Campus de São Carlos

**MEDIÇÃO DO TIPO PASSA-NÃO PASSA EM
MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS
COORDENADAS**

FABRICIO JESUS FLORES

Orientador: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

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

**MEDIÇÃO DO TIPO PASSA-NÃO PASSA EM
MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS
COORDENADAS**

FABRICIO JESUS FLORES

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 10 / 01 / 02

Ass.: *Guilherme*

São Carlos

2001

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036863

Class.	TESE-EESC
Cutt.	12244
Tombo	T0027/02

20 1221120

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

F634m Flores, Fabricio Jesus
Medição do tipo passa-não passa em máquina de medir
a três coordenadas / Fabricio Jesus Flores. -- São
Carlos, 2001.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo.

1. Máquina de medir a três coordenadas. 2.
Calibrador do tipo passa-não passa K. 3. Tolerância
geométrica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FABRICIO JESUS FLORES**

Dissertação defendida e julgada em 09-11-2001 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **BENEDITO DI GIACOMO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - USP)

APROVADO

Dra. **DENISE PIZARRO VIEIRA SATO**
(Pós-Doutoranda - Escola de Engenharia de São Carlos - USP)

11 PROVA DE

Prof. Dr. **ANTONIO PIRATELLI FILHO**
(Universidade de Brasília - UnB)

22 PROVA DE

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Aos meus pais Adão e Célia por minha educação e apoio constante.

À minha esposa Margareth.

AGRADECIMENTOS

Ao final deste trabalho, gostaria de agradecer:

Ao Prof. Dr. Benedito Di Giacomo pela oportunidade, orientação e ensinamentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Alessandro Marques, pela amizade e dedicação nas correções e discussões que contribuíram preciosamente para a finalização deste trabalho.

À Helder Augustus, Elisabeth Maria e José Claudio pelos momentos de alegria, pelo incentivo e pelas várias demonstrações de amizade e carinho.

Aos colegas de pós-graduação Denise, Vagner, Roberto, Fabricio, Rosenda, Renata, Fernando, Luiza, Rogério, Luciana, pelo apoio manifestado durante o transcorrer do trabalho.

Aos técnicos Adão Santo Bolzan, José Carlos Rissardi, Luís Carlos Bruno e Luiz Carlos Neves pelo apoio sempre prestado.

À meus pais Adão Jesus Flores e Célia Maria Flores e Flores e meus irmãos por existirem.

Agradecimento todo especial à minha querida esposa Margareth Pereira Flores motivo de alegria e força para superar os momentos difíceis.

Ao CAPES pela bolsa de estudo concedida durante a realização do trabalho.

À Deus, pela vida e por me dar saúde e força.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS, AJUSTES, TOLERÂNCIAS E CALIBRADORES	4
2.1 - Tipos de Máquinas de Medir a Três Coordenadas	5
2.1.1.- Tipo Cantilever com Mesa Fixa	5
2.1.2 - Tipo Ponte Fixa	6
2.1.3 - Tipo Ponte Móvel	6
2.1.4 - Tipo Braço Horizontal	7
2.1.5 – Tipo Pórtico	8
2.1.6 - Tipo Modo "Duplex"	8
2.1.7 - Tipo Braço Horizontal com Mesa Móvel	9
2.1.8 - Tipo Ponte “L”	10
2.2 - Fatores que Influenciam a Medição nas Máquinas de Medir a Três Coordenadas	10
2.2.1 - Fatores de Influência Independentes das MM3C's	11
2.2.2 - Influência Dependentes das MM3C's	14
2.3 - Erros Geométricos	17
2.4 - Procedimentos de Calibração	20
2.5 - Tolerâncias e Ajuste	21
2.5.1 - Sistema de Tolerâncias e ajustes	23
2.6 - Tolerâncias Geométricas	31

2.6.1 - Tolerâncias de Forma e Tolerâncias de Posição	31
2.7 - Calibradores de Tolerância e Referência	33
2.7.1 - Tipos Fundamentais de calibradores de trabalho	34
2.7.2 - Princípio de Taylor	38
2.7.3 - Condição de Máximo e Mínimo Material	38
2.7.4 - Aferição dos Calibradores	39
2.7.5 - Utilização dos Calibradores	40
2.7.6 - Limitações dos Calibradores	40
2.7.7 - Construção e Projetos de Calibradores	41
3 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS SOBRE A OBTENÇÃO E TRATAMENTOS DE DADOS	44
3.1 - Obtenção dos Pontos a serem Avaliados	44
3.1.1 - Equação Vetorial e Equação Paramétrica de um plano	44
3.1.2 - Vetor Normal a um Plano	46
3.1.3 - Cálculo das Projeções dos Pontos no Plano de Referência	47
3.2 - Estratégia de Amostragem	49
3.3 - Método dos Mínimos Quadrados	50
3.3.1 - Algoritmos de Ajuste de Elementos	53
3.3.2 - Retas num Plano Especificado	54
3.3.3 - Retas em Três Dimensões	56
3.3.4 - Planos	58
3.3.5 - Círculos em um Plano Específico	59
3.4 - Circularidade	60
4 - PROPOSTA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA INFORMATIZADO PARA INSPEÇÕES GEOMÉTRICAS DE PEÇAS	63

4.1 - Pesquisa bibliográfica	65
4.2 - Programa Computacional	65
4.3 - Avaliação das peças	65
5 - SISTEMA INFORMATIZADO DE AUXÍLIO À INSPEÇÃO GEOMÉTRICA DE PEÇAS CIRCULARES - <u>GP-SII</u>	66
5.1 - Descrição do equipamento – a parte física	66
5.1.1 - Máquina de Medir a Três Coordenadas do Tipo Ponte Móvel	66
5.1.2 - Microcomputador	69
5.2 - Descrição do programa computacional – a parte lógica do <u>GP-SII</u>	70
5.3 - A atuação do sistema durante a inspeção	82
5.4 - Avaliação do Programa Computacional	84
6 - TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
6.1 - Avaliação do programa computacional	87
6.2.1 - Desvio padrão dos diâmetros com relação ao número de pontos tomados no perfil	92
6.1.3 - Influência do número de pontos tomados no plano de referência	95
6.2 - Teste de Campo	96
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÊNDICE 1	111
APÊNDICE 2	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Máquina de Medir do Tipo Cantilever com Mesa Fixa	5
Figura 2.2 - Máquina de Medir do Tipo Ponte Fixa	6
Figura 2.3 - Máquina de Medir do Tipo Ponte Móvel	6
Figura 2.4 - Máquina de Medir do Tipo Braço Horizontal	7
Figura 2.5 - Máquina de Medir do Tipo Gantry	8
Figura 2.6 - Máquina de Medir do Tipo "Duplex"	9
Figura 2.7 - Máquina de Medir do Tipo Braço Horizontal com Mesa Móvel	9
Figura 2.8 - Máquina de Medir do Tipo Ponte "L"	10
Figura 2.9 - Enunciado do Princípio de Abbé	16
Figura 2.10 - Máquina de Medir do Tipo Ponte Móvel	18
Figura 2.11 - Distribuição dos erros em um corpo rígido	18
Figura 2.12 - Dimensões máximas e mínimas e tolerância t	22
Figura 2.13 - Efeito da tolerância no custo de fabricação	24
Figura 2.14 - Comparação entre tolerância tabelada e calculada pelo novo método	27
Figura 2.15 - Posições dos campos de tolerância em relação a linha zero	28
Figura 2.16 - Afastamentos de referência para furo	29
Figura 2.17 - Interferências em ajustes homólogos	30
Figura 2.18 - Algumas tolerâncias de forma	32
Figura 2.19 - Calibradores de fabricação	34
Figura 2.20 - Calibradores fixos, a) tampão, b) de boca	35

	ii
Figura 2.21 - Aferição de um calibrador de boca ajustável	39
Figura 2.22 - Limitações da utilização de Anel Padrão (A) e Calibrador Tampão (B)	41
Figura 2.23 - Representação gráfica do campo de tolerância para Calibradores	43
Figura 3.1 - Pontos do perfil	47
Figura 3.2 - Efeito da estratégia de amostragem	50
Figura 3.4 - Resultado de calibração comparado com técnicas de medição por coordenadas	62
Figura 5.1 - Máquina de Medir a Três Coordenadas do Tipo Ponte Móvel	67
Figura 5.2 - Ficha Técnica da MM3C utilizada	68
Figura 5.3 - Sonda de contato do tipo “Touch Trigger”	69
Figura 5.4 - Fotografia ilustrativa dos componentes utilizados	70
Figura 5.5 - Diagrama de Bloco para as rotinas do programa	71
Figura 5.6 - Pontos do Perfil	74
Figura 5.7 - Calibrador para medida interna (furos)	79
Figura 5.8 - Calibrador para medida externa (eixos)	79
Figura 5.9 - Visualização dos processos de medições	83
Figura 6.1 - Gráfico da variação do diâmetro (30mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça	88
Figura 6.2 - Gráfico da variação do diâmetro (50mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça	89
Figura 6.3 - Variação do diâmetro (80mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça	89
Figura 6.4 - Gráfico da variação do diâmetro (120mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça	90

Figura 6.5 - Gráfico da variação do diâmetro (180mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça	90
Figura 6.6 - Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 30mm com relação ao numero de pontos do perfil da peça	92
Figura 6.7 - Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 50mm com relação ao número de pontos do perfil da peça	93
Figura 6.8 - Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 80mm com relação ao número de pontos do perfil da peça	93
Figura 6.9 - Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 120mm com relação ao número de pontos do perfil da peça	94
Figura 6.10 - Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 180mm com relação ao número de pontos do perfil da peça	94
Figura 6.11 - Representação gráfica do campo de tolerância de calibradores para eixos de 30 mm	98
Figura 6.12 - Representação gráfica do campo de tolerância de calibradores para eixos de 50mm	99
Figura 6.13 - Representação gráfica do campo de tolerância de calibradores para furos de 80mm	101
Figura 6.14 - Representação gráfica do campo de tolerância de calibradores para furos de 120mm	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número mínimo de pontos para o ajuste	54
Tabela 6.1 - Verificação da influência do número de pontos do plano de referência	96
Tabela 6.2 - Resultados numéricos para inspeções de eixos	98
Tabela 6.3 - Resultados numéricos para inspeções de furos	100

RESUMO

FLORES, F. J. (2000). *Medição do Tipo Passa-Não Passa em Máquina de Medir a Três Coordenadas*. São Carlos, 2000. 120p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A fabricação de produtos cada vez melhores é fator imperativo, pois significa, sob o ponto de vista dos fabricantes, maior fatia de mercado, maiores lucros, e para o consumidor, produtos de melhor desempenho, maior vida útil, maior compacticidade, ou seja qualidade. Por sua vez, garantir esta qualidade exige uma definição adequada das características do produto, obrigando o mundo tecnológico a investir na procura por melhores meios de controle dimensional. A tendência pelo aumento da qualidade dos produtos faz surgir a necessidade de se construir ou aperfeiçoar sistemas de medição que possam avaliar com grande rapidez e acuracidade as mais diversas características dimensionais. O objetivo deste trabalho é implementar um sistema informatizado que permita simular calibradores do tipo Passa-Não Passa em uma Máquina de Medir a Três Coordenadas (MM3C) do tipo Ponte Móvel. Cabe destacar que a grande vantagem do sistema proposto consiste na flexibilidade que se tem nas mudanças das características geométricas de cada calibrador. Com pequenas alterações no programa computacional pode-se modificar tolerâncias, diâmetros e qualidades de inspeção. Para tanto, o sistema deve possuir uma base de dados com informações da peça a ser avaliada. Com auxílio destas informações, o sistema pode orientar o operador sobre os procedimentos a serem tomados durante o processo de inspeção.

Palavras-chaves: Máquina de Medir a Três Coordenadas (MM3C), Calibrador do tipo Passa-Não Passa, Tolerância Geométrica.

ABSTRACT

FLORES, F. J. (2000). *Go-not-go gauge type inspection using a CMM (Computer Measuring Machine)*. São Carlos, 2000. 120p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The manufacturing of better products is an imperative factor, as it results, from the manufacturers point of view, in larger market share, high profit and, for the consumers, better performance and long life products, which means quality. On the other hand, providing quality demands a suitable definition of the product features, pushing the technology world into a search for better means of dimensional control. The tendency of increasing product quality raises the necessity of constructing or improving measurement systems which are able to evaluate a wide variety of dimensional characteristics with high accuracy and velocity. The aim of this work is to accomplish a computer system that simulates go-not-go gauges on a moving bridge coordinate measuring machine. The great advantage of the proposed system consists in the flexibility available to adapt into each gauge different geometric features. With small modifications in the computational program, tolerances, diameters and ISO tolerance can be altered. In order to perform these modifications, the system must hold a database regarding the article to be evaluated. With this information, the system can guide the operator about the procedure to be followed during the inspection process.

Key words: coordinate measuring machine, go-not-go gauge and geometric tolerance.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.

A indústria mecânica cada vez mais tem exigido níveis crescentes de precisão na fabricação e montagem de peças. A corrida em busca desta precisão intensificou-se já no final do século passado, quando evidenciou-se na Europa, a necessidade de intercambiabilidade entre peças, em particular, na indústria armamentista (HUME, 1980).

Sabe-se que o principal fator para obtenção da intercambiabilidade sempre estará ligado à busca de tolerâncias cada vez mais apertadas de peças manufaturadas, o que só é possível com o aumento da precisão na fabricação. A fabricação de produtos cada vez melhores é fator imperativo, pois significa, sob o ponto de vista dos fabricantes, maior fatia de mercado, maiores lucros, e para o consumidor, produtos de melhor desempenho, maior vida útil, ou seja qualidade. Por sua vez garantir esta qualidade exige uma definição adequada das características do produto (DEAN, 1984), obrigando o mundo tecnológico a investir na procura por melhores meios de controle dimensional.

Para que o produto final esteja dentro das especificações técnicas é obrigatório que todos os seus componentes satisfaçam cada uma das especificações de projeto. A tendência pelo aumento da qualidade dos produtos faz surgir a necessidade de se construir ou aperfeiçoar sistemas de medição que possam avaliar com grande rapidez e acuracidade as mais diversas características dimensionais.

Um dos mais nobres, versátil e poderoso instrumento de medição que preenche as necessidades apresentadas pela indústria no controle dimensional de peças manufaturadas é a Máquina de Medir a Três Coordenadas (MM3C). Ela se

destaca entre os instrumentos metrológicos convencionais por possuir alta acuracidade, grande volume de inspeção, rapidez e extrema flexibilidade.

As MM3Cs são instrumentos utilizados para medir a dimensão efetiva de peças. Existem também instrumentos que permitem verificar as dimensões limites de peças, que como se sabe, depende da dimensão e da qualidade de fabricação.

Durante uma verificação, as características dimensionais e geométricas de interesse devem ser comparadas com as especificações de projeto. O uso de calibradores do tipo Passa-Não Passa é um exemplo típico desse processo comparativo.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a inspeção dimensional com um instrumento assistido por computador, a MM3C, ou seja, a simular um calibrador Passa-Não Passa. Primeiramente as posições de interesse na superfície da peça são focadas e digitalizadas, visando a montagem de um conjunto de pontos representativos da superfície ou perfil sendo avaliado. Uma vez adquirido o conjunto de pontos, o objetivo final de um programa computacional proposto é determinar se a geometria da peça, representada pelo conjunto de pontos, satisfaz as especificações de projeto.

Na inspeção metrológica de peças deve-se primeiramente estabelecer se as dimensões medidas estão ou não dentro da zona de tolerância, com resultados de forma "aceita/rejeita", e não o desvio máximo a partir da referência.

Com base nessa argumentação, este trabalho apresenta uma estratégia para a inspeção de características dimensionais de peças circulares de forma a simular em um programa computacional a ação de um calibrador Passa-Não Passa.

Cabe destacar que a grande vantagem do sistema consiste na flexibilidade que se tem nas mudanças das características geométricas de cada calibrador. Com pequenas alterações no Programa Computacional pode-se modificar tolerâncias, diâmetros e qualidades de inspeção, o que não é possível na utilização dos calibradores.

O presente trabalho está dividido em 7 Capítulos que serão apresentados a seguir:

No capítulo dois é apresentado uma revisão bibliográfica abrangente sobre as Máquinas de Medir a Três Coordenadas, tais como: tipos de MM3Cs, fatores que influenciam a incerteza de medição, ajustes e tolerâncias. É dado um enfoque especial aos calibradores de inspeção do tipo Passa-Não Passa, assim como a norma Brasileira de construção de calibradores, a NBR 6406.

No capítulo três são apresentados alguns conceitos básicos necessários para o desenvolvimento desta dissertação, sobre geometria euclidiana espacial e ajuste de curvas utilizando o método dos mínimos quadrados. E apresenta também genericamente o conceito básico sobre erro de circularidade.

No capítulo quatro é apresentada a proposta para implementação de um sistema informatizado para auxílio à inspeção de peças circulares, ao qual deu-se o nome de GP – SII e as etapas envolvidas para a efetuação desta proposta.

No capítulo cinco tem-se a descrição e discussão sobre a implementação do sistema proposto no capítulo anterior, equipamentos envolvidos e o programa computacional gerenciador do sistema.

Já, no capítulo seis, são apresentados e discutidos os testes efetuados com o sistema implementado, resultados e avaliações.

O capítulo sete apresenta conclusões relativas ao projeto implementado e sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS, AJUSTES, TOLERÂNCIAS E CALIBRADORES.

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3C's) são instrumentos metrológicos extremamente potentes que possibilitam medir uma estrutura em três dimensões com grande acuracidade e rapidez, comparados com os instrumentos convencionais. Pode se dizer que a importância dessas máquinas se fundamenta principalmente na sua flexibilidade, que possibilita a medição de peças sob as mais variadas condições e quase sem limitações de forma.

Estas máquinas possuem basicamente três eixos aos quais estão dispostos ortogonalmente, onde as medições são limitadas pela estrutura da máquina. A função básica de uma MM3C é a de prover um sistema físico com alta acuracidade, levando-se em conta a posição da ponta da sonda de medição, a partir do qual possam ser definidas coordenadas de pontos espaciais de interesse. Influências internas ou externas, instabilidade ou imperfeições no sistema que possam alterar a posição ideal da ponta da sonda de medição, são consideradas como fontes de erros.

2.1 – TIPOS DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS.

Segundo a Norma Americana (*ASME B89.4.1,1995*) são onze os tipos de MM3C's :

2.1.1.- TIPO CANTILEVER COM MESA FIXA.

Esta máquina é constituída de três componentes que se deslocam ao longo de guias perpendiculares. A sonda de medição é fixada no componente *z* que possui liberdade de movimentação na direção vertical em relação ao eixo *y* que se move horizontalmente em relação ao eixo *x*. Este tipo de MM3C permite fácil acesso de medição, ideal para peças grandes.

Figura 2.1 - Máquina de Medir do Tipo Cantilever com mesa fixa.

2.1.2 - TIPO PONTE FIXA.

Neste tipo de MM3C a mesa possui movimento na direção y . A sonda é fixa ao eixo vertical z que é transportada por um carro que se movimenta na direção x e é sustentado por uma ponte fixa à estrutura da máquina.

Figura 2.2 - Máquina de Medir do Tipo Ponte Fixa.

2.1.3 - TIPO PONTE MÓVEL.

Este tipo de MM3C possui sonda fixada ao braço horizontal que se movimenta na direção do eixo z e é sustentado pelas colunas verticais que translada na direção de y . Estas máquinas são as mais utilizadas no meio industrial.

Figura 2.3 – Máquina de Medir do Tipo Ponte Móvel.

2.1.4 - TIPO BRAÇO HORIZONTAL

Altas velocidades de medição, versatilidade e níveis relativos de incerteza são características desse tipo de MM3C. Geralmente um dos eixos é bem maior que os outros. Uma desvantagem deste tipo de máquina são os altos *off-sets* provocando grandes contribuições para o erro de Abbé. O eixo maior, influenciado pela gravidade sofre uma flexão do braço, contribuindo desta forma para diminuição de sua acuracidade.

Figura 2.4 – Máquina de Medir do Tipo Braço Horizontal.

2.1.5 – TIPO PÓRTICO.

Este tipo de MM3C é recomendada para medições de peças grandes. Normalmente apresenta-se com volumes de medição superior a 10 metros cúbicos. Os custos que envolvem o sistema são considerados grandes, pois envolvem o controle dual do sistema de mancais e os gastos com a adequação para fixação das vigas são altos.

Figura 2.5 – Máquina de Medir do Tipo Gantry.

2.1.6 - TIPO MODO "DUPLEX".

Este tipo de MM3C na verdade são duas máquinas de medir relacionadas entre seus sistemas de coordenadas, são usadas para medir coordenadas de pontos em comum numa mesma peça. Os dois braços que contém as sondas se movimentam numa base comum.

Figura 2.6 - Máquina de Medir do Tipo "Duplex".

2.1.7 – TIPO BRAÇO HORIZONTAL COM MESA MÓVEL.

Este tipo de MM3C emprega três componentes móveis ao longo de guias perpendiculares. A sonda é fixada ao braço horizontal móvel o qual é suportado perpendicularmente por uma viga que também se movimenta. A peça a ser medida é colocada sobre a mesa que representa a terceira componente móvel.

Figura 2.7 – Máquina de Medir do Tipo Braço Horizontal com Mesa Móvel.

2.1.8 - TIPO PONTE “L”.

Esta máquina é composta por três componentes móveis. A sonda é fixada em um braço que tem movimento vertical em relação aos outros, que tem movimentos horizontais. A peça a ser medida é colocada sobre a mesa.

Figura 2.8 – Máquina de Medir do Tipo Ponte “L”.

2.2 – FATORES QUE INFLUENCIAM A MEDIÇÃO NAS MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS.

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas assim como outros instrumentos de medir estão sempre sujeitos a erros. É importante conhecer estes erros bem como seus fatores de influencia para posteriores compensações.

O desempenho das MM3C's geralmente difere do especificado pelo fabricante devido aos diferentes fatores que influenciam a incerteza de medição (HARVIE, 1986). Influencias internas ou externas que venham causar mudanças nas coordenadas medidas, são consideradas fontes de erros que podem ser dependentes ou independentes da máquina (DI GIACOMO & PURQUERIO, 1991).

Os desvios de planicidade e de retilineidade que existem nos componentes das MM3C's são fatores que influenciam a incerteza de medição. Além destes, existem outros, tais como, montagem dos eixos coordenados ortogonais, erros de esfericidade da sonda de medição, erro de planicidade do desempenho, variação do comprimento das escalas, etc. Existe ainda fatores conhecidos como independentes da máquina que influenciam a incerteza da mesma. Tais fatores são originizados durante a utilização da MM3C, tais como, técnicos competentes e instalações apropriadas.

2.2.1 – FATORES DE INFLUÊNCIA INDEPENDENTES DAS MM3C's.

➤ ERROS DEVIDO A VARIAÇÕES DE TEMPERATURA.

Segundo o fabricante, a MM3C deve atender a Norma NBR 6165 onde define que a máquina deve operar a uma temperatura de referência de 20⁰C. Variações desta temperatura causam mudanças nos elementos da máquina, nas peças a serem medidas e também nos comprimentos das escalas de medição.

Os componentes que compõem a MM3C possuem diferentes tipos de coeficiente térmicos que sofrem diferentes deformações quando submetidos a outras temperaturas ($\neq 20^0\text{C}$), por este motivo, a resposta às variações térmicas são mais diversas. Eventos temporais de variação de temperatura, com diferentes inércias térmicas para os diferentes componentes da MM3C, significam tempos diferentes para que se atinja uma nova temperatura de equilíbrio para cada um dos elementos .

As cinco principais fontes térmicas são:

1 - Influência do aquecimento ou resfriamento do ambiente em que se encontra a máquina;

2 - Influência do aquecimento ou resfriamento vindo dos vários sistemas de abastecimento;

3 - Efeito do calor do corpo humano;

4 - Calor gerado pela própria máquina e por outras máquinas existentes nas proximidades;

5 - Memória térmica (BOSCH, 1995).

Os métodos mais utilizados para diminuir estas influências térmicas nas MM3C's são:

- Utilizar um ambiente isento de variações térmicas para a instalação da máquina;

- Compensar os efeitos significativos devido a interferências térmicas;

- Usar materiais e técnicas de projeto que minimizem as reações às interferências térmicas.

Deve-se também lembrar que é importante controlar a umidade relativa do ambiente de trabalho, em torno de 40% a 60%.

➤ INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO E DO PESO PRÓPRIO DA PEÇA.

A posição e a forma geométrica da peça a ser medida sobre o desempenho causam deformações que dependem do tipo e do tamanho da MM3C. Estas deformações somadas com o peso próprio da máquina causam modificações das coordenadas medidas.

➤ ERROS DEVIDO A VIBRAÇÕES.

A fundação, o suporte ou base de isolamento sobre a qual a MM3C se encontra pode estar sujeito a movimentos induzidos como resultado de forças

externas que se transmitem pelo solo. Por exemplo: Uma máquina ferramenta que esteja operando próximo ao ambiente de medição.

A acuracidade e a repetibilidade da medição ficará comprometida caso estes movimentos induzidos se transmitam à máquina, pois existirão movimentos relativos entre a sonda de medição, os eixos da MM3C e a peça a ser medida.

➤ INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO DA PEÇA.

Antes de iniciar a medição em uma MM3C deve-se conhecer as tolerâncias dimensionais, de forma e acabamento superficial da peça a ser medida. Neste caso, o diâmetro da ponta da sonda pode ser definido de forma que a influência da rugosidade seja minimizada. Ocasionalmente erros de medição também são causados por rebarbas, cantos danificados, fixações inconvenientes da peça e o suporte impróprio durante a medição também são fatores de influência.

➤ OUTROS ERROS.

Outros fatores que influenciam a medição são:

- *Energia Elétrica:* O suprimento de energia elétrica deve ser uniforme e a tensão deve estar de acordo com as especificações do fabricante da MM3C.
- *Ar Comprimido:* O suprimento de ar afeta a medição e a vida útil da máquina. A presença de partículas de óleo e água no suprimento de ar comprimido devem ser evitadas, pois podem afetar o desempenho dos mancais aerostáticos, aumentam o atrito e conseqüentemente o desgaste.
- *Partículas suspensas no ar :* Partículas suspensas no ar, pressão atmosférica e como foi dito anteriormente a umidade relativa, devem ser monitorados e com maior atenção quando se utilizam como escala um sistema interferométrico (BOSCH, 1995)

2.2.2 - INFLUÊNCIA DEPENDENTES DAS MM3C's.

➤ ERROS DEVIDO O SISTEMA APALPADOR.

As sondas ou apalpadores são dispositivos responsáveis pela interface da superfície da peça a ser medida e o sistema de medição. Estas sondas ou apalpadores podem ser classificadas em dois grupos: As sondas de contato e as sondas sem contato.

Esse sensor tem como função disparar um sinal elétrico sempre que for tocado na superfície da peça, “congelando” desta forma as coordenadas do ponto medido para que o microcomputador tenha acesso a esses dados.

Em peças de baixa dureza a esfera da sonda pode causar deformações permanentes. Quando sondas de contato são usadas em operações manuais, o que normalmente ocorre é a variação significativa das forças de contato, surgindo assim deformações na sonda em termos da sua repetibilidade e características sistemáticas que influenciam na incerteza de medição.

O tipo de sonda mais utilizado é a de contato, também conhecida como *Touch-Trigger*. Este tipo de sonda possui a capacidade de adaptação de várias hastes no momento de medição, permitindo ao usuário uma maior versatilidade e rapidez na avaliação das formas. (YANG et al, 1996)

➤ DESEMPENO DE REFERÊNCIA.

O desempenho é um componente essencial da MM3C, pois serve como superfície de referência onde serão feitas as medidas. Tais desempenos podem ser feitos de granito natural, sintético ou ainda em ferro fundido.

O erro de planicidade não deve ultrapassar valores significativos. Pode-se observar que este erro é função também da forma geométrica, da área de contato

entre a peça e o desempenho, além da posição que a mesma ocupa durante a medição sobre o desempenho.

➤ **ERROS DEVIDO A PESO PRÓPRIO.**

Sabe-se que todas as peças estão sujeitas a deformações pela ação de seu peso próprio ou por forças externas que atuam sobre elas. Erros resultantes devido ao seu próprio peso ocorrem em todas as máquinas, porém, a sua grandeza depende do projeto da estrutura e da sua conseqüente rigidez. Este peso, conduz à deformações das guias e posteriormente será considerada uma fonte de erro.

➤ **ERROS DEVIDO A FORMA DAS GUIAS.**

Sabe-se que as MM3C's dependem fundamentalmente das guias e consequentemente das suas precisões. Segundo a Norma Brasileira *P-NB 273* "Tolerâncias de Forma e Tolerâncias de Posição" as guias asseguram condições corretas de funcionamento e de intercambialidade de elementos mecânicos. Os erros de forma e posição podem ser vistos como erros macrogeométricos que sempre estão presentes durante o processo de usinagem das guias. São exemplos desses erros os desvios de retilidade, circularidade, cilíndricidade, concentricidade, planicidade, paralelismo, etc. Quanto menor forem estes erros na fabricação das guias, menores serão os erros da máquina.

➤ **EFEITOS DO SOFTWARE.**

Atualmente maior atenção é dada ao Software da MM3C. As coordenadas do centro da sonda de medição no momento do toque com a peça devem ser armazenadas pelo computador para posterior avaliação. Obtidas estas coordenadas, um algoritmo matemático é aplicado para se obter o perfil da peça

(WECKENMANN & HEINRICHOWSKI, 1985). Já é conhecido que o software é aplicado a uma forma bem definida e o resultado pode ser alterado significativamente de acordo com um algoritmo utilizado e com o número de pontos tomados.

➤ INFRINGIMENTO DO PRINCÍPIO DE ABBÉ.

O princípio de Abbé foi enunciado em 1890 pelo professor Abbé, e diz o seguinte: “A linha de referência de um sistema de medição deve ser coincidente com a linha de medição da peça”. A figura 2.9 ilustra o enunciado.

Figura 2.9 – Enunciado do Princípio de Abbé.

A concepção do projeto de máquinas ferramentas e máquinas de medir com sistema de medição de deslocamento em linha com o deslocamento a ser medido são referentes ao princípio de Abbé.

Bryan reavaliou o princípio de Abbé para situações onde não é possível o projeto do sistema de medição do deslocamento em linha com o deslocamento. Sendo assim, Bryan propôs o que se conhece como princípio generalizado de Abbé: “O sistema de medida de deslocamento deve estar em linha com o ponto funcional no qual o deslocamento é medido. Se isto não for possível, todas as guias que transferem o deslocamento devem estar livres de movimentos angulares ou dados do

movimento angular devem ser usados para calcular as compensações de possíveis desvios ”. A primeira frase é a recomendação original de Abbé. A Segunda frase sugere duas opções adicionais:

- *Sem movimento angular*: Sabe-se que estas guias absolutamente isentas de movimentos angulares são impossíveis de serem obtidas pelos processos de fabricação atualmente existentes.

- *Usando os dados do movimento angular*: Os dados dos movimentos angulares devem ser usados para calcular e corrigir os erros de Abbé (BRYAN, 1979). No caso de Máquinas de Medir a Três Coordenadas, como o interesse está em saber qual a verdadeira posição do apalpador no espaço de trabalho, esta compensação pode ser feita após ter-se efetuado uma medição.

2.3 – ERROS GEOMÉTRICOS.

Movimentos indesejáveis nas direções não preferencias durante uma translação serão interpretados como erros geométricos. Estes erros são definidos como erros individuais dos elementos de uma máquina, por exemplo o erro de retilineidade do movimento.

Os erros geométricos das MM3C's são classificados em dois grupos: O primeiro grupo abrange todos aqueles que são individuais a cada componente da máquina e o segundo grupo aqueles que acontecem através da relação entre os componentes. Estes erros são chamados de paramétricos e não paramétricos respectivamente (CARDOZA, 1995).

Os componentes principais dessa MM3C são: a ponte que movimenta na direção do eixo "Y", um carro que se desloca na direção do eixo "X" e outro na direção do eixo "Z", a mesa, as escalas para seus respectivos eixos e uma sonda.

Figura 2.10 – Máquina de Medir do Tipo Ponte Móvel.

O carro responsável pelo movimento na direção "X" que se desloca sobre a ponte é mostrado na figura 2.10. Nota-se que o carro do eixo "X" acomoda também o eixo "Z" e qualquer movimento realizado neste carro causará movimentos na ponta da sonda de medição.

Figura 2.11 – Distribuição dos erros em um corpo rígido.

As leituras da escala do eixo “X” responsáveis pela medição do deslocamento do carro, não representará o valor verdadeiro dos deslocamentos sofridos. A diferença entre o valor indicado e o ideal será chamado de erro de posição propriamente dito.

Na Figura 2.11, levando-se em consideração que o carro se movimenta na direção “X” observa-se movimentos indesejáveis em outras direções que não a preferencial. Estes movimentos são originados devido a folgas, erros de forma dos componentes, deformações térmicas dos componentes, forças, etc. O movimento indesejável na direção “Y” perpendicular ao eixo “X” devido ao deslocamento do carro é chamado de erro de retilineidade na direção “Y” devido ao movimento em “X”. Deslocamentos indesejados na direção do eixo “Z” devido à translação do carro na direção em “X” serão chamado de erro de retilineidade na direção “Z”.

Durante o deslocamento do carro na direção “X” ocorrem também rotações indesejáveis em torno de cada um dos três eixos do sistema. É definindo como “pitch” as rotações em torno do eixo “Y”, “yaw” rotações em torno do eixo “Z” e “roll” rotações em torno do próprio eixo “X” como mostra a Figura 2.11.

Desta forma os erros paramétricos são três os erros de rotação, dois os erros de retilineidade e um o erro de posicionamento. Sendo assim, são seis os graus de liberdade de um corpo rígido e conseqüentemente são 6 os erros geométricos que ocorrem durante a translação de cada um dos carros. Então o número de eixos da maioria das MM3C's, um conjunto de 18 erros geométricos podem ser esperados. Além desses erros, outros três gerados pelas relações entre os componentes podem ser observados, os erros de ortogonalidade entre os eixos coordenados. Estes erros são os conhecidos como não paramétrico. Desta forma define-se os erros paramétricos e os não paramétricos, que se somam 18 e 3, respectivamente, totalizando os 21 erros geométricos (CARDOZA, 1995).

2.4 – PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO.

Visto a presença de erros num processo de medição numa MM3C, deve-se conhecer quantitativamente esses erros para uma posterior compensação. A calibração desempenha um papel muito importante que é determinar o comportamento desses erros.

Segundo BURDEKIN, DI GIACOMO E XIJING (1984), a calibração das MM3C's vêm crescendo cada vez mais, pois é através dela que o comportamento metrológico da máquina é levantado. Existem dois tipos de procedimento de calibração de uma MM3C que são:

a) - *Calibração Direta* - Este tipo de calibração tem como objetivo avaliar os erros individuais em cada eixo preferencial da máquina e assim determinar características individuais, classifica-las, ordena-las, conforme a significância desses erros. Este tipo de calibração consome muito tempo e custos são consideravelmente altos.

- *Método de Calibração Direta* – Como já foi dito anteriormente, este método avalia os erros individualmente em cada um dos eixos preferenciais, podendo ser separados basicamente em dois tipos: o método do volume dividido e o paramétrico.

Uma bibliografia mais detalhada sobre calibrações pode ser encontrada em (CARDOZA, 1995).

b) - *Calibração Indireta* – O procedimento de calibração indireta tem como objetivo avaliar os erros da máquina por intermédio de peças padrões pré-calibradas e normalizadas. Este tipo de ensaio é bastante utilizado por ser rápido e barato.

- *Método de Calibração Indireta* – Como foi dito, este método utiliza padrões corporificados pré qualificados. Entretanto, são grandes as dificuldades de se escolher o melhor método. A seguir cita-se alguns dos padrões utilizados.

- Barra de Esferas;
- Padrão de Círculos;
- Padrão de Esferas;
- Círculo Padrão;
- Padrão Passo a Passo;
- Padrão Tetraédrico.

Não é objetivo deste trabalho seguir a fundo os processos de calibrações. Vamos apenas citar resumidamente alguns métodos de calibrações indireta e direta.

2.5 – TOLERÂNCIAS E AJUSTE.

Intercambiabilidade é a propriedade de, se montar um conjunto mecânico e sem nenhum retrabalho dará condições para que o mecanismo funcione de acordo com o que foi projetado.

A metrologia é praticamente o ponto de partida para a implantação de uma estrutura gerencial totalmente voltada para a qualidade. É ela que se responsabiliza pela produção de grandes quantidades de peças, com segurança, sem que a intercambiabilidade seja esquecida. Com isto, uma grande parcela de tempo é gasta na avaliação de características dimensionais.

A variabilidade nos processos fabris deve ser vista com muita atenção. Sabe-se que peças fabricadas com uma única dimensão são impraticáveis, pois existem elementos que apresentam constantes alterações no decorrer da operação de fabricação. As características do material, desgaste da ferramenta, falta de rigidez da máquina e outros, contribuem para que as dimensões das peças variem. As peças

são, portanto, confeccionadas com dimensões que se afastam para mais ou para menos em relação à dimensão desejada, isto é, as dimensões das peças apresentam uma variação. A montagem de duas peças se assegura somente no caso em que as dimensões limites de tolerância tenham sido pré-estabelecidas. Desta forma defini-se dimensões limites como sendo aquelas dentro das quais variam as reais. Estas são conhecidas como dimensões limites máxima e mínima (Figura 2.12). Desta forma, peças intercambiáveis são aquelas fabricadas com um grau de precisão previamente estabelecido em suas dimensões nominais, através das *dimensões limites*.

A variação permissível na fabricação de uma determinada peça é determinada por sua tolerância, que é a pela diferença entre as dimensões limites máxima e mínima, a Figura 2.12 ilustra isto.

Ajuste é entendido como sendo o modo em que se monta duas peças, isto é, o modo de assegurar que as peças são unidas firmemente, ou com liberdade de deslocamento relativo.

Figura 2.12 – Dimensões máximas e mínimas e tolerância t .

A norma *NB-86* fixa conjunto de princípios, formulas, regras e tabelas afim de permitir a escolha adequada de tolerâncias e ajustes visando a fabricação de peças intercambiáveis. Esta norma também apresenta as definições de limites, tolerâncias e ajustes. As definições são:

2.5.1 – SISTEMA DE TOLERÂNCIAS E AJUSTES.

UNIDADE DE TOLERÂNCIA.

O cálculo da tolerância é baseado na unidade de tolerância (i), dada por:

$$i = 0.45\sqrt[3]{D} + 0.001D \quad (2.1)$$

onde:

i = unidade de tolerância expressa em micrômetros (μm);

D = média geométrica dos dois valores extremos de cada grupo de dimensões fixada na tabela 01 do anexo, expressado em milímetro (mm).

➤ QUALIDADE DE TRABALHO.

Na norma ISO 286-1 são apresentadas dezoito qualidades de trabalho (graus de tolerância), dadas por: IT01, IT0, IT1, IT2, IT3, ..., IT16. As tolerâncias das qualidades IT01 até IT3, para eixos, e as de IT01 até IT4 para furos, são recomendadas para calibradores. As diferenças para furo e eixo se dão pelo fato de poder-se fabricar eixos com maior facilidade, ou seja, a variabilidade é menor para este tipo de ajustagem. As tolerâncias das qualidades de IT4 até IT11, para eixos, e de IT5 até IT11, para furos, são destinadas a peças a serem associadas umas às outras. Acima destas qualidades, tanto para eixos como para furos, são particularmente previstas para execução mais grosseiras de peças isoladas.

No gráfico da figura 2.14 observa-se que o custo aumenta significativamente com a diminuição da tolerância de uma mesma dimensão (FITZPATRICK, 1993).

Figura 2.14 – Efeito da tolerância no custo de fabricação.

As tolerâncias estão calculadas e tabeladas para os vários grupos de dimensões e para as várias qualidades de trabalho, como mostra a tabela A.1 do apêndice 1.

Lévesque (1996) propôs que os dados tabelados da ISO 286-1 e ISO 286-2 sejam substituídos por fórmulas que forneçam tolerâncias de uma forma contínua. Assim, o uso de uma fórmula simples para calcular diretamente as tolerâncias seria mais eficiente que a busca em tabelas correspondendo a uma dada dimensão e qualidade. As fórmulas dadas na ISO 286-1 não permitem uma variação contínua da tolerância com respeito a qualidade.

Duas dimensões diferentes e próximas deveriam apresentar tolerâncias diferentes e próximas. No entanto, pode-se observar que duas dimensões diferentes de uma mesma faixa e mesma qualidade, as suas tolerâncias são as

mesmas. Já, se essas dimensões fossem bem próximas e de faixas diferentes com mesma qualidade, as tolerâncias seriam diferentes.

O método de aproximação proposto por Lévesque (1996) usa um sistema de tolerância com variação contínua com respeito a dimensão e a qualidade. Em todos casos, as tolerâncias calculadas estarão dentro dos limites dos valores tabelados pela norma ISO com arredondamento de dois dígitos significativos.

A fórmula básica é, para todas dimensões e qualidades:

$$Tolerância = IT = C f(d) g(Q) \quad (2.2)$$

Para qualidades as IT6 até IT18, os três fatores são dados por:

$$C = \frac{1}{1135 + 85 [\log(d/62,5)]^2} \quad (2.3)$$

$$f(d) = 0,45 d^{1/3} + 0,001d + 47(10^{-6}) d^{3/2} + 0,05 \quad (2.4)$$

$$g(Q) = 10^{(Q-1)/5} \quad (2.5)$$

onde:

d : é a dimensão em milímetro para qual a tolerância é calculada;

Q : é o número da qualidade (IT).

A tolerância calculada por estas fórmulas é dada em milímetro.

Para qualidades IT1-IT5, a equação (2.2) é a mesma, enquanto os coeficientes C , $f(d)$ e $g(Q)$ devem ser calculados por:

$$C = \frac{1}{1650 - 140 \log(d)} \quad (2.6)$$

$$f(d) = 1,35 [\log(d)]^3 - 4 [\log(d)]^2 + 4 [\log(d)] + 4 [\log(d)] + 0,315 \quad (2.7)$$

$$g(Q) = 10^{(Q-1)/R_d} \quad (2.8)$$

O valor R_d que aparece na equação (2.8) é dado conforme a faixa de dimensões, ou seja:

Para dimensões menores ou iguais a 50mm:

$$R_d = 6,4 d^{-0,08} \quad (2.9)$$

Para dimensões maiores de 50mm e menores ou iguais à 500mm:

$$R_d = 1,75 d^{0,233} \quad (2.10)$$

Para dimensões maiores que 500mm e menores ou iguais à 3150mm:

$$R_d = 9,4 d^{-0,0375} \quad (2.11)$$

O gráfico da Figura 2.15 mostra a comparação entre as tolerâncias tabeladas (curva 1) e a tolerância calculada pelo novo método para qualidade 8 (curva 2).

Figura 2.15 – Comparação entre tolerância tabelada e calculada pelo novo método.

➤ CAMPOS DE TOLERÂNCIA.

Como já foi dito, a tolerância fundamental é calculada a partir da unidade fundamental (i) para as diversas qualidades e os vários grupos de dimensões. Estas tolerâncias fundamentais fornecem o valor total da tolerância para um determinado grupo de dimensões dentro de uma determinada qualidade.

A posição do campo de tolerância (afastamento superior e inferior) em relação a linha zero ou neutra é designada por uma ou duas letras:

Furos: A – B – C – CD – D – E – EF – F – FG – G – H – J – JS – K – M – N – P – R – S – T – U – V – X – Y – Z – ZA – ZB – ZC.

Eixos: a – b – c – cd – d – e – ef – f – fg – g – h – j – js – k – m – n – p – r – s – t – u – v – x – y – z – za – zb – zc.

A Figura 2.16 mostra a posição dos campos de tolerância, que são localizadas pelos afastamentos de referência, em relação à linha zero (Diâmetro Nominal).

Figura 2.16 – Posições dos campos de tolerância em relação a linha zero.

AFASTAMENTOS DE REFERÊNCIA.

Os valores dos afastamentos de referência para eixo são tabelados pela NB-86. Com um dos afastamentos de referência (superior ou inferior) e com a tolerância, consegue-se facilmente obter o outro:

$$\text{Para eixo: } a_s - t = a_i \quad (2.12)$$

$$\text{Para furo: } A_s - t = A_i \quad (2.13)$$

onde:

A_s = afastamento superior do furo (μm);

A_i = afastamento inferior do furo (μm);

a_s = afastamento superior do eixo (μm);

ai = afastamento inferior do eixo (μm);

t = tolerância (μm).

Figura 2.17 - Afastamentos de referência para furo.

Já, para os furos, através de duas regras, recorre-se à mesma tabela dos valores de referência para o cálculo dos eixos.

Regra Geral:

♦ Os limites de variação dimensional dos furos são exatamente simétricos, em relação à linha zero, dos eixos do mesmo símbolo (letra e qualidade), ou seja, o valor do afastamento inferior do furo é igual, em módulo, ao afastamento superior do eixo.

$$A_i = -a_s \quad (2.14)$$

Regra especial:

♦ Para N9 e qualidades menos finas, o afastamento superior (A_s) é zero.

♦ J, K, M, N até qualidade 8 e P, R, S, T, U, V, X, Y, Z, ZA, ZB, ZC até qualidade 7, o afastamento superior do furo é simétrico ao afastamento inferior do eixo de mesma letra do que o furo, em relação à linha zero, acrescido da diferença entre as tolerâncias das qualidades do furo e a imediatamente mais fina, com sinal contrário, como mostra a seguir:

$$A_{S(n)} = -a_{i(n-1)} + [IT_{(n)} - IT_{(n-1)}] \quad (2.15)$$

onde:

$A_{S(n)}$ = afastamento superior do furo para a qualidade de trabalho n ;

$a_{i(n-1)}$ = afastamento inferior do eixo para a qualidade de trabalho $n-1$;

$IT_{(n)}$ = Tolerância para a qualidade de trabalho n ;

$IT_{(n-1)}$ = Tolerância para a qualidade de trabalho $n-1$.

Esta regra especial se aplica a dimensões acima de 3mm e foi prevista para que nas qualidades mais finas, por exemplo, dois ajustes do tipo H7s6 $\leftrightarrow$ S7h6, ditos homólogos possuam exatamente as mesmas folgas e interferências, como mostra a figura abaixo:

Figura 2.18 – Interferências em ajustes homólogos.

Sistema eixo-base e sistema furo-base: Por ocasião do projeto de todas as tolerâncias de um produto por uma questão de economia e simplificação, usa-se adotar como base a posição de todos os furos do produto, sistema furo-base ou então o eixo como posição base, sistema eixo-base.

➤ SISTEMAS DE AJUSTES.

Para o sistema de ajustes são utilizados os conceitos de *eixo-base* e *furo-base*. *Eixo-base* é o eixo, cuja linha zero é o limite superior da faixa de tolerância, ou seja, a dimensão máxima do eixo é igual à dimensão nominal (Afastamento superior é zero). Já, no sistema *furo-base*, o afastamento inferior é igual a zero e a menor dimensão do furo é a dimensão nominal.

Em um acoplamento, sempre que a posição do campo de tolerância do furo ou eixo for representado pela letra H ou h, tem-se um acoplamento no sistema *furo-base* ou *eixo-base*, respectivamente.

Nos sistemas *furo-base* e *eixo-base*, independentemente se o ajuste é com folga, incerto ou interferente, sempre o *afastamento inferior* e *superior*, respectivamente, serão zero.

2.6 – TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS.

Como já foi dito, a variação dimensional das peças podem depender da precisão das máquinas-ferramentas utilizadas no processo de fabricação. Tais variações (desvios) devem ser limitados e enquadrados em tolerâncias. Desta forma, no projeto de uma peça deve-se prever, além das tolerâncias dimensionais, também as chamadas "*Tolerâncias Geométricas*".

2.6.1 – TOLERÂNCIAS DE FORMA E TOLERÂNCIAS DE POSIÇÃO.

A NBR 6409 e a DIN 7184 propõem tolerâncias de forma e posição.

As tolerâncias de forma e de posição só devem ser prescritas se elas forem indispensáveis para assegurar o perfeito desempenho das peças em seus aclopamentos determinados.

Uma tolerância de forma ou de posição de um determinado elemento geométrico euclidiano (por exemplo: ponto, linha, superfície ou plano mediano) define o campo em cujo interior deve-se conter esse elemento.

A Norma DIN 7184 apresenta resumidamente alguns conceitos referentes ao assunto como mostra a figura 2.19.

Símbolo e característica	Campo de tolerância	Codificação em desenho (ex.)	Descrição.
Retilidade - contorno			Qualquer linha de comprimento 200mm do elemento cilind. indicado, deve situar-se entre duas retas paralelas distanciadas de $t = 0.2\text{mm}$
Circularidade			O contorno de qualquer secção deverá estar dentro de uma coroa circular de espessura $t = 0.03\text{mm}$
Cilindricidade			A superfície indicada deve situar-se entre dois cilindros coaxiais com uma distância radial de $t = 0.04\text{mm}$

Figura 2.19 – Algumas tolerâncias de forma.

As tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento podem ser encontrados com mais detalhes nas normas NBR 6409 e a DIN 7184.

2.7 - CALIBRADORES DE TOLERÂNCIA E REFERÊNCIA

Os instrumentos utilizados para determinar as dimensões de peças podem ser de dois tipos: Instrumento para medir a dimensão efetiva das peças (paquímetros, micrômetros, máquinas de medir a três coordenadas, etc...) e instrumentos para verificar as dimensões limites (calibradores tampão, calibradores de boca, esquadros, etc...) (SARDINÃS, 1986).

Este último grupo, permite verificar as dimensões limites das peças, que como se sabe, vem representada por uma medida máxima e mínima, relacionada com o tamanho da peça e o grau de acuracidade usado na construção da mesma. Caso a dimensão da peça avaliada seja maior do que o mínimo e menor do que o máximo será considerada "boa", caso contrário deverá ser refugada. Estas avaliações são feitas através da operação Passa e Não-Passa.

Os calibradores de tolerância e referência Passa-Não Passa são projetados e fabricados para medir uma única ou várias dimensões de uma peça, mesmo que alguns deles sejam equipados com acessórios para ajuste de um dado limite.

O objetivo do calibrador Passa-Não Passa é efetuar o confronto entre as duas dimensões limites de uma dimensão tolerada (peça) e a sua dimensão real. Pode-se tomar duas decisões:

ACEITA → Caso a peça esteja maior do que o mínimo e menor do que o máximo.

REJEITA → Caso contrário.

De acordo com o uso dos calibradores nas diversas etapas num processo de inspeção, pode-se classificá-los da seguinte forma:

1 – Calibradores de trabalho:

- a) - Para fabricação;
- b) - Para a inspeção final;
- c) - Para aceitação.

Calibradores de trabalho: Os calibradores de fabricação são aqueles utilizados diretamente na produção para a verificação das peças produzidas. Os calibradores de inspeção final são utilizados pelo Departamento de Controle de Qualidade, aos quais se decide a aceitação ou não da peça já acabada. Os de aceitação são utilizados pelo comprador para aceitar ou rejeitar o produto que é oferecido (Figura 2.20).

Figura 2.20 – Calibradores de fabricação.

2 – Calibradores de referência ou calibradores padrões.

Calibradores de referência : são aqueles recomendados para verificação e ajuste dos instrumentos de medição.

2.7.1 - Tipos Fundamentais de calibradores de trabalho:

1 – *Calibradores fixos :* São aqueles fabricados para o controle de uma medida fixa. Os calibradores fixos para furos são os *calibradores tampão*, já os calibradores fixos para eixos são os *calibradores de boca, anéis- padrão*. A figura 2.21 mostra alguns calibradores fixos.

Figura 2.21 – Calibradores fixos, a) tampão, b) de boca.

2 – *Calibradores ajustáveis* : São aqueles que podem trabalhar dentro de um certo intervalo de verificação, e que podem ajustar-se ou regular-se dentro deste intervalo, que não se modificará durante a verificação.

3 – *Calibradores de Roscas Cilíndricas*: Em um processo de fabricação é antieconômico medir todos os parâmetros de uma rosca no controle de peças. Em vez disso, recorre-se ao emprego de calibradores de roscas que proporcionam uma verificação simultânea de todos os parâmetros da rosca.

O lado Passa tem uma rosca com perfil completo e deve ser enroscado facilmente. O Lado Não Passa é mais curto e possui de 2 a 3 filetes cujos flancos estão rebaixados na parte dos diâmetros externos e do núcleo. O mesmo não deve poder ser roscado.

O diâmetro liso, do lado Não Passa do calibrador, serve para verificar o diâmetro do núcleo da rosca interna.

As tolerâncias de fabricação de calibradores de rosca cilíndrico são dadas pelas normas ABNT NBR 8225, DIN 13, DIN 259, ISO 228/I, ANSI B1.1.

4 – *Calibradores de Roscas Cônicos*: Estes tipos de calibradores seguem as formas e dimensões padronizadas por normas como BS 21 e USAS B2.1. São utilizados para verificar roscas a serem abertas em tubos registros , bujões, válvulas e conexões, abrangendo as roscas destinadas a formar juntas estanques:

- Rosca externa cônica;
- Rosca interna cônica;
- Rosca interna cilíndrica.

Existem 2 sistemas de calibradores e considera-se que, em condições apropriadas, a calibração por qualquer dos dois sistemas recomendados, acompanhada por inspeção visual, será suficiente para garantir produtos satisfatórios, com os quais se farão juntas perfeitas.

O sistema “A” é indicado para uso onde métodos de controle de produção são empregados para garantir a elevada qualidade da rosca, enquanto o sistema “B” é indicado para uso onde um controle adequado da produção não foi estabelecido.

Sistema A - Compreende os seguintes tipos de calibradores:

- *Calibrador tampão cônico com rosca completa*: Este calibrador tem um entalhe no plano de calibração e o comprimento da rosca do entalhe no plano de calibração até a extremidade menor do tampão, é igual ao comprimento básico de calibração.

- *Calibrador anular com rosca cônica*: Este calibrador tem um comprimento de rosca igual ao comprimento básico de calibração, e os diâmetros na extremidade maior são iguais aos diâmetros básicos no plano de calibração.

Sistema B – Compreende os seguintes calibradores:

- *Calibrador tampão cônico com rosca completa*: Tem um comprimento total de rosca igual ao comprimento da rosca útil para comprimento máximo de calibração e possui um entalhe igual à tolerância total na posição do plano de calibração.

A face superior do entalhe é marcada positiva (+) e a face inferior, é marcada negativa (-), devendo o limite da rosca situar-se entre estas faces quando aplicado o calibrador.

- *Calibrador anular com rosca cônica completa*: Este calibrador tem um comprimento total de rosca igual ao comprimento da rosca útil para comprimento máximo de calibração menos a metade do comprimento para aperto com chave, e um entalhe igual à tolerância total do comprimento de calibração.

É interessante, do ponto de vista operacional, citar algumas das características que devam ser comuns a todos os calibradores, independente do tipo ou finalidade.

(a) – *Precisão de fabricação* : - As dimensões funcionais dos calibradores deverão estar dentro das tolerâncias de produção especificada.

(b) – *Alta rigidez e baixo peso* : Os calibradores devem ter alta rigidez para reduzir os erros devido às deformações do mesmo. Um baixo peso assegura verificação mais sensível e conseqüentemente facilita o manuseio do calibrador na avaliação de peças.

(c) – *Resistência ao desgaste* : - Os calibradores devem ter alta resistência ao desgaste, por este motivo, as superfícies de medição do calibrador, poderão ser nitretadas, depositadas cromo duro ou então cobertas com uma camada suplementar de carboneto de tungstênio. Existem também calibradores de cerâmica.

(d) – *Estabilidade dimensional* : - Esta característica é alcançada por tratamento térmico especial (envelhecimento artificial) como os aplicados em blocos padrões.

(e) – *Resistência a corrosão* :- Isto aumenta a vida útil em serviço dos calibradores e é alcançada pela utilização, onde for possível, de uma camada anti corrosiva ou de aço inoxidável sobre a superfície de medição.

2.7.2 - Princípio de Taylor

Esta teoria é a chave para o projeto de calibradores limites, e define a função, e conseqüentemente a forma, da maior parte destes calibradores. Sua principal condição é:

“O lado Passa verifica a condição de máximo material e deve verificar tantas dimensões quanto possíveis”.

O lado Não – Passa verifica a condição de mínimo material e deve verificar uma única dimensão apalpando a peça em dois pontos diametralmente opostos” (SARDINÃS, 1986).

Para o controle de um eixo, usa-se um furo calibrado (anel padrão) e para o controle de um furo, usa-se um eixo padrão de modo que no lado passa o calibrador e a peça deva ter total contato enquanto que no lado não passa o calibrador deve apenas apalpar a peça em dois pontos diametralmente opostos. Isto é feito no sentido de que se deve avaliar, juntamente com a dimensão desejada, eventuais erros de forma, (Por exemplo: retilidade, circularidade,...), sendo insuficiente a possibilidade de verificar somente uma dimensão (NBR 6406).

2.7.3 - CONDIÇÃO DE MÁXIMO E MÍNIMO MATERIAL

Uma peça está na condição de máximo material quando as dimensões estão nos limites que conteriam o valor máximo de material, ou seja, para um eixo ou dimensão externa, a dimensão fundamental é o maior valor permitido e todas as variações permitidas dentro da tolerância, serviriam para reduzir a dimensão. Já,

para um furo ou dimensão interna, a dimensão fundamental é o menor valor permitido e a variação dentro da tolerância serviria para aumentar a dimensão.

Uma peça está na condição de mínimo material quando as dimensões estão nos limites que contém o valor mínimo de material. Na condição de mínimo material o valor fundamental é o menor valor permitido para uma dimensão externa e maior valor permitido para uma dimensão interna. Na prática, em uma produção é vantajoso usar-se as condições de máximo material (KENNEDY, HOFFMAN e BOND, 1987).

2.7.4 - AFERIÇÃO DOS CALIBRADORES

Normalmente, os calibradores de boca e tampão são calibradores fixos. Quando tem-se calibradores ajustáveis, estes devem ser aferidos. A aferição é feita de dois modos:

- a) Por um calibrador padrão de referência ou contra calibrador;
- b) Por blocos padrões, como ilustra a Figura 2.22.

Figura 2.22 – Aferição de um calibrador de boca ajustável.

2.7.5 - UTILIZAÇÃO DOS CALIBRADORES

Os calibradores constituem-se em um dos pilares da intercambiabilidade. Com uma simples operação de Passa e Não-Passa, pode-se saber se uma dada dimensão está dentro do intervalo de variação dimensional. A seguir citaremos algumas vantagens em relação a utilização dos calibradores.

(a) – *Informação imediata e positiva* : Os calibradores nos fornecem resultados diretos SIM ou NÃO sem qualquer ambigüidade. Além do cuidado no manuseio do calibrador, o fator humano é quase que totalmente excluído do julgamento.

(b) – *Portáteis e independentes de qualquer fonte de alimentação* : Os calibradores têm a vantagem de poderem ser utilizados em qualquer parte de uma empresa, podem ser transportados sem nenhum equipamento auxiliar e não necessitam de fonte de alimentação.

(c) – *Economia* : O custo relativamente moderado dos calibradores, torna freqüentemente este tipo de inspeção a mais econômica numa grande faixa de produção seriada.

(e) – *Vida útil* : - Sua vida útil é muito mais prolongada que dos instrumentos de medição convencionais. (RODRIGUES).

2.7.6 - LIMITAÇÕES DOS CALIBRADORES

Anéis-Padrão ou Contracalibradores – Quando se utiliza um anel padrão na verificação de um eixo, pode haver limitações com respeito a sua utilização em relação a determinados erros de forma da peça, ou seja, pode-se aceitar, sem

problema algum, peças com erro de cilindridade fora dos limites pré-estabelecidos, como mostra a Figura 2.23 A.

Calibradores Tampão – Quando utiliza-se um calibrador tampão na verificação de um furo, as limitações são as mesmas descritas para os anéis-padrão, como mostra a figura 2.26 B (.KENNEDY, HOFFMAN e BOND, 1987).

Figura 2.23 – Limitações da utilização de Anel Padrão (A) e Calibrador Tampão (B).

2.7.7 - CONSTRUÇÃO E PROJETOS DE CALIBRADORES

Visto a importância dos calibradores, todos os países possuem normas para seu projeto. Estas normas incorporam independentemente do país e mesmo da empresa, praticamente as mesmas diretrizes a serem observadas na concepção e na fabricação dos calibradores.

O lado Não-Passa normalmente é representado pela dimensão máxima, para o controle do furo e a dimensão mínima para o controle do eixo. Na fabricação do calibrador essa dimensão deve estar dentro de limites estabelecidos pela norma. Por exemplo: NB 172 para o Brasil e JIS B 7421 para o Japão.

Já, o lado Passa nominalmente é representado por duas dimensões: O lado Passa novo (LP novo) e o lado Passa usado (LP usado). Isto é necessário, pois com o uso o calibrador sofre desgaste

Especificamente no caso da Norma Brasileira 172, os cálculos dos calibradores são feitos em função da tabela (A.5) em anexo.

A representação gráfica da posição do campo de tolerâncias dos calibradores com relação a tolerância da peça inspecionada é mostrada na figura 2.24.

Figura 2.24 – Representação gráfica do campo de tolerância para calibradores

CAPÍTULO 3

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS SOBRE A OBTENÇÃO E TRATAMENTOS DE DADOS.

Neste capítulo será abordados conceitos de geometria euclidiana que tratam de cálculos de planos que servirão como referência e projeções de pontos nestes planos. Além disto, será também apresentado conceitos sobre estratégia de amostragem e métodos dos mínimos quadrados.

3.1 - OBTENÇÃO DOS PONTOS A SEREM AVALIADOS

Neste tópico será mostrado como definir equações vetoriais e paramétricas de um plano, vetores normais e projeções de pontos neste plano.

3.1.1 – EQUAÇÃO VETORIAL E EQUAÇÃO PARAMÉTRICA DE UM PLANO

Seja $\pi \subset E^3$ um plano. Escolhendo um ponto $P_1 \in \pi$ e dois vetores $\vec{u}$ e $\vec{v}$ linearmente independentes e paralelos a π . Então é fácil observar que $X \in \pi$ se e somente se P_1X , $\vec{u}$, $\vec{v}$ são linearmente dependentes (os três são paralelos a π), isto ocorre se e somente se existirem $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ tais que $P_1X = \lambda\vec{u} + \mu\vec{v}$. Logo:

$$X = P_1 + \lambda \vec{u} + \mu \vec{v} \quad (\lambda, \mu \in \mathbb{R}) \quad (3.1)$$

Em outras palavras, dados $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ a equação (3.1) nos dá um ponto X de π dado o $X \in \pi$, existem $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ tais que (3.1) se verifica. O plano π é pois, o lugar geométrico dos pontos de E^3 que obedecem (3.1).

A equação (3.1) é chamada de *equação vetorial* de π .

Logo:

Seja P_1, P_2, P_3 como sendo pontos distintos e não colineares do plano de referência π , pode-se tomar $\vec{u} = \overrightarrow{P_1 P_2}$, $\vec{v} = \overrightarrow{P_1 P_3}$ (por exemplo) e então $X = A + \lambda \overrightarrow{P_1 P_2} + \mu \overrightarrow{P_1 P_3}$ é uma equação vetorial de π .

Onde:

A = uma constante;

P_n = coordenadas de um ponto no espaço.

Os vetores $\vec{u}$ e $\vec{v}$ são chamados vetores diretores do plano π .

Escrevendo $X = (x, y, z)$, $P_1 = (x_0, y_0, z_0)$, $\vec{u} = (a, b, c)$ e $\vec{v} = (m, n, p)$, resulta da equação (3.1) que:

$$(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) + \lambda(a, b, c) + \mu(m, n, p)$$

ou

$$(x, y, z) = (x_0 + \lambda a + \mu m, y_0 + \lambda b + \mu n, z_0 + \lambda c + \mu p)$$

Portanto,

$$\begin{cases} x = x_0 + \lambda a + \mu m \\ y = y_0 + \lambda b + \mu n \\ z = z_0 + \lambda c + \mu p \end{cases} \quad (\lambda, \mu \in \mathbb{R}) \quad (3.2)$$

Este sistema de equações dado por (3.2) é chamado de *equações paramétricas* de π .

Pode-se escrever os vetores $\vec{u}$ e $\vec{v}$ como:

$$\begin{aligned} \vec{u} &= (u[1], u[2], u[3]); \\ \vec{v} &= (v[1], v[2], v[3]) \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.1.2 – VETOR NORMAL A UM PLANO:

Considerando-se um plano $\pi \subset E^3$. Chama-se vetor normal a π qualquer vetor *não nulo* ortogonal a π , ou seja $\vec{n} \neq \vec{0}$ é um vetor normal a π se e somente se $\vec{n}$ é ortogonal a qualquer vetor paralelo a π (ou, a qualquer vetor diretor de π) (WEILL, 1988).

Este vetor normal ao plano π pode ser determinado através da definição da matriz:

$$\begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ u[1] & u[2] & u[3] \\ v[1] & v[2] & v[3] \end{vmatrix} = \hat{i}\mu[2]v[3] + \hat{j}\mu[3]v[1] + \hat{k}\mu[1]v[2] - \hat{k}\mu[2]v[1] - \hat{i}\mu[3]v[2] - \hat{j}\mu[1]v[3] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \hat{i}(u[2]v[3] - u[3]v[2]) + \hat{j}(u[3]v[1] - u[1]v[3]) + \hat{k}(u[1]v[2] - u[2]v[1])$$

$$\vec{N} = (N[1], N[2], N[3]) = \begin{cases} N[1] = u[2]v[3] - u[3]v[2] \\ N[2] = u[3]v[1] - u[1]v[3] \\ N[3] = u[1]v[2] - u[2]v[1] \end{cases} \quad (3.4)$$

Obtido, o plano de referência π e o vetor normal a este plano (através das equações 3.2 e 3.4, respectivamente), deve-se agora, entrar com os pontos do perfil da peça. Tais pontos são denotados por:

$Pd_1, Pd_2, \dots, Pd_n$ onde n = número de pontos.

3.1.3 – CÁLCULO DAS PROJEÇÕES DOS PONTOS NO PLANO DE REFERÊNCIA:

Os pontos do perfil projetados no plano de referência terão a seguinte notação: $Pdp_1, Pdp_2, \dots, Pdp_n$. Estes pontos são pontos que pertencem a interseção de uma reta perpendicular ao plano π (passando por Pd_i) e ao plano π ao mesmo tempo.

Figura 3.1 – Pontos do perfil.

A equação da reta que passa por Pd_1 e Pdp_1 é:

$$OPdp_1 = OPd_1 + \lambda \vec{N} \quad (3.5)$$

A equação do plano de referência π ao qual vai pertencer o ponto Pdp_1 é dado por:

$$\pi = Pd_1 + \lambda_N \quad (3.6)$$

O cálculo do primeiro ponto projetado Pdp_1 é dado por:

$$Pdp_i = P_1 + \lambda_1 \vec{u} + \lambda_2 \vec{v} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} Pdp_1[1] = P_1[1] + \lambda_1 u[1] + \lambda_2 v[1] \\ Pdp_1[2] = P_1[2] + \lambda_1 u[2] + \lambda_2 v[2] \\ Pdp_1[3] = P_1[3] + \lambda_1 u[3] + \lambda_2 v[3] \end{cases} \quad (3.8)$$

Relembrando que, Pdp_1 é um ponto que pertence ao plano de referência e a reta normal e este plano, que passa por Pd_1 . Logo, igualando as duas equações (3.6) e (3.7), plano e reta, tem-se:

$$Pd_1 + \lambda \vec{N} = P_1 + \lambda_1 \vec{u} + \lambda_2 \vec{v} \quad (3.9)$$

E então é obtido o seguinte:

$$\lambda \vec{N} - \lambda_1 \vec{u} - \lambda_2 \vec{v} = P_1 - Pd_1 \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \lambda N[1] - \lambda_1 u[1] - \lambda_2 v[1] = P_1[1] - Pd_1[1] \\ \lambda N[2] - \lambda_1 u[2] - \lambda_2 v[2] = P_1[2] - Pd_1[2] \\ \lambda N[3] - \lambda_1 u[3] - \lambda_2 v[3] = P_1[3] - Pd_1[3] \end{cases} \quad (3.11)$$

Colocando na forma matricial, tem-se:

$$\begin{pmatrix} N[1] & -u[1] & -v[1] \\ N[2] & -u[2] & -v[2] \\ N[3] & -u[3] & -v[3] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1[1] & -Pd_1[1] \\ P_1[2] & -Pd_1[2] \\ P_1[3] & -Pd_1[3] \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Finalmente, projeção do ponto Pd_1 é dada por:

$$Pdp_1 = Pd_1 + \lambda \vec{N} \quad \text{ou} \quad Pdp_1 = P_1 + \lambda_1 \vec{u} + \lambda_2 \vec{v} \quad (3.13)$$

E o cálculo do n-ésimo ponto projetado Pdp_n é dado por:

$$Pdp_n = Pd_n + \lambda \vec{N} \quad \text{ou} \quad Pdp_n = P_1 + \lambda_1 \vec{u} + \lambda_2 \vec{v} \quad (3.14)$$

Desta forma obtém-se as projeções dos pontos do perfil que serão avaliados.

3.2 - ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM:

Em um processo de fabricação, as peças fabricadas divergem da geometria ideal especificada em projeto. Se essas imperfeições excederem certos limites, a funcionalidade do produto é comprometida. Esta verificação das dimensões das peças podem ser feitas pelas MM3C. Em particular, as MM3C podem ser usadas para cálculo de circularidade utilizando o critério de Mínimos Quadrados. Tais máquinas tomam pontos na superfície da peça, ou seja, coordenadas com relação a

um sistema de coordenada fixo, usualmente Cartesiano. Com estas coordenadas, o perfil da peça é traçado.

Em um determinado perfil, para o cálculo de circularidade, o número de pontos e a localização de cada um deles influenciam significativamente nos resultados obtidos. Considerando uma dada combinação número/localização, foi medido ao longo de uma linha com perfil senoidal o desvio de forma f , calculado de acordo com o critério de mínima zona, como mostra a figura (3.2).

A avaliação mostra que, com o número de pontos n constante o valor calculado f é modificado, variando-se a posição.

Figura 3.2 – Efeito da estratégia de amostragem.

A medida que o número de pontos n aumenta, o valor calculado converge para o valor f_W "verdadeiro" e a dispersão da estratégia de amostragem converge para zero (WECKENMANN, EITZER, GARMER e WEBER, 1995).

3.3 - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS:

Em muitos casos, deseja-se ajustar uma curva, uma reta, um plano, uma superfície qualquer a um dado conjunto de pontos. Este processo de ajuste é

denominado parametrização. Através de ensaios experimentais ou a partir de dados simulados, obtém-se um grande número de pontos. A escolha da função matemática para realizar este ajuste paramétrico está baseada sempre em expectativas teóricas ou práticas, como no caso de Metrologia, na forma do objeto a ser medido.

Através da escolha da função linear de uma variável utilizada para ajustar um conjunto de n pontos dados (x_i, y_i) , dada por:

$$f(x) = a_1 + a_2x \quad (3.15)$$

pode-se dar início a discussão do Método dos Mínimos Quadrados.

Sabe-se que num problema real é quase impossível encontrar uma função linear que passe por todos estes n pontos. Neste caso, deve-se procurar uma função linear, ou seja, obter a_1 e a_2 , tal que torne as diferenças ε , ou “erros”

$$\varepsilon = |y_i - f(x_i)| \quad (3.16)$$

os menores possíveis. Como sempre é impossível encontrar uma função linear que torne mínimos esses erros, será necessário estabelecer uma relação de compromisso, um critério, que seja possível ser minimizado de forma objetiva.

Definindo o vetor de resíduos como:

$$r = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n]^T \text{ onde} \quad (3.17)$$

$$r_i = y_i - f(x_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

onde:

y_i é o valor do ponto encontrado durante o processo de medição;

$f(x_i)$ é um polinômio que representa o valor da função no ponto x_i .

Agora o problema de mínimo pode ser estabelecido escolhendo-se alguma norma para ser o vetor de resíduos. Então, a solução é encontrada através da busca de um mínimo para esta norma. Consequentemente, a solução depende da norma a ser escolhida. Por exemplo, escolhendo-se a norma-2, norma Euclidiana, procura-se o mínimo para

$$\|r\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n |y_i - f(x_i)|^2} \quad (3.18)$$

Outras normas também podem ser utilizadas, como, a norma-1, dada por:

$$\|r\|_1 = \sum_{i=1}^n |y_i - f(x_i)| \quad (3.19)$$

Na área de Metrologia, a norma-2, ou seja, Euclidiana é bastante usada, ou mais precisamente, o seu quadrado

$$E = \|r\|_2^2 = \sum_{i=1}^n |y_i - f(x_i)|^2 \quad (3.20)$$

Logo, o fato de usar o quadrado se deve ao problema de se minimizar o seu resíduo e é conhecido como problema de Mínimos Quadrados.

Embora tenha sido utilizada uma função linear de uma única variável como exemplo, todo o raciocínio se estende igualmente para funções não lineares (polinômios, círculos, etc.), funções lineares de duas variáveis (planos) ou funções não lineares de duas variáveis (superfícies de esferas, cilindros, etc.).

Tendo, como exemplo, um polinômio de grau $m - 1$ dado por

$$f(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_mx^{m-1} \quad (3.21)$$

e um conjunto de pontos (x_i, y_i) sendo $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Usualmente o número de pontos n é bem maior do polinômio $m - 1$. Neste caso, o conjunto de polinômios de grau menor que m , dados por $\phi_j = x^{j-1}$, pode ser escrito como

$$f(x) = \sum_{j=1}^m a_j \phi_j(x) \quad (3.22)$$

onde $\phi_1(x) = x^0$, ou seja, $\phi_1(x) = 1$.

Para todos os n pontos dados, pode-se escrever de forma geral, tanto para o problema polinomial utilizado como exemplo, como para outros tipos de funções, a seguinte equação:

$$\sum_{j=1}^m a_j \phi_j(x_i) = b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.23)$$

ou, na forma matricial

$$\begin{bmatrix} \phi_1(x_1) & \phi_2(x_1) & \cdots & \phi_m(x_1) \\ \phi_1(x_2) & \phi_2(x_2) & \cdots & \phi_m(x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1(x_n) & \phi_2(x_n) & \cdots & \phi_m(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{A} \mathbf{a} = \mathbf{b} \quad (3.24)$$

3.3.1 - ALGORITMOS DE AJUSTE DE ELEMENTOS:

Por razões didáticas, os algoritmos serão desenvolvidos separadamente por tipos de elementos geométricos. Para cada elemento é necessário um número mínimo de pontos dados (x_i, y_i, z_i) , para o ajuste.

A Tabela 1 lista o número mínimo de pontos necessários para cada elemento.

Elemento geométrico	Número de pontos
Reta	2
Plano	3
Círculo	3

Tabela 1 - Número mínimo de pontos para o ajuste.

A seguir estão mostrados resumidamente os algoritmos para cada elemento geométrico.

– **RETAS NUM PLANO ESPECIFICADO:**

Dado um plano x - y e n pontos (x_i, y_i) , deseja-se obter os coeficientes da reta

$$f(x) = a_1 + a_2 x \quad (3.25)$$

Deste modo tem-se $\phi_1(x) = 1$ e $\phi_2(x) = x$ e, portanto:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Pelo critério de ajuste pelos Mínimos Quadrados, tem-se:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Resolvendo este sistema, obtém-se:

$$a_1 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i} \quad a_2 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i} \quad (3.28)$$

Este problema também pode ser resolvido com o conceito de resíduo, de uma forma mais adequada aos conceitos de melhor ajuste de referência, utilizados em Engenharia, em particular na área de Metrologia.

Assim, o resíduo será tomado como sendo a menor distância entre o ponto (x_i, y_i) e a reta. Para este procedimento uma reta no plano $x - y$ é especificada por um plano (x_0, y_0) sobre ela e os seus cossenos diretores (a, b) , obtendo-se assim a forma parametrizada. Desta forma, qualquer ponto (x, y) sobre a reta satisfaz as equações paramétricas:

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{b}{a} \Leftrightarrow \frac{y - y_0}{b} = \frac{x - x_0}{a} = t \quad (3.29)$$

ou

$$\begin{cases} x = x_0 + at \\ y = y_0 + bt \end{cases} \quad (3.30)$$

Logo, a distância r_i de um ponto (x_i, y_i) a esta reta é dada por

$$r_i = b(x_i - x_0) - a(y_i - y_0) \quad (3.31)$$

enquanto que a distância entre um ponto (x_i, y_i) e o ponto (x_0, y_0) é

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (3.32)$$

O problema de Mínimos Quadrados pode ser determinado estabelecendo a função

$$E(a,b) = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (3.33)$$

e fazendo sua otimização através de

$$\frac{\partial E(a,b)}{\partial a} = 0 \quad (3.34)$$

e

$$\frac{\partial E(a,b)}{\partial b} = 0 \quad (3.35)$$

3.3.3 - RETAS EM TRÊS DIMENSÕES:

Uma reta num plano é representada por um ponto (x_0, y_0, z_0) sobre ela e pelos seus vetores diretores (a, b, c) . Desta forma, qualquer ponto (x, y, z) sobre a linha, satisfaz:

$$\frac{x - x_0}{a} = \frac{y - y_0}{b} = \frac{z - z_0}{c} = t \quad (3.36)$$

ou

$$\begin{cases} x = x_0 + at \\ y = y_0 + bt \\ z = z_0 + ct \end{cases} \quad (3.37)$$

e a distância de um ponto (x_i, y_i, z_i) e esta reta é dada por

$$r_i = \sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2} \quad (3.38)$$

onde

$$u_i = c(y_i - y_0) - b(z_i - z_0) \quad (3.39)$$

$$v_i = a(z_i - z_0) - c(x_i - x_0) \quad (3.40)$$

$$w_i = b(x_i - x_0) - a(y_i - y_0) \quad (3.41)$$

enquanto que a distância entre os pontos (x_i, y_i, z_i) e (x_0, y_0, z_0) é dado por

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (3.42)$$

A resolução do problema através do método dos Mínimos Quadrados pode ser determinada estabelecendo a função

$$E(a, b, c) = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (3.43)$$

e fazendo sua otimização através de

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial a} = 0 \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial b} = 0 \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial c} = 0 \quad (3.46)$$

3.3.4 - PLANOS:

Um plano pode ser representado por um ponto (x_0, y_0, z_0) e os vetores diretores (a, b, c) da normal ao plano. Desta forma, qualquer ponto (x, y, z) sobre o plano, satisfaz:

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0 \quad (3.47)$$

A distância de um ponto (x_i, y_i, z_i) ao plano é dada por:

$$r_i = a(x_i - x_0) + b(y_i - y_0) + c(z_i - z_0) \quad (3.48)$$

O problema de Mínimos Quadrados pode ser determinado estabelecendo a função

$$E(a, b, c) = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (3.49)$$

e fazendo a otimização através de

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial a} = 0 \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial b} = 0 \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial c} = 0 \quad (3.52)$$

3.3.5 – CÍRCULOS EM UM PLANO ESPECÍFICO:

Um círculo no plano x - y é representado pelo seu centro (x_0, y_0) e pelo seu raio r . Desta forma, qualquer ponto (x, y) sobre o círculo satisfaz:

$$\begin{aligned}(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 &= r^2 \\ x^2 - 2x_0x + x_0^2 + y^2 - 2y_0y + y_0^2 &= r^2 \\ x^2 + y^2 - 2(x_0x + y_0y) + x_0^2 + y_0^2 &= r^2\end{aligned}\tag{3.53}$$

onde

$$\begin{aligned}a = -2x_0 &\Leftrightarrow x_0 = -\frac{a}{2} \\ b = -2y_0 &\Leftrightarrow y_0 = -\frac{b}{2} \\ c = x_0^2 + y_0^2 - r^2 &\Leftrightarrow r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - c}\end{aligned}\tag{3.54}$$

ou

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0\tag{3.55}$$

O problema de Mínimo Quadrado pode ser estabelecido a partir da função E dada por

$$E(a, b, c) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2\tag{3.56}$$

As equações são então estabelecidas através de

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial a} = 2 \sum (x^2 + y^2 + ax + by + c)x = 0\tag{3.57}$$

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial b} = 2 \sum (x^2 + y^2 + ax + by + c)y = 0\tag{3.58}$$

$$\frac{\partial E(a,b,c)}{\partial c} = 2 \sum (x^2 + y^2 + ax + by + c) = 0 \quad (3.59)$$

Colocando as três equações na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \sum(x^2) & \sum(xy) & \sum(x) \\ \sum(xy) & \sum(y^2) & \sum(y) \\ \sum(x) & \sum(y) & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum(x^3 + xy^2) \\ -\sum(x^2y + y^3) \\ -\sum(x^2 + y^2) \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Logo os valores a , b , c são obtidos de:

$$x_0 = x_{\text{centro}} = -\frac{a}{2} \quad (3.61)$$

$$y_0 = y_{\text{centro}} = -\frac{b}{2} \quad (3.62)$$

e

$$r = \text{Raio} = \left(\left(\frac{a}{2} \right)^2 + \left(\frac{b}{2} \right)^2 - c \right)^{1/2} \quad (3.63)$$

3.4 - CIRCULARIDADE

A diferença entre a forma real e a forma ideal de uma peça é denominada erro de forma.

A forma circular é um dos elementos euclidianos mais comumente encontrados. O grande número de mecanismos de revolução encontrado em quase todas as máquinas, torna o erro de circularidade o mais importante dos erros de forma.

A análise da circularidade é feita através da intersecção de um plano com a superfície analisada, plano este perpendicular ao eixo gerador da superfície (WHITEHOUSE, 1994).

Para analisar a circularidade de um perfil circular as normas utilizam um único parâmetro. Este parâmetro chamado também de circularidade, representado aqui pela letra “*t*”, é dado pela menor diferença entre os raios de dois círculos concêntricos, colocados ao redor do perfil circular, um circunscrevendo e o outro inscrevendo o mesmo.

Quatro critérios são internacionalmente aceitos para medida de circularidade. Eles são, em ordem de preferência dada pela BS 3730 (1997).

- Círculo de Mínimos Quadrados (LSC);
- Círculo de Mínima Zona (MZC);
- Círculo de Mínimo Raio Circunscrito (MCC);
- Círculo de Máximo Raio Inscrito (MIC).

Os critérios de mínimo raio circunscrito e de máximo raio inscrito são comumente usados para avaliação de circularidade de eixos e furos, respectivamente. A referência da mínima zona é aquela que melhor representa a restrição imposta pela zona de tolerância, além de fornecer o menor erro (WEILL, 1988). A referência dos mínimos quadrados tem a seu favor o fato de atenuar o efeito de picos de medição, causados por riscos ou sujeiras na superfície.

Programas de avaliações de MM3C's geralmente utilizam o método de mínimos quadrados para ajustar o perfil de uma determinada peça. Este tipo de avaliação não é recomendado por A. Weckenmann para calibração de peças. Isto pode ser claramente observado utilizando o diâmetro de um eixo com um anel padrão como pode ser visto na figura 3.4. A peça A é uma peça rejeitada, pois o diâmetro do anel padrão (d_{limit}) é menor que o mínimo círculo circunscrito, ou seja, o anel padrão não pode ser encaminhado ao longo do eixo. Desta forma, se estivesse utilizando o critério de mínimos quadrados, estaria aceitando uma peça rejeitada.

Figura 3.4 – Resultado de calibração comparado com técnicas de medição por coordenadas.

CAPÍTULO 4

PROPOSTA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA INFORMATIZADO PARA INSPEÇÕES GEOMÉTRICAS DE PEÇAS.

Neste trabalho pretende-se implementar um sistema informatizado que permita agilizar a inspeção de peças circulares de forma a aceita-las ou rejeita-las. Para tanto, o sistema deve possuir uma base de dados com informações sobre o perfil da peça a ser avaliada. Com auxílio destas informações, no processo de inspeção, o sistema pode orientar o operador sobre os procedimentos a serem tomados. O Sistema também permite a impressão automática dos resultados obtidos.

Num processo de inspeção geométrica o operador é um elemento chave, pois é ele que executará as atividades necessárias para à inspeção. A ação do operador pode introduzir variabilidades indesejáveis ao processo de inspeção, visto que, em um determinado perfil, o número de pontos, a localização de cada ponto obtido e a velocidade de aquisição dos dados influenciam significativamente nos resultados.

Por estes e outros motivos é importante a sistematização do procedimento de inspeção de forma a padronizar os atos e decisões tomadas, tornando-as menos dependentes do operador. Esta sistematização do processo de inspeção, através de um sistema informatizado, pode diminuir a

variabilidade aumentando a confiança no resultado obtido e consequentemente agilidade e versatilidade na execução da inspeção.

O sistema proposto, denominado **MEDICÃO DO TIPO PASSA-NÃO PASSA EM MM3C** pode ser dividido em duas grandes partes: uma parte lógica e uma parte física. A parte lógica é constituída por um programa computacional desenvolvido em linguagem de programação Pascal 6.0 onde contem informações sobre a inspeção de peças, utilizando o processo de medição do Tipo Passa-Não Passa. A parte física é constituída por: uma Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo Ponte Móvel, um microcomputador e uma placa de aquisição de dados que são responsáveis pela obtenção das coordenadas dos pontos do perfil da peça.

O procedimento utilizado na inspeção deve ser o mais ágil possível pois uma das características fundamentais dos calibradores do Tipo Passa-Não Passa é a sua rapidez e sua capacidade de fornecer decisões diretas, ou seja, SIM ou NÃO sem nenhuma ambigüidade.

O objetivo deste trabalho consiste em simular uma medição do Tipo Passa-Não Passa em uma Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo Ponte Móvel. Esta simulação é voltada principalmente para medição de peças circulares com objetivo de aceita-las ou rejeita-las dentro dos padrões estabelecidos pela Norma – NBR 6406.

Para que esta proposta seja realizada com sucesso, o trabalho foi dividido em três etapas:

- Pesquisa bibliográfica;
- Construção do programa de simulação em linguagem Turbo Pascal;
- Avaliação dos perfis das peças na Máquina de Medir a Três Coordenadas;

4.1 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Fez-se um estudo detalhado dos tópicos que envolvam o objetivo do trabalho, dentre eles pode-se destacar:

- As Máquinas de Medir a Três Coordenadas;
- Ajuste e Tolerância;
- Geometria Analítica e Vetorial;
- Erros de Forma e Posição.

4.2 - PROGRAMA COMPUTACIONAL

Fez-se um programa utilizando o software Turbo Pascal 6.0 para simular medições do Tipo Passa-Não Passa utilizando coordenadas cartesianas fornecidas pela MM3C, seguindo os requisitos da Norma NB-172 (*ABNT*).

4.3 - AVALIAÇÃO DAS PEÇAS

Com o auxílio de um Torno Universal NARDINI-350 e uma Retificadora TSCHUDIN foram usinadas dez peças circulares, sendo cinco eixos e cinco furos. Tais peças com dimensões nominais de 30, 50, 80, 120 e 180 milímetros com qualidade IT7 e afastamento de referência H.

Estas peças foram posicionadas no volume de trabalho da MM3C da Marca Brown & Sharpe do tipo Ponte Móvel e com o auxílio de um micro computador e uma placa de aquisição de dados, as coordenadas dos ptos medidos sobre os perfis destas peças foram avaliadas pelo programa, ou seja, resultados sobre a qualidade geométrica da peça foram fornecidos em forma de aceitação ou rejeição.

CAPÍTULO 5

SISTEMA INFORMATIZADO DE AUXÍLIO À INSPEÇÃO GEOMÉTRICA DE PEÇAS CIRCULARES - GP-SII

O sistema implementado é composto de uma parte física e uma parte lógica (NUNES, ABACKERLI, DI GIACOMO, 1993). A parte física está centrada em um equipamento de medição e um microcomputador, a parte lógica corresponde a um programa computacional, no qual está descrito o procedimento de inspeção do tipo Passa-Não Passa.

5.1 – DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO – A PARTE FÍSICA

5.1.1 – MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS DO TIPO PONTE MÓVEL

A Máquina de Medir do Tipo Ponte Móvel que foi utilizada no processo de inspeção, encontra-se no Laboratório de Metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP. A Máquina foi fabricada pela Brown & Sharpe Mfg., modelo tipo Ponte Móvel, possui movimentos nas direções “X”, “Y” e “Z” acionados manualmente, um micro computador e também um desempenho de granito sintético removível e mancais aerostáticos nos três eixos. O seu volume

de trabalho total compreende 450 x 600 x 380mm, x, y e z respectivamente, tendo como vantagem um tamanho e peso ideal para uso em bancada.

A MM3C é constituída de três eixos coordenados, sendo o eixo “Y” a ponte móvel que sustenta o eixo “X”, no qual situa-se a coluna “Z” que se move verticalmente, como é mostrado na figura 5.1. O sistema de leitura das coordenadas é feito através de escalas óticas que segue o princípio das franjas de Moiré e consiste de um sistema óptico-eletrônico, composto de emissor, escala e receptor.

Um conjunto de filtro e secador é utilizado para fornecer o ar comprimido a uma pressão constante, seco e limpo.

Figura 5.1 – Máquina de Medir a Três Coordenadas do Tipo Ponte Móvel.

Abaixo será mostrada uma ficha com os dados técnicos da MM3C:

DADOS TÉCNICOS DA MM3C TIPO PONTE MÓVEL	
Máquina:	Máquina de Medir a Três Coordenadas (MM3C)
Tipo:	Ponte Móvel (Moving Bridge)
Número de Série:	098066
Ano de Fabricação :	1988
País de Origem :	U.S.A
Proprietário:	Laboratório de Metrologia – Depto. Mecânica – São Carlos – USP
DIMENSÕES	
Faixa de operação	X = 356mm
	Y = 406mm
	Z = 305mm
Capacidade de Trabalho	X = 457mm
	Y = 610mm
	Z = 381mm
Dimensões Totais	Comprimento (X) = 743mm
	Largura (Y) = 730 mm
	Altura (Z) = 1.340 mm
Pesos	
Somente máquina	149 Kg
Sistema completo	168 Kg
Embalada	220Kg
Max. Peso da Peça a ser Medida	68 Kg
NÍVEIS OPERACIONAIS EXIGIDOS	
Temperatura de Calibração	20°C ± 1°C
Faixa de Temperatura de Operação	10 a 40 °C
Pressão Mínima de Ar	4,8 bar
Consumo de Ar	357 m ³ /h
Tensão de Alimentação	110 / 220 AC, 50 / 60 Hz
Potência Consumida	60 Watts
Monitor	25 Watts

Figura 5.2 – Ficha Técnica da MM3C utilizada.

O apalpador ou sonda utilizada na MM3C é do tipo Touch-Trigger que em contato com a peça libera um sinal elétrico, "congelando" as coordenadas lida pela escala no momento do toque. Esta sonda possui a capacidade de adaptação de várias astes no momento da medição, permitindo ao usuário uma maior versatilidade e rapidez na avaliação das peças.

As sondas tipo trigger podem ser divididas em três partes: corpo, aste e sensor observados na figura 5.3.

Figura 5.3 – Sonda de contato do tipo “Touch Trigger”.

5.1.2 - MICROCOMPUTADOR

O microcomputador utilizado neste trabalho para simular a inspeção de calibradores do tipo Passa-Não Passa foi um (AT) padrão IBM com microprocessador de 486 Mz, e a configuração mínima exigida para a simulação é de disco rígido de 40Mbytes e memória RAM de 1 Mbytes.

A figura 5.4 abaixo mostra uma fotografia ilustrativa dos componentes utilizados no presente trabalho.

Figura 5.4 – Fotografia ilustrativa dos componentes utilizados.

5.2 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL – A PARTE LÓGICA DO GP-SII

A parte lógica do Sistema Informatizado de Auxílio à Inspeção Geométrica de Peças (GP-SII) corresponde a um programa computacional, o qual contém os procedimentos para inspeção do tipo Passa-Não Passa, permitindo a orientação ao operador com relação aos passos básicos necessários a serem executados.

O programa principal foi desenvolvido em linguagem Turbo Pascal 6.0 da Borland Internacional. Este programa pode ser descrito em várias fases. O diagrama de blocos da Figura 5.5, mostra como as instruções foram organizadas, seguindo uma descrição de cada rotina.

Figura 5.5 – Diagrama de Bloco para as rotinas do programa.

A1 - PLANO DE REFERÊNCIA

Para dar início a uma determinada medição em uma MM3C é necessário definir um plano de referência, que geralmente se encontra na superfície da peça. No presente trabalho, este plano é definido por três pontos distintos e não colineares, dados por P_1 , P_2 e P_3 .

Através destes três pontos, pode-se calcular dois vetores direção, u e v deste plano de referência dado pela equação 5.01.

$$\vec{u} = \overrightarrow{P_1P_2}, \vec{v} = \overrightarrow{P_1P_3} \quad (5.01)$$

Desta forma, defini-se os vetores direção do plano de referência escolhido e consequentemente a equação paramétrica deste plano, como mostrado na equação 5.03 descrita abaixo.

$$\begin{cases} x = x_0 + \lambda u[1] + \mu v[1] \\ y = y_0 + \lambda u[2] + \mu v[2] \\ z = z_0 + \lambda u[3] + \mu v[3] \end{cases} \quad (5.03)$$

onde $P_1 = (x_0, y_0, z_0)$ é um ponto que pertence ao plano de referência.

A2 – A3 – CÁLCULO DAS PROJEÇÕES DOS PONTOS NO PLANO DE REFERÊNCIA:

Chama-se vetor normal a um plano de referência a qualquer vetor *não nulo* ortogonal a este plano ou a qualquer vetor diretor contido neste plano (WEILL, 1988). Desta forma pode-se definir um vetor normal ao plano de referência dado pela equação 5.03.

$$\begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ u[1] & u[2] & u[3] \\ v[1] & v[2] & v[3] \end{vmatrix} =$$

$$\begin{aligned} & \hat{i}u[2]v[3] + \hat{j}u[3]v[1] + \hat{k}u[1]v[2] - \hat{k}u[2]v[1] - \hat{i}u[3]v[2] - \hat{j}u[1]v[3] \Leftrightarrow \\ & \hat{i}(u[2]v[3] - u[3]v[2]) + \hat{j}(u[3]v[1] - u[1]v[3]) + \hat{k}(u[1]v[2] - u[2]v[1]) \end{aligned}$$

$$\vec{N} = (N[1], N[2], N[3]) = \begin{cases} N[1] = u[2]v[3] - u[3]v[2] \\ N[2] = u[3]v[1] - u[1]v[3] \\ N[3] = u[1]v[2] - u[2]v[1] \end{cases} \quad (5.03)$$

Obtido, então, o plano de referência e o vetor normal a este plano, deve-se agora, entrar com os pontos do perfil da peça.

As coordenadas dos pontos do perfil da peça fornecidos pela MM3C serão denotadas por: $P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dn}$. Estes pontos devem ser projetados no plano de referência para posterior cálculo do diâmetro. Sejam $P_{dp1}, P_{dp2}, \dots, P_{dpn}$ como sendo estas projeções, logicamente estes pontos são pontos que pertencem a interseção de uma reta perpendicular ao plano de referência (passando por P_{dn}) e ao plano ao mesmo tempo, como mostra a Figura 5.6.

Figura 5.6 – Pontos do Perfil.

Como já visto no Capítulo 3, a equação que fornece a projeção dos pontos é dado pela equação 5.04 abaixo.

$$Pdp_n = Pd_n + \lambda \vec{N} \quad \text{ou} \quad Pdp_n = P_1 + \lambda_1 \vec{u} + \lambda_2 \vec{v} \quad (5.04)$$

onde $\lambda_n = \text{constante}$.

Estes pontos projetados serão arquivados na memória do microcomputador e serão utilizados para o cálculo dos diâmetros.

A4 – A5 - CÁLCULO DOS DIÂMETROS UTILIZANDO O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS:

Neste trabalho inicialmente defini-se a forma a ser avaliada: um diâmetro externo ou interno. Esta informação é obrigatória para que nos cálculos dos diâmetros a dimensão do raio da esfera da sonda seja compensada.

No caso da Metrologia, a forma do objeto a ser medido é de total interesse, dando uma atenção maior à forma circular. Sabe-se que num problema real é quase impossível encontrar uma função linear que passe por todos estes n pontos projetados. Deve-se então procurar uma função linear que minimize os erros (ε) dado por:

$$\varepsilon = |y_i - f(x_i)| \quad (5.05)$$

Na área de Metrologia a norma Euclidiana é bastante usada, ou mais precisamente, o seu quadrado

$$\varepsilon = \|r\|_2^2 = \sum_{i=1}^n |y_i - f(x_i)|^2 \quad (5.06)$$

Um círculo no plano xy é representado pelo seu centro (x_0, y_0) e pelo seu raio r . Desta forma, qualquer ponto (x, y) sobre o círculo satisfaz a equação abaixo:

$$\begin{aligned} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 &= r^2 \\ x^2 - 2x_0x + x_0^2 + y^2 - 2y_0y + y_0^2 &= r^2 \\ x^2 + y^2 - 2(x_0x + y_0y) + x_0^2 + y_0^2 &= r^2 \end{aligned} \quad (5.07)$$

onde

$$\begin{aligned} a &= -2x_0 \Leftrightarrow x_0 = -\frac{a}{2} \\ b &= -2y_0 \Leftrightarrow y_0 = -\frac{b}{2} \\ c &= x_0^2 + y_0^2 - r^2 \Leftrightarrow r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - c} \end{aligned}$$

ou

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (5.08)$$

O problema de Mínimo Quadrado pode ser estabelecido a partir da função E dada pela equação 5.09.

$$E(a, b, c) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + bx_i + c)^2 \quad (5.09)$$

Utilizando-se as equações 3.57, 3.58 e 3.59 obtém-se :

$$\begin{bmatrix} \sum(x^2) & \sum(xy) & \sum(x) \\ \sum(xy) & \sum(y^2) & \sum(y) \\ \sum(x) & \sum(y) & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum(x^3 + xy^2) \\ -\sum(x^2y + y^3) \\ -\sum(x^2 + y^2) \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Com o raio e as coordenadas do centro (x_0, y_0) traça-se o maior raio inscrito ($D_{\text{máx}}$) e o menor raio circunscrito ($D_{\text{mín}}$).

A6 – QUALIDADE E DIÂMETRO NOMINAL:

Para que o programa simule um calibrador do tipo Passa-Não Passa, é necessário fornecer a Qualidade e o Diâmetro Nominal da peça a ser avaliada.

Num processo de usinagem além destes dois itens é também de grande importância e fundamental citar-se o afastamento de referência que é designada por uma ou duas letras, como visto no Capítulo 2. Neste trabalho, as peças destinadas à avaliação do programa computacional foram todas usinadas com afastamento de referência H ou h, para furo e eixo, respectivamente.

Além dos afastamentos de referência, a qualidade de trabalho das peças também foram fixadas em IT7.

Dimensão Nominal é definido como sendo a dimensão básica obtida a partir do projeto (dimensionamento) e que fixa a origem dos afastamentos nominais. As peças utilizadas neste trabalho foram divididas em dois grupos: cinco furos e cinco eixos. Tanto nos furos como nos eixos as dimensões nominais foram de 30, 50, 80, 120, 180 milímetros.

A7 – CALIBRADORES INTERNOS/EXTERNOS:

Com as características das peças, vistas no item A6, os calibradores serão agora simulados. No caso de um furo, deve-se simular um calibrador do tipo tampão (medida interna) e, para um eixo, um calibrador do tipo boca (medida externa), seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR 6406 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A8 – PEÇA ACEITA:

A representação gráfica da posição dos campos de tolerâncias dos calibradores com relação a tolerância da peça avaliada é mostrada na Figura 5.7 e Figura 5.8 abaixo.

Como visto no Capítulo 2, no caso de calibradores para medidas internas, tem-se:

$$\text{Lado Não Passa} = L \pm \frac{H}{2}$$

$$\text{Lado Passa novo} = l + z \pm \frac{H}{2}$$

$$\text{Lado Passa usado} = l - y$$

onde

L = Máxima dimensão do furo;

l = Mínima dimensão do furo;

H = Tolerância de fabricação do calibrador;

z = Acréscimo permitido para calibradores novos de furo;

y = Desgaste permitido para calibradores de furo.

A peça estará aceita se a seguinte condição for satisfeita:

$$\text{Lado Passa usado} < D_{\min} < \text{Lado Não Passa máximo} \quad (5.11)$$

Já, no caso de calibradores para medidas externas, tem-se:

$$\text{Lado Não Passa} = l \pm \frac{H_1}{2}$$

$$\text{Lado Passa novo} = L - z_1 \pm \frac{H_1}{2}$$

$$\text{Lado Passa usado} = L + y_1$$

onde

L = Máxima dimensão do eixo;

l = Mínima dimensão do eixo;

H_1 = Tolerância de fabricação do calibrador;

z_1 = Decréscimo permitido para calibradores novos de eixo;

y_1 = Desgaste permitido para calibradores de eixo.

A peça estará aceita se a seguinte condição for satisfeita:

$$\text{Lado Não Passa mínimo} < D_{\text{máx}} < \text{Lado Passa usado} \quad (5.12)$$

A9 – A10 – A11 – PEÇA REJEITADA:

Num processo de usinagem nem sempre consegue-se a dimensão desejada pois, existem elementos que apresentam constante alteração no decorrer da operação de fabricação. Neste caso, existem furos e eixos que podem estar maiores ou menores que as dimensões estabelecidas.

Se um furo estiver maior que o máximo permitido, então esta peça estará rejeitada e conseqüentemente refugada, pois é impossível recolocar material. Já, no caso da dimensão estiver menor que o mínimo permitido, esta também estará rejeitada, mais com uma vantagem, poderá ser retrabalhada.

Um furo (dimensão interna) estará rejeitado, mas com condição de retrabalho se a seguinte condição for satisfeita:

$$D_{\text{mín}} < \text{Lado Passa usado} \quad (5.13)$$

E estará rejeitado e refugado se:

$$D_{min} > \text{Lado Não Passa Máximo} \quad (5.14)$$

Já, no caso de um eixo (dimensão externa) o conceito é o inverso, ou seja, a peça estará refugada se a dimensão estiver menor do que o mínimo permitido. E, poderá ser retrabalhada se estiver maior do que o máximo permitido.

Ou melhor, o eixo estará rejeitado, mas com condições de retrabalho se:

$$D_{max} > \text{Lado Passa usado} \quad (5.15)$$

E, estará rejeitado e refugado se:

$$D_{max} < \text{Lado Não Passa Mínimo} \quad (5.16)$$

5.3 - A ATUAÇÃO DO SISTEMA DURANTE A INSPEÇÃO

A seguir será detalhada a atuação do GP-SII durante o procedimento para a inspeção de peças circulares.

a) Repouso: Após a limpeza das peças a serem inspecionadas, as mesmas e o instrumento permaneceram em repouso no desempenho da MM3C pelo menos por um período de 8 horas, para que entrem em equilíbrio térmico entre si e com o ambiente. O ambiente deve ter temperatura controlada. Passado este período mínimo de repouso, pode-se proceder a inspeção.

b) O GP-SII então orienta o operador como efetuar a medição. Passado o tempo de repouso da peça sobre o desempenho, toma-se os três pontos não colineares do plano de referência, como mostra a figura 5.9 - A.

Confirmada a leitura, o sistema orienta o operador a obter as coordenadas dos pontos do perfil da peça, avisando o número de pontos tomados. A figura 5.9 – B ilustra a tomada de pontos.

Dá-se a seqüência a este processo até que sejam tomadas as medidas nos pontos adequados, seguindo a mesma estratégia de medição.

A

B

Figura 5.9 – Visualização dos processos de medições.

c) O GP-SII registra os dados sobre o diâmetro da sonda utilizada no sistema apalpador e o formato da peça, ou seja, furo ou eixo.

Com estes dados o sistema fornece as coordenadas do centro da peça, o número de pontos obtidos no perfil da peça, o diâmetro e o erro de cilindridade.

Em seguida, o programa solicita os dados sobre a Qualidade de Trabalho e o Diâmetro Nominal da peça a ser avaliada.

Em seguida, o sistema fornece a posição da peça com relação a sua aceitação, ela pode ser:

Accepta:- A mensagem aparece piscando em cor verde;

Rejeita/retrabalho:- A mensagem aparece piscando em cor amarela e o sistema avisa o operador com um sinal sonoro;

Rejeita/refugo:- A mensagem aparece piscando em cor vermelha e o operador também é avisado com um sinal sonoro, mas com uma frequência diferente. A seguir tem-se um exemplo de como os resultados são impressos, exibido nas páginas 85 e 86.

5.4 – AVALIAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

O método utilizado para o cálculo do diâmetro no software da MM3C é o Método dos Mínimos Quadrados, ou seja, o mesmo do Programa Computacional Proposto.

Então pode-se fazer uma comparação, entre os resultados obtidos através do Programa Proposto e do Software da MM3C foi realizada, podendo assim, conhecer a sua validade. Esta comparação foi feita através da medição do diâmetro de peças utilizando os mesmos dados, ou seja, as mesmas coordenadas do perfil da peça.

Também foi avaliada a influencia dos diferentes pontos tomados no plano de referência, como será visto no item 6.1.3.

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

Emissão: 17/03/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
Certificado de inspeção

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 15

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: 86.756

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: 49.745

DIÂMETRO DA PEÇA: 30.002

DIÂMETRO MÁXIMO: 30.005

DIÂMETRO MÍNIMO: 30.001

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.004

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 30.000

A PEÇA ESTÁ ACEITA

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

Emissão: 17/03/99

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Laboratório de Máquinas Ferramentas

Certificado de inspeção

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 19

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: 73.009

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: 18.768

DIÂMETRO DA PEÇA: 119.997

DIÂMETRO MÁXIMO: 120.004

DIÂMETRO MÍNIMO: 119.993

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.011

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 8

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 120.000

À PEÇA ESTÁ REJEITADA/REFUGO

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA

LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

CAPÍTULO 6

TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliação do Sistema Informatizado de Auxílio à Inspeção Geométrica de Peças Circulares GP – SII, foram feitos dois testes: Teste de campo e a avaliação do programa computacional. O teste de campo consistiu na inspeção de um conjunto de 10 peças circulares pertencente ao Laboratório de Metrologia . E o segundo tipo de teste efetuado buscou-se avaliar o programa computacional relacionando os seus resultados com os do software integrado da MM3C. Esta avaliação está apresentada e descrita no item 6.1, enquanto que o teste de campo encontra-se no item 6.2.

6.1 - AVALIAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Como dito, a forma circular é muito utilizada em processos de usinagem. O método proposto tem como principal objetivo comparar o diâmetro encontrado, com as dimensões de um calibrador do tipo Passa-Não Passa que eventualmente venha inspecionar esta peça. Logo, é de grande interesse avaliar o procedimento utilizado no cálculo deste diâmetro.

O Método de ajuste utilizado para o cálculo deste diâmetro foi o Método dos Mínimos Quadrados, o mesmo utilizado pelo software da MM3C. Para poder avaliar os resultados obtidos foram feitas medições do diâmetro de peças através

do Programa da MM3C e do Programa Proposto e, posteriormente uma comparação entre estes resultados.

Posicionando as peças sobre o volume de controle da MM3C, foram feitas cinco medições de seus diâmetros, aumentando o número de pontos tomados no perfil, como mostra os gráficos 6.1 até 6.5.

Figura 6.1 – Gráfico da variação do diâmetro (30mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça.

O gráfico da Figura 6.1 apresenta os resultados de medições utilizando o software da MM3C (curva na cor rosa) e o software proposto (curva na cor azul), onde pode-se observar a proximidade entre eles.

Figura 6.2 - Gráfico da variação do diâmetro (50mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça.

Figura 6.3 - Variação do diâmetro (80mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça.

Figura 6.4 - Gráfico da variação do diâmetro (120mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça.

Figura 6.5 - Gráfico da variação do diâmetro (180mm) com relação ao número de pontos do perfil da peça.

Observando a Figura 6.1 nota-se que a diferença encontrada entre as médias dos diâmetros é insignificante, pois não ultrapassa $0,3\mu\text{m}$.

Nas figuras 6.2 até 6.5, observa-se um aumento nesta diferença, não ultrapassando $2\mu\text{m}$. Esta diferença entre os resultados das medições utilizando o Software da MM3C e o Programa Computacional GP-SII é devido ao critério de arredondamento utilizado.

Para diâmetros menores, como mostra a Figura 6.1, este critério de arredondamento não influencia os resultados de ambos os programas. No entanto, a medida que o diâmetro das peças aumenta, observa-se uma diferença significativa entre as médias dos valores obtidos. Tendo em conta que no volume da MM3C podem ser medidas peças com até 350mm de diâmetro, este aspecto deve ser levado em consideração.

6.2.1 – DESVIO PADRÃO DOS DIÂMETROS COM RELAÇÃO AO NÚMERO DE PONTOS TOMADOS NO PERFIL.

O desvio padrão é considerado como sendo o melhor indicador da dispersão dos dados, oferecendo informações sobre como os valores individuais se agrupam com relação à tendência central. Com base nisto, é interessante traçar um gráfico do desvio padrão versus o número de pontos tomados no perfil da peça para ambos os processos de medições (GP-SII e o Software da MM3C). O resultado é melhor visualizado nos gráficos das figuras 6.6 até 6.10.

Figura 6.6 - Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 30mm com relação ao numero de pontos do perfil da peça.

Através da Figura 6.6 pode-se observar que os valores dos desvios padrões obtidos em ambos os processos de medição, são os mesmos para o diâmetro de 30mm. Uma curva polinomial foi ajustada utilizando o Software Excel e obteve-se um bom ajuste com um coeficiente de correlação de 99,18%.

Figura 6.7 – Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 50mm com relação ao número de pontos do perfil da peça.

Figura 6.8 – Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 80mm com relação ao número de pontos do perfil da peça.

Figura 6.9 – Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 120mm com relação ao número de pontos do perfil da peça.

Figura 6.10 – Gráfico da variação do desvio padrão do diâmetro 180mm com relação ao número de pontos do perfil da peça.

Nos gráficos das Figuras 6.7 até 6.10, observa-se uma pequena diferença entre os dois métodos de ajustes utilizados. Mas, em todos os gráficos observa-se uma clara tendência na diminuição do desvio padrão quando o número de pontos do perfil da peça é relativamente alto. Isto pode ser visto observando as curvas de ajuste. Nota-se também que os coeficientes de correlações obtidos não são inferiores à 91%, confirmando o bom ajuste destas curvas.

6.1.3 – INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PONTOS TOMADOS NO PLANO DE REFERÊNCIA.

Um plano pode ser definido por n pontos distintos aplicando-se o método dos mínimos quadrados, onde $n \geq 3$. Embora este processo seja interessante, neste trabalho não foi necessário aplica-lo.

O critério adotado foi o mais simples possível, ou seja, o plano de referência foi definido pelo mínimo de pontos necessários, que são 3, pois, por estes três pontos passa-se um único plano.

Para mostrar que o critério adotado é satisfatório, não influenciando significativamente nos resultados obtidos, foram feitas as seguintes medições:

- ✓ Um conjunto de coordenadas do perfil da peça foi armazenado num banco de dados;
- ✓ Com este conjunto de coordenadas, variou-se os três pontos do plano de referência e conseqüentemente o cálculo do diâmetro das peças.

Os resultados estão visualizados na Tabela 6.1 abaixo.

Diâmetro Nominal		
30 (mm)	80 (mm)	120 (mm)
Diâmetro Encontrado		
29,988476	80,004134	119,992607
29,988414	80,004118	119,992662
29,988411	80,004195	119,992667
29,988489	80,004136	119,992672
29,988425	80,004109	119,992669
29,988423	80,004114	119,992691
29,988484	80,004108	119,992677
Desvio Padrão		
0.000035	0.000031	0.000027

Tabela 6.1 – Verificação da influência do número de pontos do plano de referência.

Analisando a Tabela 6.1, observa-se que realmente a escolha dos pontos do plano de referência não influencia de forma significativa o resultado obtido no presente trabalho, pois os desvios padrões são insignificantes, sendo assim, o critério adotado é válido.

6.2 – TESTE DE CAMPO.

Encerrado com sucesso os testes de avaliação do Programa Computacional GP-SII, efetuou-se o “teste de campo”, cujo objetivo foi avaliar o desempenho do GP-SII em uma situação real de inspeção. O funcionamento do sistema, sob os aspectos dos equipamentos, do programa computacional e da interação entre o usuário e o sistema foram continuamente observados. O teste consistiu na

inspeção de um conjunto de peças circulares fabricadas na oficina integrada do Laboratório de Metrologia.

As principais características do conjunto de peças inspecionadas estão apresentadas a seguir:

Material: aço 1020;

Fabricante: Técnico do LAMAFE;

Máquinas utilizadas: Torno Universal NARDINI-350 e uma Retificadora TSCHUDIN;

Quantidade: 10 peças.

As peças com dimensões de 30, 50, 80, 120 e 180 milímetros, sendo 5 eixos e 5 furos. Após a usinagem, as peças foram limpas e deixadas em repouso sobre a bancada de trabalho, ao lado da MM3C, pelo período de aproximadamente 8 horas a uma temperatura de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Após este tempo de estabilização, iniciou-se a inspeção das peças.

No início das inspeções houve uma certa dificuldade, devido a não familiarização com o Programa. Os principais problemas foram a inobservância de instruções passadas pelo Programa Computacional e a obtenção dos pontos do perfil da peça, visto que o operador deve seguir sempre o mesmo processo de amostragem.

Após este período inicial, houve uma melhor evolução do trabalho, estando o operador melhor familiarizado com o procedimento de inspeção auxiliado pelo sistema.

O programa Computacional GP-SII tem como principal objetivo comparar dimensões encontradas com dimensões de calibradores Passa-Não Passa, que eventualmente venha inspecionar a peça medida, seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 6406.

	EIXO	
	DIÂMETRO NOMINAL (MM)	
	30	50
Diâmetro Máx. encontrado	29,999	50,011
Lado Passa Usado	30,003	50,003
Lado Passa Novo Máx.	29,999	49,999
Lado Passa Novo Mín.	29,995	49,995
Lado Não Passa Máx.	29,981	49,977
Lado Não Passa Mín.	29,977	49,973

Tabela 6.2 – Resultados numéricos para inspeções de eixos.

Os resultados numéricos de algumas inspeções de eixos estão mostrados na Tabela 6.2. Para as demais dimensões de eixos utilizados neste trabalho adotou-se o mesmo critério de cálculo.

A representação gráfica da posição dos campos de tolerância dos calibradores para medidas externas com relação à tolerância da peça avaliada é mostrada nas Figuras 6.11 e 6.12, tendo como base a Figura 5.8.

Figura 6.11 – Representação gráfica do campo de tolerância de calibradores para eixos de 30 mm.

onde:

t = metade da tolerância de fabricação dos calibradores para medida externa;

y_l = Desgaste permitido para calibradores de eixo.

Segundo a equação 5.11 é fácil observar que o diâmetro máximo calculado pelo software (29,999mm) está compreendido entre os limites de aceitação, ou seja, entre o Lado Passa Usado (30,003mm) e o Lado Não Passa Mínimo (29,977mm), conseqüentemente, a peça está aceita.

Figura 6.12 – Representação gráfica do campo de tolerância de calibradores para eixos de 50mm.

Já, na Figura 6.12 o diâmetro máximo encontrado (50,011mm) está acima do máximo permitido (50,003mm), satisfazendo a equação 5.15 e desta forma a peça foi rejeitada, mas com a possibilidade de ser retrabalhada.

Os resultados numéricos de algumas inspeções, agora de furos, estão mostrados na tabela 6.3 abaixo.

	FURO	
	DIÂMETRO NOMINAL (MM)	
	80	120
Diâmetro Mín. encontrado	80,006	119,984
Lado Passa Usado	79,997	119,996
Lado Passa Novo Máx.	80,007	120,008
Lado Passa Novo Mín.	80,002	120,002
Lado Não Passa Máx.	80,033	120,038
Lado Não Passa Mín.	80,028	120,032

Tabela 6.3 – Resultados numéricos para inspeções de furos.

Os resultados numéricos de algumas inspeções de furos estão mostrados na Tabela 6.03. Para as demais dimensões de furos utilizados neste trabalho adotou-se o mesmo critério de cálculo.

A representação gráfica da posição dos campos de tolerância dos calibradores para medidas internas com relação à tolerância da peça avaliada é mostrada nas Figuras 6.13 e 6.14, tendo como base a Figura 5.7.

Figura 6.13 – Representação gráfica do campo de tolerância de calibradores para furos de 80mm.

Na Figura 6.13 observa-se que o diâmetro mínimo encontrado do furo (80,006 mm) está compreendido entre os limites de aceitação do calibrador do Tipo Passa-Não Passa, satisfazendo a equação 5.11 e consequentemente a peça inspecionada está aceita.

Figura 6.14 – Representação gráfica do campo de tolerância de calibradores para furos de 120mm.

Nesta Figura 6.14 pode-se observar que a peça foi rejeitada, pois está fora do limite de aceitação do calibrador. Uma vez que o diâmetro mínimo encontrado (119,984mm) esteja menor do que o mínimo permitido (119,996mm), existe a possibilidade da peça ser retrabalhada.

Observando as representações gráficas dos campos de tolerância dos calibradores, observa-se que a utilização do mesmo permite a aceitação de peças defeituosas ou a reprovação de peças “boas”. Isto acontece quando a dimensão encontrada da peça estiver dentro das tolerâncias t ou y_1 do calibrador, como visto na Figura 6.11. Nesta figura pode-se observar que se o diâmetro encontrado estivesse dentro da tolerância t , ou seja, entre 29,979mm e 29,977mm, a peça estaria aceita, mais na realidade está com seu diâmetro menor do que o mínimo permitido (29,979mm). Esta tolerância é bem pequena, comparada com a

tolerância de fabricação do eixo. Nesta tolerância t ou y_l , pode-se levar em consideração erros que eventualmente a MM3C apresente.

Os resultados das inspeções de todas as outras peças circulares estão apresentadas no Apêndice 2, em anexo.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Neste trabalho foi apresentada a implementação de um sistema informatizado que permitiu simular calibradores do tipo Passa-Não Passa em uma MM3C do tipo Ponte Móvel.

Primeiramente as posições de interesse na superfície da peça são focadas e digitalizadas, visando a montagem de um conjunto de pontos representativos da superfície ou perfil sendo avaliado. Uma vez adquirido este conjunto de pontos, o objetivo final foi determinar se a geometria das peças, satisfaz as especificações de projeto.

A Norma técnica Brasileira de construção de calibradores, a NBR 6406, 1980, foi utilizada neste trabalho, fornecendo dados e informações para simulação de calibradores do tipo Passa-Não Passa.

O programa principal foi desenvolvido em linguagem Turbo Pascal 6.0 da Borland Internacional.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, ficou evidente a necessidade de mão-de-obra qualificada para atuar diretamente no processo de inspeção.

Além das observações já feitas, pode-se destacar a partir dos desenvolvimentos teóricos e experimentais, os seguintes pontos essenciais e conclusões:

- Facilidade de consulta das informações armazenadas na base de dados, garantindo rastreabilidade das informações;
- Rapidez e flexibilidade no processo de inspeção que é uma das características fundamentais de um calibrador do tipo Passa-Não Passa, fornecendo decisões diretas, ou seja, SIM-Passa, NÃO-Não Passa sem nenhuma ambigüidade;
- Padronização da inspeção, pois todo o serviço é executado sob orientação do sistema, os passos do operador são guiados e monitorados pelo sistema, que é sempre o mesmo para qualquer peça, independente do operador;
- As limitações dos calibradores que estão apresentadas no Item 2.7.6, que diz respeito à eventuais erros de forma, não são verificadas quando se utiliza o programa computacional proposto;
- Além de simular um calibrador do tipo Passa-Não Passa, o programa computacional fornece o diâmetro e o erro de cilindridade da peça. Com o diâmetro de peças inspecionadas, pode-se verificar as tendências de um determinado processo de fabricação;
- A emissão de relatórios técnicos permite ao supervisor uma checagem das atividades efetuadas pelo operador e detectar alguns enganos cometidos pelo mesmo;

Como resultados destas observações e conclusões, podem ser feitas algumas propostas para trabalhos futuros, relacionadas a seguir:

- Acrescentar ao programa computacional inspeções de outras formas geométricas, tais como: roscas, rebaixos, profundidades, engrenagens e outros.
- Aplicar aos cálculos utilizados no programa computacional os conceitos sobre incerteza de medição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/ASME B 89.4.1. *Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines.* (1995).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1961). NB-86 - *Norma de Sistema de Tolerância e Ajustes.* Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). NBR 6165 - *Temperatura de Referência.* Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). NBR 6406 - *Calibradores. Características Construtivas, Tolerâncias.* Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). NBR 6409 - *Tolerância de Forma e Tolerância de Posição.* Rio de Janeiro.

BOSCH, J., A. (1995). *Coordinate Measuring Machines and Systems.* New York, Marcel Dekker.

BOULOS, P.; CAMARGO, I. (1987). *Geometria Analítica.* Um tratamento vetorial, 2 edição, editora McGraw Hill, São Paulo.

BRYAN, J.B. (1979). *The Abbé principle revisited an updated interpretation.* Precision Engineering, v. 1, n.1, p. 129-132.

BSI, 1987. *Assessment of departures from roundness*, Part 1. London: British Standard Institution, BS 3730:1987.

BURDEKIN, M.; DI GIACOMO, B.; XIJING, Z. (1984). *Calibration software and application to co-ordinate measuring machines*. Department of Mechanical Engineering, UMIST, Manchester. p. 01-07.

DI GIACOMO, B.; PURQUERIO, B. (1991). *Calibração e compensação hídrica dos erros geométricos em Máquinas de Medir a Três Coordenadas*. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, p. 711- 714.

DIN 7184, *Form – und Lagetoleranzen – Begriffe, Zeichnungseintragung – Kurzfassung*, Norma DIN.

FITZPATRICK, M. (1993). *Working Skills in Geometric Dimensioning and Tolerancing*. Editora Delmar, USA.

HARVIE, A. (1986). *Factors affecting component measurement on coordinate measuring machines*. Precision Engineering, v.8, n. 1, p. 13-18.

KENNEDY, HOFFMAN, BOND (1987). *Inspection and Gaging*, Industrial Press. Inc., New York, NY.

LÉVESQUE, B. (1996). *A continuous tolerance system*. Precision Engineering, vol 19, p. 19-27.

MONTGOMERY, D.C.; RUNTER, G.C.; MONTGOMERY, D. (1994).

Applied statistics and probability for engineers. New York, John Wiley & Sons.

NIST.(1994). *Technical Note 1297. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results*. National Institute of Standards and Technology,.

SARDINÃS, F.H. (1986). *Metrologia Dimensional*, .Editora ISPJAE, Ciudad de La Habana.

SOSA CARDOZA, J. A. (1995). *Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas*. Tese Doutorado, EESC-USP, Agosto.

SPOTTS, M.F. (1983). *Dimensioning & Tolerancing for quantity production*. editora Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J, USA.

WECKENMANN, A.; EITZER, H.; GARMER, M.; WEBER, H. (1995). *Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology*, Precision Engineering, vol. 17, p. 244-252,.

WECKENMANN, A.; HEINRICHOWSKI, M. (1985). *Problems with software for running coordinate measuring machines*. Precision Engineering, v. 7, n. 2, p. 87-91.

WECKENMANN, A.; HEINRICHOWSKI, M.; MORDHORST, H.J. (1991);

Design of gauges and multipoint measuring systems using coordinate-measuring-machine data and computer simulation, Precision Engineering, vol. , p. 203-207.

WEILL, R. (1988). *Tolerancing for function*, *Annals of the CIRP*. vol. 37, p. 603-610.

WHITEHOUSE, D. J (1994).. *Handbook of Surface Metrology*. editora IOP, Philadelphia, USA.

APÊNDICE 1

Grupo de Dimensões em milímetros – valores da tabela em microns														
Qualidade	até 1	de 1 até 3	de 3 até 6	de 6 até 10	de 10 até 18	de 18 até 30	de 30 até 50	de 50 até 80	de 80 até 120	de 120 até 180	de 180 até 250	de 250 até 315	de 315 até 400	de 400 até 500
IT 01	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1,2	2	2,5	3	4
IT0	0,5	0,5	0,6	0,6	0,8	1	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6
IT1	0,8	0,8	1	1	1,2	1,5	1,5	2	2,5	3,5	4,5	6	7	8
IT2	1,2	1,2	1,5	1,5	2	2,5	2,5	3	4	5	7	8	9	10
IT3	2	2	2,5	2,5	3	4	4	5	6	8	10	12	13	15
IT4	3	3	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
IT5	4	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
IT6	6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
IT7	10	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
IT8	14	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97
IT9	25	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
IT10	40	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
IT11	60	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT12	----	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT13	----	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970
IT14	----	250	300	360	430	520	620	740	870	1.000	1.150	1.300	1.400	1.550
IT15	----	400	480	580	700	840	1.000	1.200	1.400	1.600	1.850	2.100	2.300	2.500
IT16	----	600	750	900	1.100	1.300	1.600	1.900	2.200	2.500	2.900	3.200	3.600	4.000

Tabela A.1 - Tolerâncias fundamentais para dimensões até 500mm.

Qualidade	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Tolerâncias	$7i$	$10i$	$25i$	$16i$	$40i$	$64i$	$100i$	$160i$	$250i$	$400i$	$640i$	$1000i$

Tabela A.2 - Tolerâncias fundamentais em função de i , para as qualidades de trabalho de IT5 à IT16.

Valores em μm	Arredondamentos em múltiplos de:
≤ 100	1
$> 100 \leq 200$	5
$> 200 \leq 400$	10

Tabela A.3 - Critério de arredondamento dos valores das tolerâncias fundamentais para as qualidades IT5 até IT11.

Ajustes com folga	Ajustes incertos	Ajustes com interferência
H7/A9 = A9/h7 H11/a11 = A11/h11	H6/j5 = J6/h5 H7/j6 = J7/h6 H8/j7 = J8/h7	H5/n4 = N5/h4 H6/n5 = N6/h5
H7/b8 = B8/h7 H7/b9 = B9/h7 H11/b11 = B11/h11	H5/k4 = K5/h4 H6/k5 = K6/h5 H7/k6 = K7/h6 H8/k7 = K8/h7	H5/p4 = P5/h4 H6/p5 = P6/h5 H7/p6 = P7/h6
H7/c8 = C8/h7 H7/c9 = C9/h7 H11/c11 = C11/h11	H5/m4 = M5/h4 H6/m5 = M6/h5 H7/m6 = M7/h6 H8/m7 = M8/h7	H5/r4 = R5/h4 H6/r5 = R6/h5 H7/r6 = R7/h6 H8/r7 = R8/h7
H6/d6 = D6/h6 H6/d7 = D7/h6 H7/d8 = D8/h7 H8/d10 = D10/h8 H11/d11 = D11/h11	H7/n6 = N7/h6 H8/n7 = N8/h7	H5/s4 = S5/h4 H6/s5 = S6/h5 H7/s6 = S7/h6 H8/s7 = S7/h8
H5/e5 = E5/h5 H6/e6 = E6/h6 H6/e7 = E7/h6 H7/e8 = E8/h7 H8/e9 = E9/h8 H10/e9 = H10/h9	H8/p7 = P8/h7	H6/t5 = T6/h5 H7/t6 = T7/h6 H8/t7 = T7/h8
H5/f4 = F5/h4 H5/f5 = F5/h5 H6/f6 = F6/h6 H7/f7 = F7/h7 H8/f8 = F8/h8 H8/f9 = F9/h8		H6/u5 = U6/h5 H7/u6 = U7/h6 H8/u7 = U7/h8
H5/g4 = G5/h4 H6/g5 = G6/h5 H7/g6 = G7/h6 H8/g7 = G7/h8		H6/v5 = V6/h5 H7/v6 = V7/h6 H8/v7 = V7/h8
H5/h4 = H5/h4 H6/h5 = H6/h5 H7/h6 = H7/h6 H8/h7 = H8/h7 H8/h8 = H8/h8 H11/h11 = H11/h11		H6/x5 = X6/h5 H7/x6 = X7/h6 H8/x7 = X7/h8
		H7/y6 = Y7/h6 H8/y7 = Y7/h8
		H7/z6 = Z7/h6 H8/z7 = Z8/h7
		H7/za6 = ZA7/h6 H8/za7 = ZA8/h7
		H8/zb7 = ZB8/h7 H8/zb8 = ZB8/h8 H9/zb8 = ZB9/h8
		H8/zc7 = ZC8/h7 H8/zc8 = ZC8/h8 H9/zc8 = ZC9/h8

Tabela A.4 – Ajustes equivalentes.

MEDIDA DOS CALIBRADORES		Dimensão Nominal							
		Até 150mm				Acima de 180mm			
		Calibrador de fabricação		Contracalibrador		Calibrador de fabricação		Contracalibrador	
		Medida básica	Tolerân. de fabric.	Medida básica	Tolerân. de fabric.	Medida básica	Tolerân. de fabric.	Medida básica	Tolerân. de fabric.
Calibrador para medida interna	Lado “não passa”	L	$\pm H/2$ (p/esfera $\pm H_s/2$)	Não fixado		L- α	$\pm H_s/2$ (p/tampã o $\pm H_s/2$)	Não fixado	
	Lado “passa” novo	l+z	$\pm H/2$			l+z	$\pm H/2$ (p/esfera $\pm H_s/2$)		
	Lado “passa” usado	l-y	—			l-y + α	—		
Calibrador para medida externa	Lado “passa” usado	L+y ₁	—	L+y ₁	$\pm H_p/2$	L+y ₁ - α_1	—	L+y ₁ - α_1	$\pm H_p/2$
	Lado “passa” novo	L-z ₁	$\pm H_1/2$	L-z ₁	$\pm H_p/2$	L-z ₁	$\pm H_1/2$	L-z ₁	$\pm H_p/2$
	Lado “não passa”	l	$\pm H_1/2$	l	$\pm H_p/2$	l+ α_1	$\pm H_1/2$	l+ α_1	$\pm H_p/2$

Tabela A.5 – Tabela para cálculo de calibradores.

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

Emissão: 15/01/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS

CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 9

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: -2.439

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -99.015

DIÂMETRO DA PEÇA: 30.007

DIÂMETRO MÁXIMO: 30.021

DIÂMETRO MÍNIMO: 29.988

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.017

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 30

A PEÇA ESTÁ REJEITADA (RETRABALHO)

DESEJA CONTINUAR? S/N >=

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 15/01/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS

CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 11

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: -3.283

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -17.062

DIÂMETRO DA PEÇA: 50.023

DIÂMETRO MÁXIMO: 50.046

DIÂMETRO MÍNIMO: 50.005

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.021

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 50

A PEÇA ESTA ACEITA

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 15/01/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 11

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: 5.653

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -141.705

DIÂMETRO DA PEÇA: 80.021

DIÂMETRO MÁXIMO: 80.040

DIÂMETRO MÍNIMO: 80.006

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.017

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 80

A PEÇA ESTA ACEITA

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 15/01/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 19

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: 18.228

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -179.454

DIÂMETRO DA PEÇA: 120.008

DIÂMETRO MÁXIMO: 120.031

DIÂMETRO MÍNIMO: 119.984

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.023

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 120

A PEÇA ESTÁ REJEITADA (RETRABALHO)

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 15/01/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 19

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: -64.236

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -37.871

DIÂMETRO DA PEÇA: 180.002

DIÂMETRO MÁXIMO: 180.048

DIÂMETRO MÍNIMO: 179.950

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.049

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 180

A PEÇA ESTÁ REJEITADA (RETRABALHO)

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 16/01/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 9

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: 7.813

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -143.095

DIÂMETRO DA PEÇA: 29.987

DIÂMETRO MÁXIMO: 29.999

DIÂMETRO MÍNIMO: 29.974

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.013

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 30

A PEÇA ESTÁ ACEITA

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 16/01/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 11

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: -36.057

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -9.816

DIÂMETRO DA PEÇA: 49.983

DIÂMETRO MÁXIMO: 50.011

DIÂMETRO MÍNIMO: 49.945

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.033

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 50

A PEÇA ESTÁ REJEITADA (RETRABALHO)

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 16/01/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 11

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: -49.265

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -15.248

DIÂMETRO DA PEÇA: 79.985

DIÂMETRO MÁXIMO: 79.996

DIÂMETRO MÍNIMO: 79.946

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.025

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 80

A PEÇA ESTA ACEITA

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 17/03/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 19

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: 10.663

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: 21.404

DIÂMETRO DA PEÇA: 119.971

DIÂMETRO MÁXIMO: 119.987

DIÂMETRO MÍNIMO: 119.955

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.016

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 120

À PEÇA ESTA ACEITA

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250

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

Emissão: 17/03/99

LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS
CERTIFICADO DE INSPEÇÃO

NÚMERO DE PONTOS DO PERFIL DA PEÇA: 19

COORDENADA X DO CENTRO DA PEÇA: 32.645

COORDENADA Y DO CENTRO DA PEÇA: -170.077

DIÂMETRO DA PEÇA: 179.961

DIÂMETRO MÁXIMO: 179.988

DIÂMETRO MÍNIMO: 179.922

CILINDRICIDADE DA PEÇA: 0.033

QUALIDADE DE TRABALHO DA PEÇA: 7

DIÂMETRO NOMINAL DA PEÇA: 180

A PEÇA ESTA ACEITA

DESEJA CONTINUAR? S/N >-

METROLOGIA
LAMAFE - USP

Laboratório de Máquinas Ferramentas - SEM - EESC - USP - São Carlos

Av. Dr Carlos Botelho 1465 - São Carlos - SP - Fone: 273 9420 Fax: (016) 273-9402 CEP: 13560-250