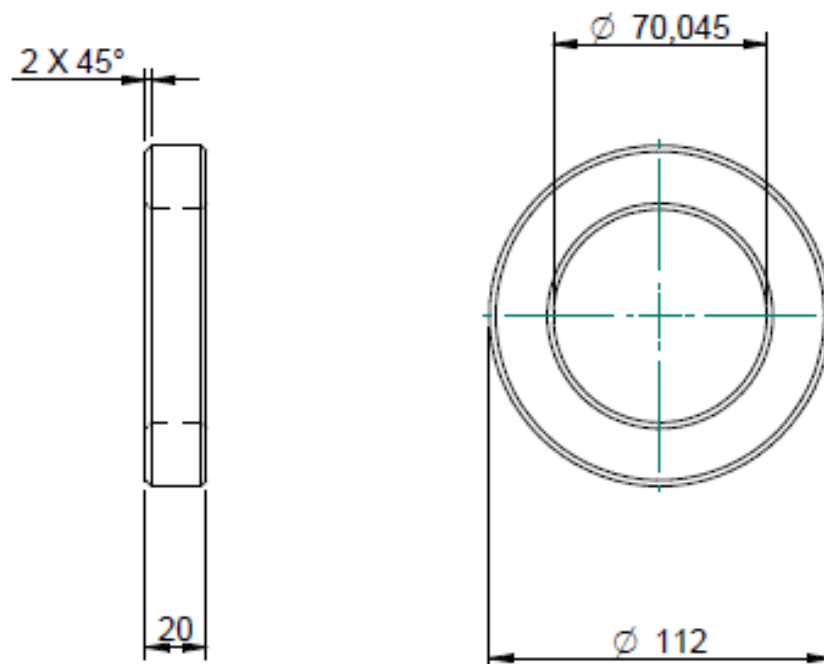
Escala:

1:1

Desenho n°:

Data 14/09/2009

A4



ISOMÉTRICA 1:2,5

OBSERVAÇÕES

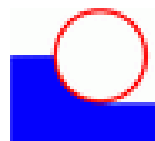
Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0,5x45°

TOLERÂNCIA DIN 7168

Dimensões até	Usinada	Fundida
0,5 a 3	± 0,1	± 0,5
>3 a 6	± 0,1	± 1,0
>6 a 30	± 0,2	± 1,5
>30 a 120	± 0,3	± 2,0
>120 a 400	± 0,5	± 3,0
>400 a 1000	± 0,8	± 5,0

Rugosidade superficial conforme
DIN 3141 e ISO 1302 (Reihe 2)

Bruto	∇	$\nabla\nabla$	$\nabla\nabla\nabla$
✓	√ Rz100	√ Rz25	√ Rz6,3



Det: Qtd: Material: SAE 1020

Dimensões: Ø4 1/2"x25

Cliente:

Máquina:

Peça:

ANEL TESTE 70.045

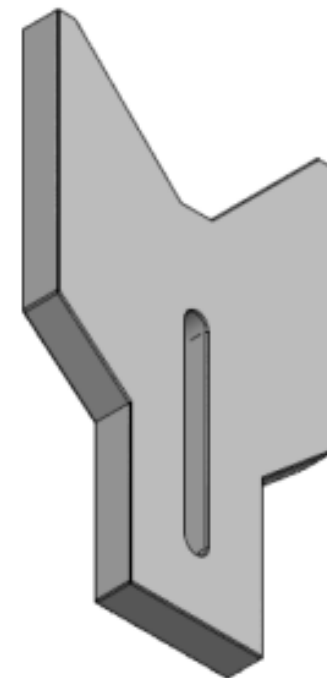
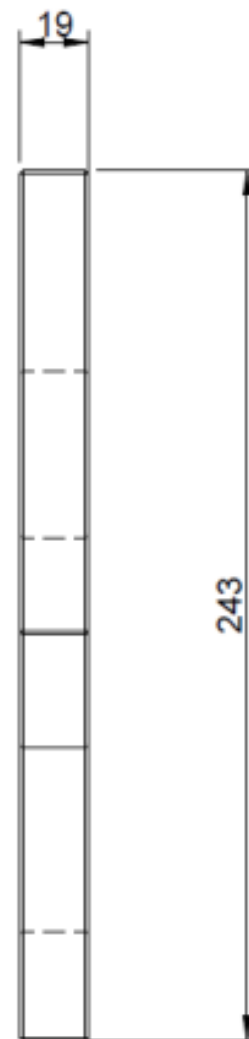
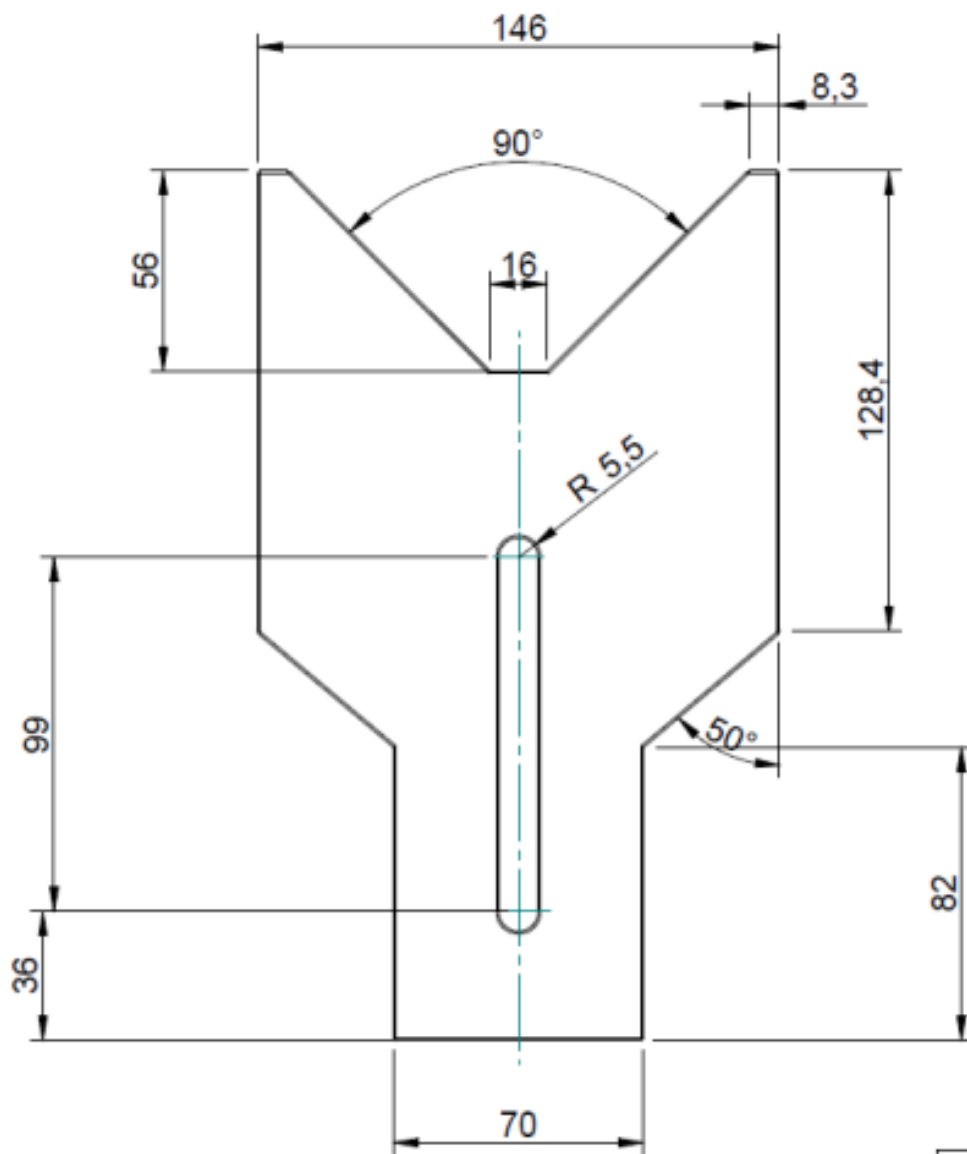
Projetado	Detalhado	Aprovado
RODRIGO	RODRIGO	
Data	14/09/2009	

Escala:

1:1

Desenho n°:

A4



ISOMÉTRICA 1:2

OBSERVAÇÕES				Det:		Qtd:		Material: ALUMINIO	
Onde não indicado, eliminar rebarbas e cantos vivos não funcionais com 0.5x45°						Dimensões: #3/4"x151x248		Cliente:	
TOLERÂNCIA DIN 7168						Máquina:		Peça: PORTA PEÇAS	
Dimensões em	Usada	Função	Projeto: RODRIGO RODRIGO			Escala: 1:2		Desenho n°:	
0,5 a 7	± 0,1	± 0,5	Data: 14/08/2009		A3				
> 7 a 6	± 0,1	± 1,0							
6 a 30	± 0,2	± 1,5							
30 a 120	± 0,3	± 2,0							
120 a 400	± 0,5	± 3,0							
400 a 1000	± 0,8	± 5,0							
Rugosidade superficial conforme DIN 3141 e ISO 1302 (Rele 2)				Bruto		Projeto		Aprovado	
				▽		RODRIGO			
				▽▽		Data			
				▽▽▽		14/08/2009			
				✓ Rz100					
				✓ Rz25					
				✓ Rz6,3					