Campus de São Carlos

UMA METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA
INCERTEZA DAS MEDIÇÕES A TRÊS
COORDENADAS

ROSANA CAMARGO

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**

**UMA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA
INCERTEZA DAS MEDIÇÕES A TRÊS
COORDENADAS**

ROSANA CAMARGO

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 04/9/00

Ass

Acmm

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.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016530

ORIENTADOR: Prof.Dr.Benedito Di Giacomo

**São Carlos
2000**

Class.	TESE
Cat.	1066
Tombo	T0192/00

st 1100289

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

C173m

Camargo, Rosana

Uma metodologia para o cálculo da incerteza das medições a três coordenadas/Rosana Camargo. – São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos -Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo.

1. Incerteza de medição. 2. Máquinas de medir a três coordenadas. 3. Erro volumétrico. I. Título.

À minha mãe Antonia e à minha irmã Lúcia

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Benedito Di Giacomo, meu orientador, pelo apoio que me prestou, pelas preciosas observações, sugestões, análise e discussão durante a realização deste trabalho.

A Renata Belluzzo Zironi, Alessandro Marques e José Claudio, pelo apoio, amizade, carinho, incentivo e pela alegria, sempre presente, neste período em que estivemos juntos.

Aos colegas Rosenda V. Arencibia, Roxana M. M. Orrego, Fabricio, Denise V. Sato, Vagner A. Souza, Fabricio Flores, Santoro, Alexandre, Beth, Ana Paula, Rubia, pela amizade, companheirismo e apoio manifestados durante o transcorrer deste trabalho.

Aos funcionários da Oficina do LAMAFE, Luis C. Neves, Adão S. Bolsan, José C. Botelho e José Risardi pela amizade e apoio técnico.

Aos colegas, amigos e funcionários do CEFET-SP que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

A minha amiga Beatriz Dadalti pela revisão gramatical.

Ao Henrique, Adnauer, Matilde e Cassio pelos ensinamentos, apoio e amizade.

Ao Rodrigo C. da Silva e Zuleica Margutti meu especial agradecimento pela presença constante neste período, dando apoio, carinho e incentivo.

À minha mãe, meus irmãos Carlos, Vera, Lúcia, Reginaldo, Cibele; aos sobrinhos Marcos, Alexandre, Rodrigo, Aruanã, Juliana, Marcia e Fernandinha; aos meus cunhados Luiz, Lucho, Miriam e primas Cida e Cleuza, por existirem.

A Deus, pela vida e pela força.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
.....	
1 – INTRODUÇÃO.....	1
 2 – RASTREABILIDADE DAS MEDIÇÕES, CALIBRAÇÃO DE ERROS DE ERROS DE MM3C E INCERTEZA DE MEDIÇÃO	 6
2.1 – RASTREABILIDADE DAS MEDIÇÕES EM MM3C.....	8
2.1.1 -MÉTODO DE COMPARAÇÃO	11
2.1.2 - TESTES DE DESEMPENHO	11
2.1.3 - MODELAGEM MATEMÁTICA	13
2.2 - CALIBRAÇÃO DE ERROS DE MM3C.	15
2.2.1 - CALIBRAÇÃO INDIRETA	15
2.2.2 - CALIBRAÇÃO DIRETA	20
2.3 - INCERTEZA DA MEDIÇÃO EM MM3Cs.....	21
2.3.1 – VARIÁVEIS DEPENDENTES DA MM3C.....	23
2.3.2 – VÁRIÁVEIS INDEPENDENTES DA MM3C.....	25

3 -BASES TEÓRICAS SOBRE: ERROS DE MEDIÇÃO, INCERTEZA DE MEDIÇÃO E ESTATÍSTICA FUNDAMENTAL.....	28
3.1- ERRO DE MEDIÇÃO.....	28
3.2 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS EXPERIMENTAIS.....	30
3.3 - TESTE DE ADERÊNCIA	37
3.4 - INCERTEZA DA MEDIÇÃO	38
3.4.1- INCERTEZA PADRONIZADA DO TIPO A E DO TIPO B	39
3.4.2 - INCERTEZA PADRÃO COMBINADA (u_c)	42
3.4.3 - INCERTEZA EXPANDIDA E INTERVALO DE CONFIANÇA	43
4 - UMA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA DAS MEDIÇÕES A TRÊS COORDENADAS.....	46
4.1 – MODELAGEM MATEMÁTICA.....	47
4.2 – CALIBRAÇÃO DA MM3C	47
4.3 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA INCERTEZA.....	48
4.4 – CÁLCULO DA INCERTEZA DOS ERROS GEOMÉTRICOS AVALIADOS PELA CALIBRAÇÃO E DOS BRAÇOS DE ABBÈ.....	48
4.5 – CÁLCULO DA INCERTEZA DAS COMPONENTES DO ERRO VOLUMÉTRICO DA MM3C.....	49
5 – DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA PROPOSTA	50
5.1 - CALIBRAÇÃO DA MM3C	52
5.1.1 - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NA CALIBRAÇÃO	53
5.1.2 – DETERMINAÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS NA MM3C	58

5.2 – ANÁLISE GEOMÉTRICA	66
6 – RESULTADOS DA INCERTEZA DOS ERROS DAS COMPONENTES VOLUMÉTRICAS E_x, E_y E E_z DA MM3C	79
6.1 – PARÂMETROS DA INCERTEZA	79
6.1.2 – VALORES NUMÉRICOS CORRESPONDENTES ÀS GRANDEZAS (M) AVALIADAS NA DETERMINAÇÃO DO ERRO DE “PITCH”	81
6.1.3 – TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR.....	83
6.1.4 – DADOS REFERENTES AOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DA MM3C.....	83
6.2 – CÁLCULO DA INCERTEZA PADRÃO COMBINADA (u_c) E EXPANDIDA (U) DOS PARÂMETROS QUE COMPÕEM A INCERTEZA DOS ERROS AVALIADOS PELA CALIBRAÇÃO.....	84
6.2.1 – DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES DA INCERTEZA COMBINADA (u_c).....	85
6.2.2 – CÁLCULO DA INCERTEZA PADRÃO COMBINADA (u_c)	85
6.2.3 – CÁLCULO DA INCERTEZA EXPANDIDA (U).....	89
6.3 – INCERTEZA DAS COMPONENTES DO ERRO VOLUMÉTRICO.....	90
7 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	95
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
9 – BIBLIOGRAFIA.....	102

APÊNDICES

A- GRÁFICOS DOS ERROS GEOMÉTRICOS AVALIADOS NA CALIBRAÇÃO DA MM3C.....	105
B - TABELAS DE CÁLCULO DA INCERTEZA PADRÃO COMBINADA (U_c) E EXPANDIDA (U) DOS ERROS GEOMÉTRICOS.....	112
C - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE NA ACURACIDADE DA MM3C.....	118
D - GRAUS DE LIBERDADE.....	119
E - FATOR DE COMPENSAÇÃO DO LASER.....	120
F - PRINCÍPIO DE ABBÈ.....	123
G - TABELA DE CÁLCULO DA INCERTEZA DA MEDIÇÃO DA COMPONENTE VOLUMÉTRICA, E_x DA MM3C.....	125
H - TABELA DE CÁLCULO DA INCERTEZA DA MEDIÇÃO DA COMPONENTE VOLUMÉTRICA, E_y DA MM3C.....	126
I - TABELA DE CÁLCULO DA INCERTEZA DA MEDIÇÃO DA COMPONENTE VOLUMÉTRICA, E_z DA MM3C.....	127

LISTA DE FIGURAS

CÁPÍTULO 2: RASTREABILIDADE DAS MEDIÇÕES, CALIBRAÇÃO DE ERROS DE MM3C E INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Figura 2.1	Pirâmide descrevendo os caminhos para rastreabilidade de peças manufaturadas até o padrão internacional de comprimento.....	09
Figura 2.2	Formas alternativas da cadeia de rastreabilidade de medição dimensional de peças manufaturadas.....	10
Figura 2.3	Padrão escalonado.....	17
Figura 2.4	Barra de esfera.....	18
Figura 2.5	Placa de esferas.....	18
Figura 2.6	Padrão tetraédrico.....	19
Figura 2.7	Incerteza da medição.....	22
Figura 2.8	Nuvem de incerteza.....	23

CÁPÍTULO 3: BASES TEÓRICAS SOBRE ERROS DE MEDIÇÃO, INCERTEZA DE MEDIÇÃO E ESTATÍSTICA FUNDAMENTAL

Figura 3.1	Função de densidade de probabilidade.....	32
Figura 3.2	Curva de distribuição normal de probabilidade.....	33
Figura 3.3	Curvas Gaussianas.....	34
Figura 3.4	Distribuição uniforme ou retangular.....	35
Figura 3.5	Distribuição triangular.....	37

Figura 3.6 Nível de confiança e diferença entre incerteza combinada e a expandida.....	45
--	----

CÁPÍTULO 5: **DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA PROPOSTA**

Figura 5.1 MM3C tipo Ponte Móvel.....	51
Figura 5.2 Erros mecânicos em modelo de corpo rígido.....	53
Figura 5.3 Princípio básico interferométrico para medição de erros de retilidade.....	55
Figura 5.4 Princípio básico interferométrico para medição de erros de posição, com eixo a medir paralelo ao feixe do laser.....	55
Figura 5.5 Princípio básico interferométrico para medição de erros de posição, com eixo a medir perpendicular ao feixe do laser.....	56
Figura 5.6 Princípio básico interferométrico para medição de erros angulares.....	56
Figura 5.7 Princípio de medição do nível eletrônico.....	57
Figura 5.8 Montagem do esquadro de granito e nível eletrônico para medição de erros de ortogonalidade.....	58
Figura 5.9 Medição do erro de posição do eixo "X".....	59
Figura 5.10 Medição do erro de posição do eixo "Y".....	60
Figura 5.11 Medição do erro de posição do eixo "Z".....	60
Figura 5.12 Medição de retilidade ao longo do eixo "X", com desvio na direção do eixo "Z".....	62
Figura 5.13 Calibração do erro de retilidade ao longo do eixo "X" com desvio na direção do eixo "Y".....	62
Figura 5.14 Calibração do erro de retilidade ao longo do eixo "Z" com desvio na direção do eixo "X".....	63
Figura 5.15 Calibração do erro de retilidade ao longo do eixo "Y" com desvio na direção do eixo "X".....	64

Figura 5.16	Erro de perpendicularidade entre eixos	65
Figura 5.17	Estrutura da MM3C, tipo ponte móvel.....	67
Figura 5.18	Erro de posição devido ao deslocamento na direção do eixo "X"	69
Figura 5.19	Erro angular Pitch de "X"	69
Figura 5.20	Erro angular Yaw de "X"	70
Figura 5.21	Erro angular Roll de "X"	70
Figura 5.22	Erro angular Pitch de "Y"	71
Figura 5.23	Erro angular Yaw de "Y"	71
Figura 5.24	Erro angular Roll de "Y"	72
Figura 5.25	Erro angular Pitch de "Z"	72
Figura 5.26	Erro angular Yaw de "Z"	73
Figura 5.27	Erro angular Roll de "Y"	73
Figura 5.28	Erro de ortogonalidade entre os eixos "Y" e "Z"	74
Figura 5.29	Erro de ortogonalidade entre os eixos "X" e "Z"	74
Figura 5.30	Erro de ortogonalidade entre os eixos "X" e "Y"	75
Figura 5.31	Erro de retilineidade na direção "Y"	75
Figura 5.32	Erro de retilineidade na direção "Z"	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Principais normas para avaliação do desempenho das MM3Cs.....	12
Tabela 5.1 Observações na realização da calibração).....	59
Tabela 5.2 Rotações em torno do eixo “X”.....	64
Tabela 5.3 Erro de retilineidade dos eixos “Y” e “Z”.....	76
Tabela 5.4 Contribuição nas direções “X”, “Y” e “Z”.....	77
Tabela 5.5 Erro de posicionamento total nas direções E_x , E_y e E_z	78
Tabela 6.1 Equações da análise da medição dos erros geométricos..	81
Tabela 6.2 Dimensão dos braços fixos.....	82
Tabela 6.3 Temperatura em que as medições foram realizadas.....	83
Tabela 6.4 Instrumentos utilizados para calibração da MM3C.....	84
Tabela 6.5 Variância combinada (u_c^2)	85
Tabela 6.6 Erro angular “Pitch” $\delta\theta_y(x)$	85
Tabela 6.7 Equações da variância combinada de E_x , E_y e E_z	91
Tabela 6.8 Equações da variância combinada das componentes volumétricas.....	92
Tabela 6.9 Variância combinada de E_x , E_y e E_z	93
Tabela 6.10 Resultado da incerteza padrão combinada das componentes volumétricas E_x , E_y e E_z	94

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Fator de correlação
μ	Média populacional
σ	Desvio padrão populacional
$\bar{x}$	Média amostral
s	Desvio padrão
s²	Variância
ν	Graus de liberdade
ν_{ef}	Graus de liberdade efetivo
e	Número de Euler
E	Esperança
χ	Qui-quadrado
u	Incerteza padrão combinada
u_c^2	Variância padrão combinada
U	Incerteza expandida
Y	Mensurando
y	Resultado da medição
p	Nível de confiança
k	fator de abrangência
k	graus Kelvin
X	Eixo X
Y	Eixo Y
Z	Eixo Z
Y⁴⁵	Braço fixo da máquina entre os sistemas de referência 4 e 5
Z¹²	Braço fixo da máquina entre os sistemas de referência 1 e 2
Z⁵⁶	Braço fixo da máquina entre os sistemas de referência 5 e 6
⊗	Centro de rotação

P¹	Posição atual (laser)
P²	Posição nominal (máquina)
E	Erro
P	Indicação no padrão
M	Valor médio do mensurando
C_L	Correção do Laser (devido a calibração + incerteza + sistema de compensação automática das condições ambientais)
C_{EG}	Correção do Esquadro de granito (calibração)
C_C	Correção do calibrador LVDT
C_N	Correção do nível eletrônico (calibração)
C_C	Correção do calibrador LVDT (calibração)
L_C	Indicação do calibrador LVDT (resolução)
L_L	Indicação do laser (resolução)
L_M	Indicação da máquina (resolução)
L_N	Indicação do nível eletrônico (resolução)
ΔT_{P/M}	Diferença de temperatura entre padrão e máquina
ΔT	Diferença de temperatura de referência
L_C	Indicação do calibrador LVDT (resolução)
C_{CE}	Correção do erro do esquadro
L_{MR}	Indicação na régua
E_P	Erro de Paralaxe
Δ	Incremento de uma variável qualquer
δf/δa	Derivada parcial de uma função qualquer
δy(x)	Erro de retilidade do eixo "X" na direção "Y"
δz(x)	Erro de retilidade do eixo "X" na direção "Z"
δx(y)	Erro de retilidade do eixo "Y" na direção "X"
δz(y)	Erro de retilidade do eixo "Y" na direção "Z"
δx(z)	Erro de retilidade do eixo "Z" na direção "X"
δy(z)	Erro de retilidade do eixo "Z" na direção "Y"

$\delta\theta_y(x)$	Erro pitch do eixo "X"
$\delta\theta_x(y)$	Erro pitch do eixo "Y"
$\delta\theta_x(z)$	Erro pitch do eixo "Z"
$\delta\theta_z(x)$	Erro yaw do eixo "X"
$\delta\theta_z(y)$	Erro yaw do eixo "Y"
$\delta\theta_y(z)$	Erro yaw do eixo "Z"
$\delta\theta_x(x)$	Erro roll do eixo "X"
$\delta\theta_y(y)$	Erro roll do eixo "Y"
$\delta\theta_z(z)$	Erro roll do eixo "Z"
$\delta x(x)$	Erro de posição do eixo "X"
$\delta y(y)$	Erro de posição do eixo "Y"
$\delta z(z)$	Erro de posição do eixo "Z"
$\delta\theta_{xy}$	Erro de ortogonalidade entre os eixos "X" e "Y"
$\delta\theta_{yz}$	Erro de ortogonalidade entre os eixos "Y" e "Z"
$\delta\theta_{zx}$	Erro de ortogonalidade entre os eixos "Z" e "X"
E_x	Erro total sintetizado na direção x da máquina
E_y	Erro total sintetizado na direção y da máquina
E_z	Erro total sintetizado na direção z da máquina
α	Coefficiente de expansão linear
Δt	Variação da temperatura
λ	Comprimento de onda
v	Velocidade
f	Frequência
T	Temperatura
P	Pressão atmosférica
H	Umidade
C	Fator de compensação
N	Número de comprimento de onda

RESUMO

CAMARGO, R. *Uma metodologia para o cálculo da incerteza das medições a três coordenadas*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2000.

O valor de uma grandeza é determinado por um conjunto de operações que caracterizam a medição. O resultado obtido por estas operações é o valor da grandeza, que nunca é o verdadeiro, porque toda medição possui erros de natureza sistemática ou aleatória, que acrescenta uma incerteza ao resultado. Assim, todo resultado de uma medição deve incluir informações sobre a sua incerteza, isto é, sobre o intervalo dentro do qual se estima que esteja o valor verdadeiro. Um consenso internacional sobre o assunto levou à elaboração da ISO-GUM (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição), que fornece regras para a obtenção da expressão da incerteza da medição de grandezas físicas. No entanto, quando se trata da incerteza de medição por coordenadas, isto é, a incerteza na localização de um ponto no espaço, determinado através da indicação de uma máquina de medir a três coordenadas (MM3C), o problema é bem mais complexo. Assim, o objetivo deste trabalho é descrever uma metodologia para calcular a incerteza da medição por coordenadas. Este cálculo envolve a calibração direta da máquina para a avaliação dos 21 possíveis erros geométricos, a análise destes erros para a determinação das equações que permitem calcular as incertezas de cada erro individualmente, e a análise geométrica da estrutura da máquina para determinar as equações de sintetização E_x , E_y e E_z , nas direções de seus eixos. Para definição da metodologia as equações que descrevem a variância combinada dos erros avaliados na calibração, foram substituídas

nas equações que definem a variância do erro volumétrico das componentes E_x , E_y e E_z , dando origem às equações gerais que permitem determinar a incerteza do resultado da medição em uma MM3C.

Palavras-Chaves: Incerteza de medição, Máquinas de medir a três coordenadas, Erro volumétrico.

ABSTRACT

CAMARGO, R. A description of a methodology to calculate the uncertainty measurements to three coordinate. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2000.

The value of a magnitude is determined through a group of operations that characterize it. The result obtained by these operations is the value of the magnitude, and this value is never the true one because all measurements undergo errors of systematic or random nature, which increase an uncertainty to its result. Thus, all measurement result should include information about its uncertainty, that is, about the interval of values inside of which is considered that the true value is. An international accord, on that subject, allowed the elaboration of the ISO-GUM (Guide for the Expression of the Uncertainty of Measurement), that supplies rules for obtaining the expression of the measurement uncertainty for calibrations, linear dimensional measurements, among others. However, when the task is to estimate the uncertainty of coordinate measurements, that is, the uncertainty of a point in the space, determined through the indication of a coordinate measuring machine (CMM), the problem is much more complex. Thus, the objective of this work is the description of a methodology to calculate the uncertainty measurements indication of a three coordinate measuring machine. This involves the direct calibration of the machine for the evaluation of the 21 possible geometric errors, the error analysis for defining the equations that allow to estimate the uncertainties of each error individually and the geometric analysis of the machine structure for determining the error synthetization equations E_x , E_y and E_z . The equations that describe the uncertainty of the geometric error measurements were substituted in the uncertainty equations of E_x ,

E_y and E_z , creating the general equations that allow to determine the uncertainty of the result of a measurement with a CMM.

Keywords: Measurement uncertainty, coordinate measuring machine, error volumetric.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Medir não é uma ação recente na história da humanidade. Desde a antigüidade, o homem sempre sentiu a necessidade de medir, fosse para definir seu espaço, o objeto que teceu, o bloco de pedra que talhou ou ainda a mercadoria que estivesse sendo transacionada. Uma prova disto é a pirâmide de Gizeh, construída pelos egípcios por volta de 4800 a.C., com blocos de pedras com base de 1200mm, cuja diferença dos lados é inferior a 15 mm, o que corresponde a um erro de ortogonalidade de 12 minutos. No início, o homem procurou definir dimensões usando como referência o seu próprio corpo, surgindo, assim, várias unidades de medida. As primeiras de que se tem registro são: o *cúbito*, padrão de comprimento utilizado pela civilização grega 500a.C., que define a distância do cotovelo à ponta do indicador e media cerca de 523 mm. Este foi subdividido em *Palmo*, *Span* e *Dígito*, medindo, cada um, 229, 76 e 19mm, respectivamente. A existência de múltiplas unidades de medida definidas sem qualquer critério científico, trazia dificuldades consideráveis ao comércio. Assim, o governo francês, em 1790, propôs uma Assembléia dando origem a uma comissão formada pelos sábios da época, dentre eles Borda, Lagrange e Laplace, para estudar o problema.

Deste trabalho originou-se o sistema métrico, cuja unidade primária, o metro, foi definida com base em um padrão geográfico, o meridiano da terra a 9 graus e $2/3$, que passa pelo observatório em Paris, separando Dunkirk de Monjuich (perto de Barcelona). O crescimento comercial e, conseqüentemente, o desenvolvimento industrial originaram pressões mundiais por mais qualidade, levando estes dois últimos séculos a uma acelerada evolução do nível tecnológico e da linguagem, transformando a prática da medição em uma ciência - a metrologia. E, foi neste período de contínuo desenvolvimento que, em 1984, a medição do metro padrão passou a ser em função da velocidade da luz no vácuo. Definindo em função do tempo, diz-se que o metro é igual à distância percorrida pela luz no vácuo. O Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo, em sintonia com esse desenvolvimento, mostrou sua competência, apresentando o primeiro protótipo do relógio atômico brasileiro, utilizando tecnologia de átomos-frios, desenvolvido pelo grupo de óptica. Os relógios de átomos frios são muito mais precisos que os relógios atômicos atuais (BANAS, 1999).

Deste desenvolvimento tecnológico, o qual vale lembrar que é cumulativo, ou seja, soma-se o que é atual ao que era novo para as gerações anteriores, surgiu uma grande variedade de instrumentos e equipamentos de medição, a partir da necessidade de acompanhamento adequado da evolução industrial e tecnológica, compreendendo desde um paquímetro até comparadores ópticos, micrômetros a laser, rugosímetros ou ainda as máquinas de medição por coordenadas. As máquinas de medição a três coordenadas surgiram há aproximadamente 30 anos, projetadas e desenvolvidas por Ferranti. Elas provocaram nos anos 80 uma revolução que abalou os princípios e conceitos metrológicos, chegando a se falar em “crise metrológica”, pois se tratava de um equipamento que se destacava pela sua flexibilidade em executar medições em peças com formas geométricas complexas, em curto espaço de tempo, se comparado aos instrumentos tradicionais. Essas máquinas também

eram capazes de fornecer múltiplas interpretações dos dados que descreviam as medições realizadas. Ao mesmo tempo, as normas vigentes e os processos de medições permaneciam atrelados a conceitos e princípios antigos, do período em que comprimentos eram medidos com paquímetros ou micrômetros (SURESH; VOELCKER, 1994).

Em uma retrospectiva do século XX, Juran, citado por PATON (1999), afirma que “um dos maiores acontecimentos do nosso século foi a ascensão do Japão para um status de superpotência econômica, atrás somente dos U.S.A e à frente de nações como Grã-Bretanha e Alemanha, que conseguiram chegar lá pela revolução da qualidade”. Afirma, ainda, que “o século XX foi um século de produtividade e que o século XXI será da qualidade, e que nós apenas começamos a nossa jornada em busca da qualidade”.

É a guerra pela qualidade que vem tornando os processos de manufatura das indústrias mais precisos e complexos, obrigando o aumento de investimentos em modernas máquinas-ferramentas e conseqüentemente em equipamentos de medição tridimensional. Pode-se ir mais longe, e dizer que “metrologia é um dos elementos básicos que sustentam o progresso do país” (GONZÁLEZ, et al. 1999).

Atualmente, os padrões de competitividade mundiais impõem a qualidade como diferencial entre as empresas, exigindo atualização contínua dos processos produtivos. Assim, a associação entre qualidade e normalização passa a ser uma constante. Comprar um produto confiável significa adquirir um produto de qualidade, isto é, produto que atenda a uma especificação; em outras palavras, produto que foi produzido segundo normas de produção e controle adequados. E é neste processo de controle que deve estar implícita a rastreabilidade das medições, ou seja, que o processo de medição esteja relacionado a padrões nacionais e/ou internacionais através de uma cadeia contínua de medições. Nesta cadeia de medições deve constar a incerteza em cada nível [INMETRO,1998].

A incerteza é parte integrante do processo de estabelecimento da conformidade de produtos, como pode ser verificado a partir do que declara a norma ISO 14253-1: 1998. “Esta parte da norma estabelece as regras para determinar quando a característica de uma determinada peça ou equipamento de medição está em conformidade ou em não-conformidade com uma dada tolerância (no caso de peça), ou limites de erros máximos admissíveis (para equipamentos de medir), levando em conta a incerteza de medição”. Esta afirmativa ressalta a importância de se estabelecer a incerteza para as medições. Antigamente, metrologia era definida como sendo “a ciência de medir com precisão” e, por sua vez, precisão, como “uma tentativa de determinar o valor verdadeiro de uma grandeza” (MILLER, 1962). Hoje, é sabido que é impossível a obtenção do valor verdadeiro de uma grandeza, uma vez que sempre existirá uma incerteza associada a cada medição realizada. Toda medição possui um erro, de natureza sistemática e/ou aleatória, que pode ser minimizado, porém, jamais eliminado.

Segundo o [INMETRO,1998], “medição é o conjunto de operações que têm por objetivo determinar o valor de uma grandeza”; “resultado de uma medição é o valor atribuído a um mensurando, obtido por medição”; e “a expressão completa do resultado de uma medição inclui informações sobre a incerteza de medição”.

A importância de se estabelecer a incerteza de medições foi discutida em reunião articulada pelo CIPM (Comitê Internacional de Pesos e Medidas) que, na virada do século, reuniu as seguintes organizações internacionais: ISO - Organização Internacional de Normalização; IEC - Comissão Eletrotécnica Internacional; BIPM - Bureau Internacional de Pesos e Medidas; OIML - Organização Internacional de Metrologia Legal; IUPAC - União Internacional de Química Pura e Aplicada; IUPAP União Internacional de Física Pura e Aplicada - União. O resultado desse trabalho é o ISO-GUM (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição), que é um guia com a finalidade de estabelecer um consenso internacional

sobre a expressão da incerteza em medição. Este guia fornece regras técnicas para determinar a expressão da incerteza. Cria, assim, uma isonomia no tratamento da incerteza de medição em normalização, calibração, credenciamento de laboratórios e serviços de metrologia. De acordo com o vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia, “Incerteza é o resultado de uma avaliação com o propósito de determinar o intervalo dentro do qual se estima que esteja o valor verdadeiro, geralmente associado a um nível de confiança” (INMETRO,1995).

O método de cálculo da incerteza é tão importante quanto o é a incerteza para o resultado da medição. É por esta razão que este trabalho tem por objetivo descrever uma metodologia para a determinação da incerteza dos resultados de medição em máquinas de medir a três coordenadas. Tanto o equipamento em estudo quanto o enfoque atribuído à determinação da expressão da incerteza de medição são fatos que vêm revolucionando a metrologia dimensional.

O desenvolvimento deste trabalho será feito como se segue:

Apresentação da revisão bibliográfica da literatura, em que é abordado o tema sobre incerteza de medição em metrologia, sob o ponto de vista de conformidade de produto (capítulo 2); temas básicos para o cálculo da incerteza de medição (capítulo 3); descrição das etapas a serem cobertas pelo trabalho (capítulo 4); desenvolvimento de metodologia (capítulo 5); apresentação dos resultados das medições e respectivas incertezas (capítulo 6) e conclusões e sugestões para futuros trabalhos (capítulo 7).

CAPÍTULO II

RASTREABILIDADE DAS MEDIÇÕES, CALIBRAÇÃO DE ERROS DE MM3C E INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A rastreabilidade das medições se fez necessária a partir do momento em que se precisou garantir montagens de peça, fabricadas em locais diferentes. O primeiro a manifestar o seu reconhecimento pelo benefício da intercambiabilidade foi o armeiro francês chamado LeBlanc, em 1785 (BOSCH, 1995). Para garantir a intercambiabilidade é essencial que dois itens sejam cumpridos: medição fidedigna e boas máquinas-ferramentas. Estes itens de certa forma são dependentes entre si, isto é, para se obterem boas máquinas é essencial que as medições realizadas durante o controle das peças que as compõem sejam confiáveis. Instrumentos de medição confiáveis precisam de boas máquinas para serem produzidos. Esta dependência leva a um fator comum, a rastreabilidade das medições, que garante que elas estejam relacionadas a

padrões nacionais e/ou internacionais através de uma cadeia contínua de medições, e assim garantir a intercambiabilidade das peças fabricadas.

Hoje, na era de mercado globalizado, a rastreabilidade das medições tornou-se obrigatória, ou seja, qualquer resultado de medição deve fazer parte de uma cadeia ininterrupta de valores, denominada cadeia de rastreabilidade. Em todos os níveis desta cadeia, deve-se adotar o sistema internacional de unidades – SI, bem como deve ser feita uma análise da incerteza da medição em cada etapa do controle das medidas e/ou produto, para certificar-se da compatibilidade do erro de acuracidade com a tolerância (ISO 14253-1:1998).

A partir da necessidade de se definir a incerteza em todos os níveis da cadeia de rastreabilidade, foi elaborado um documento com diretrizes para o cálculo da incerteza. Foi solicitado ao Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), pelos membros do Comité International des Poids et Mesures (CIPM), que tratassem o problema em conjunto com os laboratórios nacionais de metrologia e que fizesse uma recomendação. Em 1978 foi concluído o trabalho, mas, somente quinze anos depois, devido a sua complexidade, é que a primeira edição do “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” foi publicada.

O guia expressa o mais completo e consistente documento já produzido em todos os tempos para estabelecer critérios e regras gerais relacionados à expressão da incerteza de medição (INMETRO, 1998).

O propósito deste documento é tratar o conceito de incerteza como um atributo quantificável, promover informações integrais sobre a maneira pela qual a declaração da incerteza foi estabelecida, e fornecer uma base para a comparação internacional de resultados de medição.

O processo para o cálculo da incerteza pode utilizar muitas fontes de informação, incluindo análise de medições repetidas, dados provenientes de registro de calibração, incerteza designada para a referência, dados obtidos de manuais e livros, especificações do fabricante

e principalmente conhecimento geral do comportamento do processo e propriedades relevantes do material ou instrumento.

Para Maior clareza no entendimento sobre rastreabilidade das medições, calibração dos erros da MM3C e incerteza das medição nas MM3C, neste capítulo será abordado cada destes tópicos, mostrando sua necessidade para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 – RASTREABILIDADE DAS MEDIÇÕES

O aspecto mais importante da rastreabilidade é poder responder à seguinte questão: Qual é a correção a ser aplicada a um resultado de medição, obtido por um dado instrumento? A partir dessa correção vem a questão seguinte: Qual é a incerteza do resultado corrigido da medição? Para responder a estes quesitos são necessários documentos que garantam, em todos os níveis da rastreabilidade, que o processo de medição permita se obter a incerteza apropriada. Assim, uma declaração rigorosa de rastreabilidade deve definir claramente esse processo de medição e a incerteza associada ao resultado, de modo que o resultado alcançado possa ser considerado correto (EHRlich & SATANLEY, 1998).

Aplicar diretamente o conceito de rastreabilidade nas medições a três coordenadas é difícil, uma vez que ocorrem erros de posição, de geometria e de orientação no seu volume de trabalho durante as medições.

A cadeia de rastreabilidade das medições em MM3Cs pode ser esquematizada por meio de uma pirâmide, conforme mostra a figura 2.1.

Na base da pirâmide ficam as MM3Cs (nível 4). Os padrões de transferência, tais como, barra de esferas, padrão escalonado, placa padrão de esferas, entre outros, com um nível de incerteza relativa da ordem de 1ppm (nível 3). Para a calibração dos padrões do nível 3 existe o sistema LASER de medição, cuja incerteza relativa é da ordem de 10^{-2} ppm. No topo da pirâmide está o LASER HeNe iodizado e estabilizado, cuja incerteza relativa é de $2,5 \times 10^{-5}$ ppm (SWYT, 1995).

Figura 2.1 - Pirâmide descrevendo os caminhos para rastrear dimensões de peças manufaturadas até o padrão internacional de comprimento

Existem outras formas para descrever a rastreabilidade das medições em MM3Cs, uma das quais é apresentada pela figura 2.2, em que são mostrados diversos caminhos alternativos que garantem a rastreabilidade.

Até o presente momento, fabricantes e usuários não dispõem de uma norma unificada para testes em MM3C, internacionalmente aceita, que permita se obterem dados do real comportamento metrológico destas máquinas. Os métodos de calibração atuais se baseiam em modelagem matemática, abordagem de comparação e testes de desempenho para a determinação dos erros de medição de peças nas MM3C (SWYT, 1995).

Figura 2.2 - Formas alternativas da cadeia de rastreabilidade de medição dimensional de peças manufaturadas

2.1.1 - Método de comparação

Segundo Kunzmann et al., (1994), “este método é o único considerado metrologicamente correto”. Nele, a incerteza de medição da MM3C é determinada utilizando-se um padrão pré-calibrado, idêntico à peça a ser medida, isto é, que possua a mesma forma geométrica, o mesmo material e as mesmas dimensões da peça. Deve, também, ser posicionado no mesmo local em que a peça foi medida e respeitar a mesma estratégia de medição. Os valores obtidos nas medições da peça são comparados aos obtidos com o padrão.

É um método direto no que se refere à rastreabilidade, porém limitante, visto que a peça medida deve ser exatamente igual à peça de referência. A maior desvantagem está em contrariar uma das principais características da MM3C, que é sua flexibilidade (KUNZMANN et al., 1994).

A grande vantagem deste método é que a máquina não precisa ser totalmente calibrada, sendo apenas estável, visto que os efeitos combinados dos erros da máquina estão embutidos no erro da medição tanto da peça quanto do padrão. As incertezas da medição da peça são derivadas das do padrão.

2.1.2 - Testes de desempenho

Aqui, a principal característica é a utilização de padrões especiais, tais como barra de esferas, padrão escalonado, interferômetro laser, entre outros, na verificação do comportamento da MM3C. O primeiro padrão para verificação de MM3C foi introduzido em 1982, pela Coordinate Measuring Machine Manufactures Association. Atualmente, existem vários padrões de verificação, cujo conceito fundamental, quanto a sua aplicação, é o mesmo para todos. Ou seja, baseia-se na filosofia de medir padrões calibrados, em um número pré-fixado de posições no volume de medição da máquina.

A vantagem do teste de desempenho é a disponibilidade de procedimentos em normas técnicas para a sua execução. Na tabela 2, são apresentadas as principais normas referentes a esta maneira de avaliação de MM3Cs (CENAM, 1996).

A desvantagem deste teste é não ser direcionado para uma tarefa específica; assim, os erros e a incerteza podem ser superestimados ou subestimados significativamente (PEGGS, 1990).

Tabela 2 – Principais normas para avaliação do desempenho das MM3Cs

Origem	Norma	Tipo de calibrador
Alemanha	VDI/VDE 2617	Blocos padrão Padrão escalonado LASER Placa de esferas
USA	ANSI/ASME B 89.1.12M	Barra de esferas Padrão escalonado LASER
Itália	UNI	Blocos padrão Placa de esferas
Japão	JIS 7440	Blocos padrão Padrão escalonado
Associação de Fabricantes de MM3C	CMMA	Blocos padrão
Internacional	ISO/DIS 10360	Blocos padrão Padrão escalonado

O resultado do ensaio de desempenho esclarece se a MM3C preenche as especificações do fabricante para as tarefas padronizadas. Se a MM3C satisfizer as especificações das tarefas padronizadas, costuma-se presumir que seu desempenho também será bom para outras tarefas, ou seja, tem efeito binário (passa ou não-passa).

Não há regras para se chegar a conclusões sobre os erros observados durante estes ensaios e sobre os erros de tarefas individuais de medição. Mas mesmo que tais regras venham a ser desenvolvidas, o teor de informação de um ensaio clássico de desempenho é muito pequeno. Assim, as grandes margens de segurança, formalmente exigidas nos limites de erros previstos, muitas vezes fariam uma CMM parecer significativamente menos exata do que realmente é.

Este método não proporciona informações quantitativas sobre a incerteza da medição, por isso não é considerado bom para se estimar a incerteza da medição a três coordenadas. De qualquer maneira, no ambiente industrial se reconhece que a prática atual de verificação do desempenho, ou inspeção periódica, é adequada para assegurar a rastreabilidade das medições realizadas.

2.1.3 – Modelagem matemática

O método de modelagem matemática corresponde ao desenvolvimento de equações matemáticas que representam o comportamento da MM3C, através das quais é possível simular matematicamente a medição de peças com formas geométricas variadas em qualquer posição e orientação dentro do volume de trabalho de uma MM3C. Este método, também conhecido como máquina virtual, permite combinar e propagar os efeitos sistemáticos e aleatórios de suas diferentes fontes de incerteza, a cada ponto coordenado dentro de seu volume de trabalho. Este método consiste de 2 partes: determinação dos erros paramétricos da MM3C e a simulação computadorizada das tarefas de

medição usando um modelo matemático que dá à Máquina de Medição Virtual um comportamento de erro suficientemente boa para estimar o comportamento da máquina.

Este modelo matemático de erros pode ser construído através das seguintes técnicas:

➤ **Análise Vetorial**

Neste processo, os caminhos de medição são indicados por meio de vetores, que definem a trajetória da sonda. A diferença entre os vetores de posição ideais e os vetores da trajetória da sonda define o erro volumétrico.

➤ **Transformadas homogêneas**

DENATIV & HARTENBERG (1955) introduziram as técnicas de transformação homogêneas aplicadas à mecânica em cinemática. Com a aplicação destas técnicas, mediante o uso de matrizes de transformação 4x4, é possível representar movimentos de translação, de rotação, ou combinação dos dois, possibilitando estabelecer as relações entre partes móveis de um mecanismo e um sistema de coordenadas de referência (SATO, 1998).

➤ **Análise geométrica**

Através da técnica de análise geométrica da estrutura da máquina, é possível verificar a parcela de contribuição de cada erro individual nas componentes do erro volumétrico. A soma algébrica de tais parcelas, para cada um dos eixos, é denominada equação de sintetização.

➤ **Análise estatística**

A partir do conhecimento dos erros de posição, geométricos e de orientação, é possível avaliar o desempenho de uma MM3C por meios estatísticos. Estes erros são obtidos pela calibração de cada erro individual, em forma de valores numéricos. Os valores são tratados por ferramentas estatísticas de forma a generalizar as informações sobre estes erros em todo o volume de trabalho. Através desta técnica também é possível determinar a incerteza de medição em MM3Cs.

2.2 - CALIBRAÇÃO DE ERROS DE MM3C

O resultado de qualquer medição deve estar rastreado. Para sua quantificação, deve-se adotar o sistema internacional de unidades – SI, e haver uma incerteza compatível com a tolerância do produto que estiver sendo medido (ISO 14253-1: 1998).

A calibração é o meio utilizado para determinar a rastreabilidade do instrumento ou máquina de medir. Portanto, são os procedimentos de calibração que permitem avaliar o desempenho metrológico das MM3C, determinar os seus erros e prover informações quantitativas sobre a exatidão e a respectiva incerteza da medição.

Os erros podem ser classificados em sistemáticos, aleatórios e temporais, e podem ser avaliados através de métodos de calibração direta e indireta. A calibração indireta utiliza artefatos padrões como referência, enquanto que a direta utiliza processos matemáticos como os métodos do volume dividido e o de sintetização, para sua avaliação (BURDEKIN, 1981).

2.2.1 - Calibração indireta

A utilização de padrões na calibração de máquinas de medir a três coordenadas surgiu como forma prática e rápida para avaliar o

desempenho de MM3Cs. Conseqüentemente, deu-se o início ao método de calibração indireta. Os padrões utilizados para avaliação de desempenho, tais como esferas e planos, devem ter suas geometrias altamente idealizadas, para reduzir fontes de erros. Devem sempre ter desvios de forma menores que o especificado pela CMM.

O método de calibração consiste em medir as dimensões de um padrão pré-calibrado em determinadas posições e orientações dentro do volume de trabalho. A diferença entre as dimensões do padrão definidas na sua calibração e as obtidas durante a medição pela máquina define o erro da máquina. Porém, o erro obtido desta forma leva em consideração todas as possíveis fontes de erros da máquina, sem oferecer detalhes sobre as mesmas, fornecendo apenas uma idéia geral da exatidão (repetitividade e histerese).

Este método de calibração é indicado para inspeção periódica e pode ser realizada pelo usuário. Sua execução é mais rápida que a calibração direta e seu custo é reduzido (KNAPP et al., 1991; DI GIACOMO, 1986).

➤ **Padrão escalonado**

Consiste em um conjunto de blocos padrão intercalados, dispostos em uma linha reta, com uma dimensão nominal determinada (figura 2.3). Realizada a medição, a diferença entre o resultado e a dimensão nominal pode ser considerada o erro de posição da máquina. E por ser de utilização rápida para a avaliação de MM3Cs, é muito empregado pelos fabricantes.

Figura 2.3- Padrão escalonado (cortesia da UNCC)

➤ **Anel-padrão**

Tem forma geométrica de um círculo com o diâmetro pré-determinado. A sonda, apalpando o círculo em diversos pontos, permite determinar seu diâmetro. A diferença entre o diâmetro obtido e o valor verdadeiro convencional do diâmetro é o erro.

➤ **Barra de esferas**

Consiste em uma barra rígida com duas esferas de precisão conectadas nas suas extremidades e com a distância entre os centros das

mesmas previamente calibrada (figura 2.4). O procedimento é executado medindo-se repetidas vezes a distância entre os centros das esferas, em várias posições e orientações do volume de trabalho. Este método permite informações dos erros sistemáticos e a repetibilidade da máquina. A norma ANSI/ASME B89.1.12M (1997) dá informações necessárias referentes a posições estratégicas, orientações, montagem e medidas dessas barras.

Figura 2.4 - Barra de esferas (cortesia da UNCC)

➤ Placa padrão de esferas

Consiste em um conjunto de esferas-padrões com igual diâmetro nominal, fixas em uma placa em posições pré-determinadas com as distâncias entre seus centros previamente calibradas, (figura 2.5). As distâncias entre os centros das esferas são então medidas com a placa em várias posições, obtendo-se assim o conjunto de erros.

Figura 2.5 - Placa de esferas (cortesia da UNCC)

➤ Placa padrão de cilindros

Consiste em um conjunto de anéis-padrões com igual diâmetro nominal, fixos em uma placa em posições pré-determinadas, com as distâncias entre seus centros previamente calibradas. A medição é executada com a placa em diversas posições no volume de trabalho, e os erros são obtidos com relação ao valor verdadeiro convencional.

➤ Padrão volumétrico tetraédrico

É um padrão constituído por barras acopladas por esferas nos seus vértices formando uma figura tetraédrica (figura 2.6). As distâncias entre os centros das esferas são pré-calibradas. O erro da máquina é determinado comparando-se o valor medido com o valor do padrão.

Figura 2. 6– Padrão Tetraédrico

2.2.2 - Calibração direta

Ao contrário do método anterior, a calibração direta possui um grande poder de diagnóstico e permite a obtenção de uma grande quantidade de informações sobre a MM3C, porém é um processo caro, uma vez que seu procedimento é demorado (KNAPP et al., 1991; DI GIACOMO, 1986).

Este método de calibração tem a vantagem de ser confiável e completo, se comparado ao método de calibração indireta. Com ele é possível determinar os erros em cada um dos eixos preferenciais, que são os 21 erros geométricos, sendo 18 paramétricos -erros individuais (rotacionais nos três eixos, retilineidade e posicionamento)- e 3 erros não-paramétricos (de ortogonalidade entre eixos). Também possibilita a identificação das fontes de erros. Os dados obtidos pela calibração são apropriados para correção dos erros através de programas computacionais.

A calibração direta pode ser dividida em: Método do volume dividido e Método de Sintetização (DI GIACOMO, 1986).

➤ Método do volume dividido

Este método é baseado na medição dos erros de posição de cada um dos eixos coordenados de uma máquina, ao longo de linhas retas, que formam uma rede por todo o volume de trabalho (BURDEKIN et al., 1984).

A distância “real” entre pontos sucessivos é medida usando-se um comprimento padrão como referência, como o interferômetro LASER, por exemplo. As coordenadas “reais” de cada nó da rede, encontradas com relação a um sistema de coordenadas de referência, são comparadas com as coordenadas nominais. Assim, o erro de posição ao longo de um eixo individual é obtido.

➤ Método de sintetização

Neste método os erros geométricos são medidos separadamente. Em seguida, montam-se equações matemáticas que modelam os comportamentos do erro volumétrico. Estas equações podem ser determinadas através de uma análise cinemática de corpo rígido, que estabelece a relação entre a posição da ponta do apalpador com relação a um sistema de coordenadas selecionado como referência, em comparação com outros parâmetros da estrutura da máquina (DI GIACOMO, 1986).

2.3 - INCERTEZA DA MEDIÇÃO EM MM3C

Uma vez obtidas as componentes do erro volumétrico da MM3C, através da calibração, pode-se calcular a incerteza de medição. A determinação da incerteza de medição é importante porque as medidas obtidas são estimativas do resultado e é necessário que se saiba o quanto este resultado aproxima-se do correto (DOIRON & STOUP, 1997). Têm sido desenvolvidos métodos para determinar os limites dentro dos quais um resultado esteja o mais próximo possível do valor correto. Estes limites são definidos pela incerteza dos resultados.

Segundo DOIRON & STOUP (1997), “O cálculo da incerteza de medição pode ser considerado como uma tentativa de definir, em concordância com regras-padrões, os limites “razoáveis” do resultado obtido”.

A incerteza da medição é geralmente expressa como uma faixa de valores em torno do valor medido e centrada simetricamente, como mostra a figura 2.7. Inclui todos os fatores que podem influenciar o resultado, tais como mudança de temperatura ambiente, distorção estrutural devido à carga do objeto que está sendo medido, velocidade e direção de aproximação do apalpador e a força de medição, entre outros (PHILLIPS, 1995).

Figura 2.7 – Incerteza da medição

Muitos resultados de medição, tais como comprimento de um bloco-padrão ou o diâmetro de um círculo, podem ser expressos por um único número. Neste caso, a região da incerteza é unidimensional (figura 2.7). Entretanto, existem resultados de medições que requerem vários valores para especificar seus resultados como um ponto no espaço, cuja localização é especificada pelas coordenadas (x,y,z) . Assim, pode-se dizer que, neste caso, a região sobre o ponto coordenado medido tem incerteza tridimensional, (figura 2.8). Isto pode ser entendido como sendo válido, para as coordenadas de cada ponto medido dentro do volume de medição da MM3C. Assim, cada ponto medido possui uma “nuvem de incerteza” associada a ele.

O tamanho e a forma desta nuvem são definidos pelas fontes de erros da MM3C. Esses erros são ocasionados por: mudanças térmicas ambientais, distorções estruturais devido ao peso da peça, etc.

Figura 2.8 - Nuvem de incerteza

A incerteza da medição não sofre influência apenas dos erros quase estáticos, isto é, aqueles associados à geometria da MM3C, que causam desvios na posição relativa entre o apalpador e a peça, mas também de alguns fatores específicos da medição, entre os quais se incluem os erros dinâmicos, erros do apalpador e os da peça. Assim, a incerteza do ponto coordenado só pode ser completamente determinada até que o usuário especifique todos os detalhes da medição

Estes erros devem ser conhecidos para poderem ser avaliados. A seguir, faremos a classificação dos erros quanto a sua origem, ou seja, se as variáveis estão diretamente ligadas à máquina, são as variáveis dependentes, já se as influências são externas à máquina, as variáveis são independentes.

2.3.1 - Variáveis dependentes da MM3C

As variáveis dependentes, como já citado, são aquelas relacionadas à máquina. O deslocamento da sonda é dependente do movimento do carro que desliza sobre guias. O ideal é que o movimento do carro sobre a guia ocorra sem erro, isto é, não sofra distorção ao longo do

movimento. Na realidade não é o que acontece. Constata-se a existência de movimentos angulares indesejáveis no carro. Esta realidade faz com que haja uma grande quantidade de componentes da máquina como potenciais fontes de erros, tais como:

➤ **Desempeno**

O desempenho serve de apoio para as peças que serão medidas. Portanto, deve possuir elevada rigidez, para que sofra o mínimo possível de deformação elástica devido ao peso da peça. Seu material é granito ou ferro fundido, respeitando uma qualidade de fabricação que permita o mínimo de erro de planicidade, pois este, em conjunto com os erros de forma geométrica e de posição da peça, podem resultar em erro sistemático grande (PAHK, 1991; in PIRATELLI, 1997).

➤ **Guias dos mancais**

O movimento da máquina sobre as guias sofre a influência dos erros de forma dessas guias, o que resulta em erros geométricos segundo os eixos X, Y e Z. Nos tipos construtivos em que os mancais correm sobre o desempenho, são os erros de planicidade do desempenho que geram os erros de movimento.

➤ **Estrutura de suporte da sonda**

O ideal é que a rigidez dos materiais e da estrutura seja a maior possível para que os erros devidos a deformações elásticas nos eixos da máquina, provocadas pela força gravitacional, sejam mínimos. Além do que, esses erros variam de acordo com a posição da sonda no volume de trabalho da MM3C, pois a deformação elástica é diferente para cada posição.

➤ **Escalas de medição**

São as escalas associadas aos eixos X, Y e Z, que dão as coordenadas de um ponto dentro do volume de trabalho. Defeitos nas escalas ou nos sistemas de medição acarretam em erros significativos. Também a diferença de expansão térmica linear entre as escalas, as peças medidas e as guias da estrutura pode levar a erros de medição.

➤ **Sonda de medição**

Os erros de medição relacionados ao sistema de sondagem estão associados às características elétricas da sonda e à cinemática e mecânica da máquina. Estes erros são gerados pelo sistema de sondagem (incluindo o apalpador, a ponta de contato e a cabeça onde é fixada a ponta), pelo sinal elétrico emitido pelo sensor, ao localizar o ponto da superfície da peça congelando a indicação da máquina, e pela estrutura da MM3C que se altera quando o carro se move.

➤ **Programa computacional**

A função dos programas computacionais é a de comparar os pontos medidos no mensurando com um padrão virtual e oferecer um resultado na tela do computador ou em uma impressora. O grau de concordância do resultado da medição vai depender das aproximações do cálculo dos elementos da geometria adotada (padrão virtual), empregado no programa computacional.

2.3.2 - Variáveis independentes da MM3C

O bom desempenho de uma MM3C requer que esta esteja instalada de forma apropriada e em local adequado para a sua utilização.

Estas condições, que são definidas pelos fabricantes, se referem a instalação e variáveis ambientais. A variabilidade de fatores ambientais causam os erros de medição: são variáveis denominadas independentes. As principais são:

➤ **Temperatura**

O controle da temperatura durante as medições é muito importante. A sua variação pode causar alterações dimensionais nas escalas, na peça e na estrutura da máquina. Estas alterações são distintas nas diferentes partes da máquina e sua estabilização requer tempos diferentes (KUNZMANN, 1988).

➤ **Vibração**

O local para a instalação da máquina de medir por coordenadas deve ser cuidadosamente escolhido. Vibrações no local ou arredores podem atingir a máquina e, conseqüentemente, afetar o resultado das medições.

➤ **Energia elétrica**

O fornecimento de energia elétrica deve ser contínuo e uniforme. Assim como deve haver um controle para manter os níveis de tensão, frequência e ruído proveniente, da rede elétrica. A sobrecarga no sistema pode ser aliviada através do aterramento (ANSI/ASME B89.4.1, 1995).

➤ **Ar comprimido**

O ar comprimido deve ser fornecido a uma pressão e temperatura constantes e livre de impurezas como poeira, óleo ou água.

Estes cuidados podem evitar o desgastes dos mancais aerostáticos, que necessitam deste ar para seu funcionamento (ANSI/ASME B89.4.1, 1995).

➡ **Peça**

O acabamento, as dimensões, a posição dentro do volume de trabalho e o peso podem levar a erros indesejáveis. Quanto ao acabamento, pode-se observar erro de forma, rugosidade superficial e rebarbas de fabricação. Quanto as dimensões, peças longas com pouca rigidez, que além da posição a medição deve ser observada para que o seu peso seja bem distribuído sobre o desempenho e a forma da peça não sofra modificações. O peso deve respeitar o limite máximo especificado, para não provocar distorções elásticas na estrutura da máquina.

CAPÍTULO III

BASES TEÓRICAS SOBRE: ERROS DE MEDIÇÃO, INCERTEZA DE MEDIÇÃO E ESTATÍSTICA FUNDAMENTAL

Este capítulo trata da definição e dos possíveis tipos de erros que podem ocorrer em uma medição. Apresenta ainda, as ferramentas estatísticas utilizadas na análise desses erros e no cálculo da incerteza de medição; são também abordados a definição da incerteza de medição, o método de cálculo e a classificação de incertezas proposta pelo “Guia para Expressão da Incerteza de Medição (1998) ”.

3.1 – ERROS DE MEDIÇÃO

Toda medição está sujeita a influências que dão origem a erros que modificam seu resultado. O vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (INMETRO, 1995), define erro de

medição como sendo o valor do resultado de uma medição (V_m), menos um valor verdadeiro do mensurando (V_v), equação 3.1.

$$\text{Erro} = \varepsilon = V_m - V_v \quad (3.1)$$

Porém, o erro não pode ser calculado exatamente, a menos que seja conhecido o valor verdadeiro da quantidade que está sendo medida. O valor verdadeiro de uma grandeza física só pode ser conhecido com a realização da medição. Devido às influências dos erros ao valor verdadeiro, deve-se, por isso, associar à medição uma declaração de incerteza.

Quanto às MM3Cs, pode-se dizer que elas estão, como todo instrumento de medição, sujeitas a erros. E estes, por sua vez, acabam provocando uma diferença no resultado final da grandeza analisada. Os erros nas medições a três coordenadas são aqueles relacionados à máquina, que afetam o seu sistema de medição, e os relacionados às condições de operação, instalação e variáveis ambientais no local de trabalho.

Segundo BURDEKIN (1981), “Os fatores que afetam a exatidão geométrica da MMC são: a) Os erros de forma. b) Os erros no sistema de coordenadas. c) Os erros termicamente induzidos devido às condições do ambiente. d) As deformações causadas pelo peso da estrutura e/ou do mensurando”.

Como o erro não pode ser determinado por ser um conceito idealizado, pode-se, apenas, estimar a probabilidade de um erro de medição exceder o valor medido em relação a outro específico dentro de uma certa faixa. Esta estimativa pode ser feita com auxílio de ferramentas estatísticas quando um número relativamente grande de medições é realizado.

Identificar as possíveis fontes de erro deve ser o primeiro passo para a identificação do erro global de medição. As fontes dos erros podem

variar de experimento para experimento, e um único experimento pode incluir várias fontes de influência, podendo ser classificadas em sistemáticas ou aleatórias conforme discussão a seguir.

➤ **Erros aleatórios**

Os erros aleatórios são diferentes para cada medição sucessiva, mas são caracterizados por um valor médio. Se uma série de medições é feita com um número suficiente de dados, os erros aleatórios se dispersam em torno de seu valor médio. Assim, pode-se usar análise estatística para quantificar a dispersão através do desvio padrão dos valores medidos e calcular o valor médio. Estes dois parâmetros são fundamentais para a determinação do valor verdadeiro da medida, assim como seu intervalo de validade (SLOCUM, 1992).

➤ **Erros sistemáticos**

Os erros sistemáticos nem sempre podem ser eliminados; somente depois de identificados e quantificados podem ser compensados, pois se repetem a cada medição de maneira previsível. Assim, ao se realizar um número considerável de medições na mesma peça e sob as mesmas condições, podem-se observar desvios dos valores médios obtidos com relação ao verdadeiro.

3.2- ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS EXPERIMENTAIS

Através do uso de técnicas estatísticas é possível organizar dados experimentais, obtidos durante a avaliação de uma peça ou mesmo da MM3C e, assim, analisá-los e interpretá-los, gerando relatórios relativos ao objetivo das medições.

➤ Conceitos básicos sobre estatística

A citação de alguns conceitos básicos usados em estatística, e empregados no presente trabalho, é necessária para facilitar a análise estatística dos dados experimentais, tais como: *Probabilidade* (um número associado a um evento, destinado a medir a sua possibilidade de ocorrência em um dado intervalo); *População* (a partição do conjunto de observações de um dado evento ou fenômeno, cuja quantidade deve ser muito grande ou mesmo infinita); *Amostra* (um sub-conjunto extraído, aleatoriamente, do conjunto ou da população dos eventos sob análise); *Variável* (nome dado à característica associada aos elementos da população).

Outro ponto importante é a análise das variáveis quanto à sua dependência mútua ou correlação. A equação 3.2, por exemplo, fornece o coeficiente de correlação linear entre duas variáveis x e y , de uma amostra com n elementos. Este coeficiente de correlação é muito útil na análise dos dados, porque ele fornece uma medida do grau de dependência entre variáveis.

Caso haja uma forte correlação entre duas variáveis, e sendo uma delas conhecida, pode-se fazer a previsão da outra.

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3.2)$$

Na figura 3.1, a ordenada dos pontos da curva de probabilidade, definida como função densidade, representa a frequência de ocorrência de um dado evento. A curva $f(x)$ desenhada representa a densidade de probabilidade. Assim, a área sob a curva define a probabilidade de uma dada variável aleatória x assumir valores no intervalo $[a,b]$. A integral da função densidade, de menos infinito a mais infinito, é igual à unidade, isto é, $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) = 1$, (DIETRICH, 1973).

Figura 3.1 – Função de densidade de probabilidade

➤ Tipos de distribuição

➤➤ Distribuição Normal

Função de *distribuição Gaussiana, ou Normal*, é uma das funções de distribuição que se destaca entre as várias existentes. Esta representa um modelo para uma série de dados experimentais em diversas áreas do conhecimento humano (MENDENHALL, 1988). É definida pela equação (3.3), o termo μ corresponde à média e termo σ , ao desvio padrão da população de tamanho n .

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad -\infty < x < \infty \quad (3.3)$$

Desvio padrão e média são parâmetros que devem satisfazer as condições: $-\infty < \mu < \infty$ e $\sigma > 0$, e são caracterizados pelas equação (3.4):

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (3.4)$$

A curva de distribuição Gaussiana, figura 3.2, é simétrica em relação a μ e tem o aspecto de um sino.

Figura 3.2 – Curva de distribuição normal de probabilidade

A área definida sob a curva, entre dois pontos quaisquer do eixo das abcissas, corresponde à probabilidade de se encontrarem os valores entre estes dois pontos. O intervalo correspondente $\mu \pm \sigma$ equivale a uma probabilidade de ocorrência de 68,27%, o intervalo $\mu \pm 2\sigma$ equivale a 95,45% e o intervalo $\mu \pm 3\sigma$ equivale a 99,73% (DIETRICH, 1973). A distribuição Normal, conforme mostra a figura 3.3, tem o fator σ como parâmetro, o qual caracteriza o formato da curva. Quanto maior o valor de σ , maior será o achatamento da curva.

Figura 3.3 – Curvas Gaussianas

Os parâmetros populacionais μ e σ podem ser estimados com base nos parâmetros amostrais e na distribuição de probabilidade dos valores da amostra. A média $\bar{x}$ e o desvio padrão s podem ser determinados através das equações 3.5.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.5)$$

onde:

$n \Rightarrow$ tamanho da mostra

$n - 1 \Rightarrow$ grau de liberdade da amostra

A equação geral do grau de liberdade é dada pela expressão 3.6.

$$v = n - k \quad (3.6)$$

Onde:

$v \Rightarrow$ graus de liberdade

$n \Rightarrow$ número de observações da amostra

$k \Rightarrow$ número de parâmetros estimados para a análise das observações amostrais

➡➡ Distribuição retangular

A equação 3.7 mostra a função densidade de uma distribuição de probabilidade Uniforme ou Retangular, e a figura 3.4 mostra a sua representação gráfica.

$$f(x_i) \begin{cases} = \frac{1}{a_+ - a_-} & \text{para } a_- \leq x_i \leq a_+ \\ = 0 & \text{fora do intervalo} \end{cases} \quad (3.7)$$

Figura 3.4 - Distribuição uniforme ou retangular

A estimativa de $\bar{x}$ [$E(X)$], no caso de uma distribuição retangular é dada em função da função densidade por:

$$\bar{x} = \mu = E(X_i) = \int_{-\infty}^{\infty} x_i f(x_i) dx = \int_{a_-}^{a_+} x_i \left(\frac{1}{a_+ - a_-} \right) dx = \frac{a_- + a_+}{2} \quad (3.8)$$

A variância associada $V(X)$ é dada, de forma geral, pela seguinte expressão:

$$s^2 = V(X_i) = E(X_i - \mu)^2 = E(X_i)^2 - \mu^2 \quad (3.9)$$

onde:

$$E(X_i)^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x_i^2 f(x_i) dx = \int_{a_-}^{a_+} x_i^2 \left(\frac{1}{a_+ - a_-} \right) dx = \frac{a_+^2 + a_- a_+ + a_-^2}{3} \quad (3.10)$$

Substituindo 3.8 e 3.10 em 3.9 tem-se:

$$s^2 = \frac{1}{12} (a_+ - a_-)^2 \quad (3.11)$$

Se a diferença entre os limites, $a_+ - a_-$, é designada por $2a$, então a equação anterior torna-se:

$$s^2 = \frac{a^2}{3} \quad s = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3.12)$$

➡➡ Distribuição triangular

Diferentemente da distribuição retangular, a distribuição triangular apresenta um valor central com maior probabilidade de ocorrência e é derivada de uma distribuição trapezoidal, sendo representada por um trapézio isóceles, conforme figura 3.5, com base de largura $a_+ - a_- = 2a$, e um topo de largura $2a\beta$, onde $0 \leq \beta \leq 1$. À medida que β se aproxima de 1, esta distribuição se aproxima da distribuição retangular, enquanto para $\beta=0$ torna-se uma distribuição triangular.

Assumindo a distribuição trapezoidal para X_i , tem-se que a esperança de X_i é $x_i = (a + a_+)/6$ e a variância associada é representada pela equação 3.13.

$$u^2(x_i) = a^2(1 + \beta^2)/6 \quad (3.13)$$

No caso de distribuição triangular com $\beta = 0$ a variância é obtida através da equação 3.14.

$$s^2(x_i) = a^2 / 6 \quad (3.14)$$

Figura 3.5 - Distribuição triangular

3.3 – TESTE DE ADERÊNCIA

O comportamento de dados experimentais, tais como forma da distribuição, localização da média, dispersão e tendências em torno do valor médio, pode ser analisado através da construção de histogramas. Deve-se provar a hipótese de que os dados experimentais estão distribuídos normalmente, antes de prosseguir com outra técnica estatística. Uma forma de provar as hipóteses é utilizando o *teste do Qui-quadrado* (χ^2). Para maior facilidade na aplicação e interpretação, pode-se

realizar o teste de aderência, construindo um gráfico de probabilidades. Na abscissa são colocados os valores medidos, e as frequências acumuladas são colocadas na ordenada. A escala das ordenadas é ajustada de tal forma que, se a distribuição acumulada for uma distribuição normal, a curva se aproximará de uma linha reta. (PIRATELLI, 1997).

O teste Qui-quadrado é aplicado quando se deseja quantificar a aproximação existente entre uma distribuição empírica e a distribuição teórica, por exemplo, uma Normal.

Análise de variância é outra técnica estatística que pode ser aplicada no caso de testes que mostrem ausência de normalidade.

3.4 - INCERTEZA DA MEDIÇÃO

O resultado de uma medição deve proporcionar segurança para quem o utiliza, portanto, deve estar acompanhado do valor da incerteza, bem como do nível de confiança atribuído ao resultado. Entretanto, sempre restará dúvida sobre a validade do resultado de uma medição, chamada de Incerteza da Medição, e dada por uma expressão com vários graus de credibilidade (nível de confiança) que podem ser atribuídos ao objeto medido (INMETRO, 1998).

Embora os valores exatos do erro no resultado de uma medição possam ser desconhecidos, as incertezas associadas aos efeitos aleatórios e sistemáticos, que contribuem para o erro, podem ser avaliadas. Porém, ao contrário do que se possa imaginar, a incerteza de um resultado de medição não nos garante a exatidão do mesmo. Portanto, mesmo que a incerteza avaliada seja pequena, não se pode afirmar com garantia que o erro no resultado da medição seja também pequeno.

Existem muitas fontes que contribuem para a incerteza de uma medição, entre elas: definição incompleta do mensurando; realização imperfeita da definição do mensurando; amostragem não representativa amostra; conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais

sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais; erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos; resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade; valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência; valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados; aproximação e suposição incorporadas ao método e procedimento de medição; variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas (INMETRO,1995; INMETRO,1998).

3.4.1 – Incerteza padronizada do tipo A e do tipo B

A incerteza da medição é, convencionalmente, expressa como uma faixa de valores distribuídos simetricamente em torno do valor, como mostra a figura 2.7. Inclui todos os fatores que influenciam o resultado, tais como mudança de temperatura ambiente, distorção estrutural devido à carga do mensurando, uso e dano causado à estrutura da máquina, velocidade e direção de aproximação do apalpador e a força de medição, entre outros (PHILLIPS, 1995).

A incerteza de um resultado de medição geralmente consiste de vários componentes que podem ser agrupados em duas categorias de acordo com o método utilizado para estimar seu valor numérico. A recomendação INMETRO (1998), sobre declaração de incerteza sugere o agrupamento das incertezas em duas categorias, “A” e “B”, dependendo do seu método de avaliação. Segundo proposta do “Comitê International des Poids et Mesures” (CIPM), ambos os tipos de avaliação estão fundamentados nas distribuições de probabilidades e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados pela variância (u^2) ou pelo desvio padrão (u), aqui chamada *incerteza padronizada*. O desvio padrão é utilizado para caracterizar a *Incerteza Padronizada do Tipo A*.

As incertezas do tipo B são determinadas a partir de informações acessórias e externas ao processo de medição. Estas informações podem ser obtidas de resultados de medições similares anteriores; experiência ou conhecimento do comportamento do instrumento; dados do fabricante, fornecidos por certificados de calibração; referências de manuais de instrução, entre outras.

São exemplos deste tipo de incerteza a influência: do gradiente de temperatura verificado durante a medição; do afastamento da temperatura ambiente em relação à temperatura de referência de 20°C; do tipo do indicador (analógico ou digital); da instabilidade na rede elétrica; da paralaxe; incerteza do padrão; da instabilidade do padrão; dos erros geométricos; das deformações mecânicas; da histerese; da estabilidade temporal.

➡ **Incerteza padronizada do tipo A**

A incerteza do tipo A é determinada a partir de uma série de medições repetidas, usando-se técnicas estatísticas e assumindo uma distribuição normal, através do desvio padrão.

Na maioria dos casos, a média aritmética ou média $\bar{x}$ das n observações independentes, equação 3.15, é a melhor estimativa disponível da esperança ou valor esperado de uma grandeza x , que varia aleatoriamente e para a qual n observações independentes x_i foram obtidas sob as mesmas condições de medição.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.15)$$

Assim, a média $\bar{x}$ dada pela equação 3.16, é usada como estimativa da entrada x_i .

Sabendo que as observações individuais x_i diferem em valor devido a variações aleatórias, a variância experimental das observações, que estima a variância s^2 da distribuição de probabilidade de x , é dada pela equação 3.16.

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.16)$$

A dispersão dos valores x_i observada em torno de sua média $\bar{x}$, e caracterizada pela raiz quadrada positiva da variância $s^2(x_i)$ é denominada desvio padrão experimental.

Assim, pode-se dizer que a variância da média e o desvio padrão experimental da média, que é a incerteza do tipo A, são dados pelas equações 3.17 e 3.18, respectivamente:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} \quad (3.17)$$

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (3.18)$$

Qualquer um dos parâmetros das equações 3.17 ou 3.18 indica o quanto $\bar{x}$ estima bem a esperança $\mu(x)$, e qualquer um dentre eles pode ser usado como medida da incerteza de $\bar{x}$.

➤ Incerteza padronizada tipo B

A incerteza padronizada do tipo B, que é estimada sem o uso de técnicas estatísticas, possui características de um desvio padrão. É obtida a partir de julgamento científico, fundamentado na experiência do observador e em quaisquer informações relevantes disponíveis (NIST

TECHNICAL NOTE 1297,1994). Estas informações podem ser dados de medições prévias; especificações de fabricantes; incerteza relacionada a dados de referência extraídos de manuais; dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados, entre outras.

O Guia para Expressão da Incerteza de Medição, recomenda que no relato da incerteza de medição seja dado o nível de confiança. Nível este que estabelece o intervalo em torno do resultado da medição, dentro do qual estima-se encontrar o melhor valor para o mensurando. Os níveis de confiança mais comuns, em metrologia, são 90%, 95% ou 99%, (o mais usado é 95%). Quando a incerteza do tipo B tiver uma *distribuição Normal*, para o cálculo da incerteza padronizada devem-se usar os coeficientes de abrangência 1,64, 1,96 e 2,58, respectivamente. Em outros casos, nos quais, só é possível estimar as fronteiras limites superior (a_+) e inferior (a_-) do intervalo em que se espera encontrar o valor de X_i , e não havendo conhecimento específico sobre os possíveis valores de X_i dentro do intervalo, pode-se assumir uma *distribuição uniforme ou retangular*.

Ao se adotar a distribuição retangular, fica implícito que X_i possui qualquer valor entre os limites, com probabilidade zero de estar fora deles. Há casos, porém, em que é mais realista esperar que valores perto dos limites sejam menos prováveis do que os que estejam perto do ponto médio. Neste caso, é razoável substituir a distribuição retangular simétrica por uma distribuição trapezoidal simétrica, e no limite uma triangular.

A incerteza padronização do tipo B, com distribuição retangular, é : $a/\sqrt{3}$, enquanto que para a distribuição triangular é: $a/\sqrt{6}$.

3.4.2 – Incerteza padrão combinada (u_c)

A incerteza padrão combinada é o resultado da combinação da incerteza do tipo A, obtida por meio do desvio padrão (dispersão das

medidas) e a incerteza total do tipo B. A quantidade que está sendo medida é conhecida como mensurando y , e tem n variáveis diferentes x_i que são fontes de incerteza em potencial do tipo A e do tipo B. A medição de y é uma estimativa do valor ideal Y de uma medição específica, e pode ser descrita pela equação 3.19. A incerteza padrão combinada $u_c(y)$ desta medição, usando o melhor valor estimado da fonte de incerteza associada com cada x_i , é dada pela raiz quadrada positiva da variância u_c^2 , descrita pela equação (3.20). A incerteza padrão combinada u_c é a raiz quadrada da somatória das variâncias $u^2(x_i)$ de cada fonte de incerteza individual, caracterizada pela multiplicação do quadrado da quantidade conhecida como coeficiente de sensibilidade $(\partial f / \partial x_i)$, que é necessário para uniformizar as unidades das diferentes incertezas da medição.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.19)$$

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3.20)$$

onde:

$u_c^2(x_i) \Rightarrow$ é a variância de cada incerteza

$x_i, x_j (i \neq j) \Rightarrow$ correlação existente entre as duas incertezas.

Nota:

Se as estimativas x_i, x_j são independentes entre si, o coeficiente de correlação é igual a zero e, portanto o segundo termo da equação que se refere às grandezas correlacionadas desaparece.

3.4.3 - Incerteza expandida e intervalo de confiança

O conceito de incerteza da medição é incompleto se não estiver associado a um nível de confiança.

A incerteza expandida (U) é definida como sendo um intervalo em torno do resultado da medição com um dado nível de confiança, caracterizada pela incerteza padrão combinada multiplicada pelo coeficiente de abrangência, conforme equação 3.21, (BOSCH, 1995)

$$U = k.u_c \quad (3.21)$$

e assim, o resultado da medição pode ser descrito pela equação 3.22:

$$Y = y \pm U \quad (3.22)$$

onde:

$Y \Rightarrow$ mensurando

$U \Rightarrow$ incerteza padrão expandida

$p \Rightarrow$ nível de confiança

$y \Rightarrow$ resultado da medição

$k \Rightarrow$ fator de abrangência (fator numérico usado como um multiplicador da incerteza padronizada combinada de modo a obter uma incerteza expandida. Admite-se o valor 2 para um intervalo de confiança de 95% ou 3 para intervalo com 99,7% de probabilidade (MONTGOMERY et al., 1994).

Este intervalo pode ser expresso por:

$$Y - U \leq y \leq Y + U \quad (3.23)$$

Na descrição detalhada da incerteza, deve constar uma lista completa de seus componentes, indicando a distribuição de probabilidade e o valor numérico associado (INMETRO, 1998).

A figura 3.6 mostra a relação entre o coeficiente de abrangência e a incerteza da medição.

Figura 3.6 – nível de confiança e a diferença entre a incerteza combinada e a expandida.

CAPÍTULO IV

UMA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA DAS MEDIÇÕES A TRÊS COORDENADAS

Como já mencionado este trabalho objetiva apresentar uma metodologia para o cálculo da incerteza de medição de uma máquina de medir a três coordenadas(MM3C), baseada nas instruções do “Guia para a expressão da incerteza de medição” (INMETRO,1998). O desenvolvimento desta metodologia envolve a técnica de modelagem matemática para a elaboração das equações de sintetização de cada componente do erro volumétrico. O método direto de calibração foi utilizado para a medição dos 21 erros geométricos individualmente, os quais influenciam no erro volumétrico da MM3C. E programa computacional foi desenvolvido para auxiliar no cálculo da incerteza das componentes do erro volumétrico em cada ponto do volume de trabalho da MM3C.

Para um melhor entendimento das etapas envolvidas na aplicação da metodologia proposta, foi sugerida uma subdivisão do tema em cinco etapas: modelagem matemática, através do método da análise

geométrica da estrutura da máquina; calibração da máquina estudada, através do método de calibração direta; determinação dos parâmetros que interferem na incerteza de medição da MM3C; cálculo da incerteza dos 21 erros geométricos, e cálculo da incerteza das componentes do erro volumétrico em um determinado ponto do volume de trabalho da MM3C.

4.1 – MODELAGEM MATEMÁTICA

Dentre as técnicas de modelagem existentes, a escolhida foi aquela que melhor se aplica a este trabalho. Assim, optou-se pela utilização da técnica da análise geométrica, porque esta permite visualizar os efeitos de primeira e segunda ordem dos erros geométricos sobre a posição real do apalpador.

Desta análise geométrica, obtiveram-se as equações de sintetização das componentes volumétricas E_x , E_y e E_z , da MM3C.

Ainda, através destas equações de sintetização, também é possível determinar quanto o erro de cada componente volumétrica influencia na posição no volume de trabalho da máquina.

4.2 – CALIBRAÇÃO DA MM3C

A calibração da MM3C, pelo método direto, permite a determinação dos 21 erros geométricos em pontos do volume de trabalho da máquina.

Durante o procedimento de calibração foram verificadas as influências de variáveis como temperatura, umidade, resolução do laser na incerteza dos valores dos erros obtidos, entre outras.

Os dados da calibração serão apresentados em gráficos e utilizados para o cálculo da incerteza das componentes do erro volumétrico E_X , E_Y e E_Z .

4.3 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA INCERTEZA

Os erros avaliados através da calibração da máquina também possuem uma incerteza nos seus resultados. Assim, analisou-se o processo de medição dos 21 erros geométricos. Desta análise, extraíram-se todas as grandezas contribuintes da incerteza. O mesmo foi feito para a medição dos braços fixos da máquina. A partir destas grandezas, foram descritos os parâmetros da incerteza, apresentados em forma de equações matemáticas, que permitem o cálculo da incerteza de cada erro individual, considerando as influências observadas.

Também foi descrita uma equação para a incerteza na medição dos braços fixos da MM3C (braços de Abbè), os quais também estão presentes nas equações de sintetização.

4.4 – CÁLCULO DA INCERTEZA DOS ERROS GEOMÉTRICOS AVALIADOS PELA CALIBRAÇÃO E DOS BRAÇOS DE ABBÈ

De posse das equações que descrevem a incerteza na calibração dos erros individuais da MM3C e dos braços fixos, pôde-se partir para o cálculo da incerteza padrão combinada destes erros e braços medidos, seguindo a proposta apresentada pelo “Guia para expressão da incerteza de medição, (1998) ”.

Aplicou-se as equações matemáticas que descrevem a incerteza dos braços medidos e dos erros, avaliados na calibração, na equação da

incerteza padrão combinada u_c (3.20), a fim de combinar apropriadamente as incertezas padrão das grandezas avaliadas, que compõem estas equações. Depois se calculou a incerteza expandida (U), destes erros e braços fixos, que fornece o intervalo dentro do qual se espera encontrar o valor verdadeiro da medição.

4.5 - CÁLCULO DA INCERTEZA DAS COMPONENTES DO ERRO VOLUMÉTRICO DA MM3C

Para determinar a incerteza do erro de cada uma das componentes volumétricas E_x , E_y e E_z , da MM3C, nas três equações de sintetização determinadas pela análise geométrica, as grandezas que representam os 21 erros geométricos e os braços fixos foram substituídas pelas equações que representam suas respectivas incertezas.

Assim, tiveram origem as equações que vão permitir o cálculo da incerteza padrão combinada (u_c) do erro de cada uma das componentes volumétricas da MM3C.

Quanto aos valores numéricos das grandezas que compõem estas equações, foram obtidos pela calibração da máquina e pela medição dos braços fixos da máquina.

Como as equações obtidas são razoavelmente grandes seu desenvolvimento será apresentado através de tabelas, tanto para facilitar a resolução do cálculo da incerteza, quanto para tornar mais clara a apresentação,

Finalmente, a incerteza expandida das componentes do erro volumétrico foi obtida com uma confiança de probabilidade de 95%.

CAPÍTULO V

DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo está descrita a metodologia proposta para o levantamento dos dados necessários para o cálculo da incerteza das medições em uma máquina de medir a três coordenadas (MM3C). Para tanto, este capítulo está dividido em duas partes: uma experimental, que apresenta o procedimento utilizado na calibração direta dos erros geométricos, e outra, teórica, apresentando o equacionamento das componentes do erro volumétrico, por meio de modelagem matemática.

A MM3C utilizada é de fabricação Brown & Sharpe, modelo “Micro Validator” do tipo Ponte Móvel, conforme figura 5.1, que está disponível no laboratório de metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos.

A máquina em questão pode ser considerada de porte pequeno, pois possui um volume de trabalho de 450 x 600 x 380mm. É de peso

moderado e adequada para uso em bancada. É composta por três eixos “X”, “Y” e “Z”, que são suportados por mancais aerostáticos, alimentados por ar comprimido. Sua base e coluna são de alumínio fundido. Sobre a base está um deslpeno de granito, montado sobre esferas e suportes em “V”. O conjunto é apoiado sobre 3 isoladores- niveladores. Uma guia está montada na base, sobre a qual desliza a ponte gerando o movimento do eixo “Y”. A ponte é suportada por 2 colunas sobre as quais está montado o eixo “X”. E , sobre o carro do eixo “X” está montado o cabeçote, que define o movimento vertical do eixo “Z”. O sistema de indicação se baseia no princípio de formação das franjas de Moiré, e possui um sistema optoeletrônico composto de emissor e receptor, que transformam a contagem de franjas em deslocamento linear.

Figura 5.1 – MM3C tipo Ponte Móvel

Possui, ainda, um microcomputador dedicado que através de programas computacionais desenvolvidos, auxilia a máquina em suas funções, para calcular a dimensão ou forma geométrica de um dado objeto. Os programas de cálculo podem ser acionados, diretamente a partir da tela, através de uma caneta óptica que permite a interação entre o computador e o usuário.

5.1 – CALIBRAÇÃO DA MM3C

Sabe-se que a estrutura de uma máquina de medir a três coordenadas é composta de 3 eixos lineares e ortogonais entre si, que simulam a geometria de um sistema de coordenadas cartesianas. A proposta deste sistema é prover movimentos puros e unidirecionais ao longo dos três eixos. No entanto, os carros não se movem exatamente segundo estes eixos em uma única direção; eles se deslocam com movimentos irregulares.

Uma descrição destes movimentos irregulares pode ser feita utilizando-se dos conceitos da cinemática do corpo rígido, que especificam a necessidade de seis graus de liberdade para a localização de um corpo no espaço. Estes graus de liberdade estão associados a três movimentos de translação e a três movimentos rotacionais ("roll", "pitch" e "yaw"), conforme mostrado na figura 5.2.

Quando o carro se movimenta na direção do eixo x , permanecendo as coordenadas y e z teoricamente constantes, movimentos indesejáveis de translação e rotação ocorrem. Sabendo-se que estes movimentos indesejáveis são três de translação e três de rotação para cada eixo de movimentação, donde se conclui que podem ser gerados 18 erros ditos paramétricos, durante o movimento da máquina. Lembrando que ainda existem os erros de ortogonalidade entre os eixos "X", "Y" e "Z", tem-se um total de 21 erros geométricos que influenciam na localização do

apalpador da MM3C. Através do método de calibração direta, é possível determinar individualmente esses 21 erros geométricos.

figura 5.2 – Erros mecânicos em modelo de corpo rígido

A seleção dos instrumentos que serão utilizados na calibração é fator primordial para a eficácia na determinação dos erros geométricos de uma MM3C. Portanto os parágrafos que se seguem referem-se a esta seleção.

5.1.1 – INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA NA CALIBRAÇÃO

Como já mencionado, a calibração dos erros geométricos requer instrumentação apropriada para sua realização, para que se obtenham resultados satisfatórios, e também para facilitar os testes e minimizar o tempo de ensaios. A escolha dos instrumentos deve seguir os seguintes critérios: ser de uso flexível em todo o volume de trabalho; ter erros de medição com faixa de 5 a 10 vezes menor que os erros da MM3C; cobrir

toda a faixa de erros esperada e atender às faixas de operação dos eixos da MM3C.

Dentre os instrumentos disponíveis no laboratório e que atendam aos critérios acima mencionados, foram selecionados os seguintes:

➤ **Interferômetro a LASER**

O conjunto que compõe o Sistema Interferométrico a LASER é composto pelo canhão de laser, uma unidade de processamento eletrônico e um conjunto óptico o qual deve ser escolhido de acordo como o tipo de medida a ser realizada.

O conjunto óptico é composto por interferômetro, prisma de Wollaston, espelhos refletores planos e angulares. Para cada tipo de medição existe um princípio básico. A seguir serão descritos, sucintamente, aqueles utilizados nas calibrações da MM3C.

➤➤ **Princípio interferométrico para medição de retilidade**

O princípio de medição de retilidade está esquematizado na figura 5.3, em que um feixe de luz composto por duas frequências " f_1 " e " f_2 " que ao atravessar o "Prisma de Wollaston", separa-se percorrendo caminhos diferentes até as frequências atingirem o espelho refletor, que aos reflete de volta ao prisma, onde são recombinadas. Devido ao deslocamento perpendicular relativo entre o prisma e o movimento do espelho, ocorrem variações de frequências " Δf_1 " e " Δf_2 ", que são monitorados por uma fotocélula, processadas eletronicamente e convertidas em deslocamentos transversais à direção de movimento do eixo.

Figura 5.3 - Princípio básico interferométrico para medição de erros de retilidade

⇒ Princípio interferométrico para medição de posição

A determinação da posição baseia-se no seguinte princípio: um feixe de luz emitido pelo canhão com frequências " f_1 " e " f_2 ", ao atingir o interferômetro é separado em dois feixes; o feixe " f_2 " (feixe de referência) é refletido de volta para o canhão, enquanto que o feixe " f_1 " segue até atingir o espelho refletor móvel que o reflete ao interferômetro onde são recombinados os feixes, que seguem até atingir a fotocélula no canhão LASER. Tendo as frequências " f_1 " e " f_2 " percorrido distâncias diferentes, o feixe que retorna apresenta uma diferença de frequência " Δf_1 ". Esta diferença é que representa o deslocamento relativo entre o interferômetro e o refletor. A figura 5.4 apresenta um esquema de montagem para medições de posição de eixos paralelos ao feixe do LASER.

Figura 5.4 - Princípio básico interferométrico para medição de erro de posição, com eixo a medir paralelo ao feixe do laser

A figura 5.5 mostra um esquema para medições de posição de eixos perpendiculares ao canhão.

Figura 5.5 - Princípio básico Interferométrico para medição de erro de posição, com eixo a medir perpendicular ao feixe do laser

🔗 Princípio interferométrico de medição angular

O feixe de luz de frequência " f_1 " e " f_2 " emitido pelo laser, ao atravessar o interferômetro angular é dividido em dois, conforme pode ser visto na figura 5.6 e, ao atingirem o espelho refletor angular, retornam ao interferômetro onde são recombinados. Devido ao movimento angular relativo entre o interferômetro e os espelhos refletores, ocorre uma variação de frequência " Δf_1 " e " Δf_2 ", que é captada pela fotocélula no canhão, onde é processada eletronicamente e convertida em deslocamentos angulares.

Figura 5.6 - Princípio básico interferométrico para medição de erros angulares

➤ Nível eletrônico

O nível eletrônico foi utilizado para a medição do erro angular “Roll”. Seu princípio de funcionamento é mostrado na figura 5.7. De acordo com a inclinação sofrida pelo aparelho, um sistema eletrônico detecta o sinal emitido por um pêndulo existente no interior da unidade de sensoreamento. Este sinal, proporcional à inclinação, é processado e apresentado no indicador analógico pelo deslocamento do ponteiro ou por um valor no indicador digital.

Figura 5.7 – Princípio de medição do nível eletrônico

➤ Esquadro de granito e comparador eletrônico

O esquadro de granito é utilizado juntamente com um comparador eletrônico do tipo LVDT. O comparador eletrônico, normalmente, é acoplado à parte móvel da máquina, comparando-se a trajetória descrita pela ponta do comparador e o eixo definido pela superfície de referência do esquadro, ver figura 5.8. A irregularidade entre

a trajetória e a superfície de referência é medida pelo comparador e indicada na unidade eletrônica.

Figura 5.8 – Montagem do esquadro de granito e nível eletrônico para medição de erros de ortogonalidade

5.1.2 – Determinação dos erros geométricos na MM3C

➤ Erro de posição

Erro de posição, também chamado de erro de escala, representa a diferença entre a indicação da escala e a posição real (valor verdadeiro). A violação do princípio Abbè (“Erro de Abbè”, apêndice F) pode ter grande influência neste tipo de erro, e essa influência deve ser reduzida ao máximo possível. A tabela 5.1 apresenta os detalhes a serem observados para a montagem da calibração, com a finalidade de determinar os erros de posição dos eixos “X”, “Y” e “Z”.

Tabela 5.1 - Observações na realização da calibração

OBSERVAÇÕES	EIXO "X"	EIXO "Y"	EIXO "Z"
Posição do feixe do laser	Perpendicular ao eixo	paralelo ao eixo	perpendicular ao eixo
Eixos que permanecem estáticos durante o teste	"Y" e "Z"	"X" e "Z"	"X" e "Y"
Para minimizar o erro de Abbè	O sistema foi montado na parte superior da máquina	O sistema foi montado na parte inferior à esquerda da máquina	O sistema pode ser montado em qualquer posição, visto que neste caso o erro Abbè é desprezível.

As figuras 5.9, 5.10 e 5.11, mostram a montagem para a determinação dos erros de posição na direção dos eixos "X", "Y" e "Z".

Figura 5.9 – Medição do erro de posição do eixo "X"

Figura 5.10 – Medição do erro de posição do eixo “Y”

Figura 5.11– Medição do erro de posição d eixo “Z”

➤ Erro de retilineidade

A norma VDI/VDE 2617/ Part 3 (1989) define erro de retilineidade como: “Quando o ponto de referência de uma máquina se move ao longo de um eixo coordenado ele descreve a linha de movimento. O desvio desta linha, em relação à reta geométrica, é denominado erro de retilineidade”. Este desvio ocorre em dois planos perpendiculares entre si, e perpendicular ao eixo que estiver em movimento. Como as MM3Cs possuem três eixos e o desvio pode ser em dois planos, existe um total de seis possíveis erros de retilineidade para este tipo de máquina.

Para a medição de erro de retilineidade, existem 3 condições básicas: o interferômetro deve estar entre a unidade laser e o refletor; o interferômetro deve ser montado no lugar do apalpador da máquina e o refletor deve estar fixo na mesa da máquina.

➤➤ Retilineidade segundo o eixo “X”

A figura 5.12 mostra a verificação do erro de retilineidade quando o carro se movimenta ao longo do eixo “X” e a medição dos desvios é feita na direção do eixo “Z”. A figura 5.13 mostra a montagem para calibração do mesmo eixo de movimento, porém a medição dos desvios é feita na direção do eixo “Y”. A única diferença entre as montagens para medição do desvio horizontal e vertical, para avaliação do erro de retilineidade, está no giro de 90° graus do prisma de Wollaston e do refletor.

Figura 5. 12- Erro de retilidade ao longo do eixo "X" com desvio na direção do eixo "Z"

Figura 5. 13- Calibração do erro de retilidade ao longo do eixo "X" com desvio na direção do eixo "Y"

➤ Retilidade segundo o eixo “Y”

Conforme mostra a figura 5.14, aplica-se o mesmo procedimento para a determinação do erro de retilidade do eixo “Y”, que o utilizado na verificação da retilidade segundo o eixo “X”.

Figura 5.14 -Calibração do erro de retilidade ao longo do eixo “Y” com desvio na direção do eixo“X”

➤➤ Retilidade segundo o eixo “Z”

Nesta montagem, foi utilizado um acessório adicional necessário para otimizar o espaço ocupado, e isto está mostrado na figura 5.15. Neste caso o feixe emitido pelo laser incide inicialmente sobre um espelho refletor, que o desvia, perpendicularmente, na direção paralela ao eixo “Z”, incidindo no espelho retro-refletor que o faz passar pelo interferômetro, atingindo o refletor angular que se encontra fixo na mesa da máquina, e deste retorna ao canhão laser, percorrendo o mesmo caminho óptico.

Figura 5. 15- Calibração do erro de retilidade ao longo do eixo “Z” com desvio na direção do eixo “X”

➡ Erros angulares

Os erros angulares “Pitch”, “Yaw” e “Roll” são erros de rotação. Quando a rotação for em torno de um eixo perpendicular ao eixo em movimento, os erros gerados são denominados de “Pitch” ou de “Yaw”. Quando a rotação for em torno do próprio eixo que está em movimento, o erro será denominado de “Roll”. A tabela 5.2 é explicativa para tais denominações, tomando-se como exemplo o eixo “X”.

Tabela 5.2 – Rotações em torno do eixo “X”

Erros angulares analisados no eixo “X”	Causa
Pitch de “X”	Rotação do eixo “X” em torno do eixo “Z”
Yaw de “X”	Rotação do eixo “X” em torno do eixo “Y”
Roll de “X”	Rotação do eixo “X” em torno do eixo “X”

➡ Erro de ortogonalidade

O erro de ortogonalidade é um erro não paramétrico, ou seja, não pode ser escrito em função de um só parâmetro. É um erro que ocorre devido à impossibilidade de se conseguir, na prática, a montagem dos três eixos da máquina perfeitamente perpendiculares entre si. A calibração desta perpendicularidade constitui-se da avaliação da posição relativa entre dois eixos, sempre tomando um deles como referência. Quanto ao erro, este é determinado a partir da medição da retilidade segundo duas direções e pelo ajuste de retas que o definirão. Conforme mostra a figura 5.16, podem ocorrer até três erros de perpendicularidade entre os eixos da máquina. Erro de perpendicularidade entre os eixos X e Y, que é o ângulo formado entre os eixos X e X0, onde X0 é a posição real do eixo X no plano XY. Erro de perpendicularidade entre os eixos X e Z, que é dado pelo ângulo observado entre a projeção do eixo Z0 no plano XZ e o eixo Z. Por sua vez, o erro de perpendicularidade entre os eixos Y e Z é dado pelo ângulo formado entre o eixo Z e a projeção de Z0 no plano ZY, sendo que o eixo Y é o eixo de referência, Y=Y0. Em resumo:

θ_{xy} = erro de perpendicularidade entre os eixos X e Y

θ_{xz} = erro de perpendicularidade entre os eixos X e Z

θ_{yz} = erro de perpendicularidade entre os eixos Y e Z

Figura 5.16 - Erro de perpendicularidade entre eixos

5.2 – ANÁLISE GEOMÉTRICA

As máquinas de medir a três coordenadas, como se sabe, possuem erros em seus elementos individuais que compõe o sistema. Estes erros são devidos a fontes variadas e a sua combinação, que acontece de forma complexa pelo volume de trabalho, chamamos de erro volumétrico. Consequentemente, isto nos leva a uma avaliação dimensional errônea da peça que está sendo medida, não nos permitindo obter o valor verdadeiro, ou seja, a posição do apalpador na peça, em relação ao sistema de coordenadas, não coincide com a posição real.

A diferença de posicionamento entre a posição ideal do apalpador e a posição real é um erro que pode ser modelado matematicamente.

Dentre as técnicas existentes para a elaboração do modelo matemático, se optou, para o desenvolvimento deste trabalho, pela análise geométrica. Nesta metodologia, a estrutura da máquina é analisada geometricamente, observando-se os erros geométricos separadamente no espaço tridimensional, e avaliando-se as suas contribuições nas direções preferenciais da máquina. Estas contribuições são representadas por equações que, somadas algebricamente, geram as chamadas expressões de sintetização das componentes dos erros volumétricos.

Para melhor esclarecimento de como foi realizada esta análise geométrica, um desenho esquemático da máquina de medir mostra a disposição estrutural e identifica cada eixo preferencial, como mostra a figura 17.

Na figura 5.17, também são mostrados os sistemas de referência colocados em pontos estratégicos, que servem para a tomada de medidas durante a verificação dos 21 erros geométricos e também para a orientação espacial dos braços fixos.

Figura 5.17 – Estrutura da MM3C, tipo Ponte Móvel

O sistema de coordenadas “0”, ponto inicial de referência, encontra-se sobre a mesa da máquina. A partir deste, são colocados os outros 6 sistemas de coordenadas, tomando-se o cuidado para que os eixos correspondentes destes sistemas sejam paralelos entre si. O segundo, e o terceiro sistema de coordenadas, “1” e “2”, definem a dimensão do braço Z^{12} . O quarto sistema, “3”, e o quinto sistema, “4”,

definem a dimensão do braço Y^{34} . O sexto sistema, “5”, juntamente com o sétimo sistema, “6”, definem a dimensão do braço Z^{56} . O sétimo sistema de coordenadas, “6”, é colocado no centro da esfera, na extremidade da haste da sonda, e complementa a indicação do movimento ocorrido segundo o eixo “Z”. O movimento segundo o eixo “Y” é definido pelo deslocamento do sistema de referência “1” em relação ao sistema de referência “0”, complementado pelo deslocamento do sistema de referência “6” na direção de “Y”. O movimento segundo o eixo “X” é definido pelo deslocamento do sistema de referência “3” em relação ao sistema de referência “2”, complementado pelo deslocamento do sistema de referência “6” na direção de “X”. O movimento segundo o eixo “Z” é definido pelo deslocamento do sistema de referência “5” em relação ao sistema de referência “4”, complementado pelo deslocamento do sistema de referência “6” na direção de “Z”.

A análise geométrica dos erros da máquina foi realizada utilizando-se os sistemas de coordenadas acima descritos, assim como a elaboração dos esquemas para demonstrarem o efeito de cada erro. Nestes esquemas podem ser observadas as mudanças ocorridas na estrutura da máquina, bem como o plano no qual estas mudanças estão contidas.

Os esquemas não só demonstram os erros geométricos, como também, apresentam suas respectivas equações paramétricas determinadas a partir da análise destes erros. A figura 5.18 apresenta o esquema da análise geométrica do erro de posição. Nas figuras de 5.19 a 5.27 estão esquematizadas as análises geométricas dos erros angulares. Nas figuras de 5.28 a 5.30 os esquemas se referem às análises geométricas dos erros de ortogonalidade. E, nas figuras de 5.31 a 5.32 às análises geométricas dos erros de retilidade.

Figura 5.18 - Erro de posição devido ao deslocamento na direção do eixo "X"

Figura 5.19 - Erro angular Pitch de "X"

Figura 5.20 - Erro angular Yaw de "X"

Figura 5.21 - Erro angular Roll de "X"

Figura 5.22 – Erro angular Pitch de "Y"

Figura 5.23 – Erro angular Yaw de "Y"

Figura 5.24 – Erro angular Roll de "Y"

Figura 5.25 – Erro angular Pitch de "Z"

Figura 5.26 – Erro angular Yaw de "Z"

Figura 5.27 - Roll de "Z"

Figura 5.28 – Erro de ortogonalidade entre os eixos "Y" e "Z"

Figura 5.29 – Erro de ortogonalidade entre os eixos "X" e "Z"

Figura 5.30 – Erro de ortogonalidade entre os eixos "X" e "Y"

Figura 5.31 – Erro de retilidade na direção "Y"

Figura 5.32 – Erro de retilidade na direção "Z"

OBSERVAÇÕES:

- 1- O mesmo conceito aplicado aos erros de retilidade expostos acima se aplica aos erros de retilidade dos eixos "Y" e "Z". A contribuição destes erros está apresentada na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Erro de retilidade dos eixos "Y" e "Z"

EIXO "Y"	contribuição na direção do eixo "X"	$\Delta x = P^2 - P^1 = \delta x(y)$
	contribuição na direção do eixo "Z"	$\Delta z = P^2 - P^1 = \delta z(y)$
EIXO "Z"	contribuição na direção do eixo "X"	$\Delta x = P^2 - P^1 = \delta x(z)$
	contribuição na direção do eixo "Y"	$\Delta y = P^2 - P^1 = \delta y(z)$

As equações de contribuição obtidas pela análise dos esquemas desenvolvidos, nada mais são que as equações dos erros geométricos e seus efeitos em erro de posição nas direções X, Y e Z , as quais estão apresentadas na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Contribuição nas direções "X", "Y" e "Z"

Erros geométricos		E_{xI}	E_{yI}	E_{zI}
ANGULAR	Pitch "X"	$-\delta\theta y(x).(Z+Z^{56})$		
	Yaw "X"	$\delta\theta z(x).Y^{34}$		
	Roll "X"		$+\delta\theta x(x).(Z+Z^{56})$	$\delta\theta x(x).Y^{34}$
	Pitch "Y"		$-\delta\theta x(y).(Z^{12}-Z-Z^{56})$	$\delta\theta x(y).Y^{34}$
	Yaw "Y"	$\delta\theta z(y).Y^{34}$	$\delta\theta z(y).(X)$	
	Roll "Y"	$\delta\theta y(y).(Z^{12}-Z-Z^{56})$		$-\delta\theta y(y).(X)$
	Pitch "Z"		$\delta\theta x(z).(Z+Z^{56})$	
	Yaw "Z"	$-\delta\theta y(z).(Z+Z^{56})$		
	Roll "Z"			
ORTOGONALIDADE	"YZ"		$\delta\theta zy.(Z+Z^{56})$	
	"XY"	$\delta\theta xy.Y^{34}$	$\delta\theta xy.(X)$	
	"XZ"	$-\delta\theta xy.(Z+Z^{56})$		
POSIÇÃO	"X"	$\delta x(x)$		
	"Y"		$\delta y(y)$	
	"Z"			$\delta z(z)$
RETILINEIDADE	"X"		$\delta y(x)$	$\delta z(x)$
	"Y"	$\delta x(y)$		$\delta z(y)$
	"Z"	$\delta x(z)$		
	"Z"		$\delta y(z)$	

Somando-se as contribuições em cada direção, obter-se-ão as três equações que representam o erro de posicionamento total nas direções E_x , E_y e E_z , conforme apresenta a tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Erro de posicionamento total nas direções E_x , E_y e E_z

$$E_x = -\delta\theta y(x).(Z+Z^{56}) + \delta\theta z(x).Y^{34} + \delta\theta z(y).Y^{34} + \delta\theta y(y).(Z^{12}-Z-Z^{56}) - \delta\theta y(z).(Z+Z^{56}) + \delta\theta zx.Y^{34} - \delta\theta xy.(Z+Z^{56}) + \delta x(x) + \delta x(y) + \delta x(z)$$

$$E_y = +\delta\theta x(x).(Z+Z^{56}) - \delta\theta x(y).(Z^{12}-Z-Z^{56}) + \delta\theta z(y).(X) + \delta\theta x(z).(Z+Z^{56}) + \delta\theta y(z).(Z+Z^{56}) + \delta\theta zy.(X) + \delta y(y) + \delta y(x) + \delta y(z)$$

$$E_z = -\delta\theta x(x).Y^{34} - \delta\theta x(y).Y^{34} - \delta\theta y(y).(X) - \delta z(z) + \delta z(x) + \delta z(y)$$

CAPITULO VI

RESULTADOS DA INCERTEZA DOS ERROS DAS COMPONENTES VOLUMÉTRICAS E_x , E_y , e E_z , DA MM3C

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos no cálculo da incerteza dos erros das componentes volumétricas E_x , E_y e E_z , que representam a incerteza na medição coordenada da MM3C.

Na primeira parte deste capítulo, serão apresentados os parâmetros que definem a incerteza de cada um dos 21 erros medidos, as grandezas que compõem estes parâmetros, bem como seus valores numéricos. Na segunda parte, estarão os cálculos para a determinação das incertezas combinada e expandida dos erros avaliados pela calibração. Finalmente, a terceira parte apresentará os cálculos das incertezas combinada das componentes do erro volumétrico.

6.1 -PARÂMETROS DA INCERTEZA

Os parâmetros da incerteza foram aqui definidos como sendo as equações matemáticas que definem as incertezas dos 21 erros geométricos

da MM3C, avaliados individualmente. As grandezas que compõem as equações são extraídas da análise feita sobre a medição dos erros geométricos.

A seguir, será apresentada a análise da determinação do erro angular “pitch”, válido para qualquer um dos três eixos de movimento. A partir da análise das possíveis influências, tem-se as seguintes componentes, mais significantes, para a equação matemática:

◇ Grandeza (M)

Representa a determinação do erro em questão, caracterizada por um valor médio e uma dispersão das medições.

◇ Grandeza (P)

Basicamente toda medição é uma comparação com um padrão. Esta grandeza representa o padrão, ao qual também estão associados um erro e uma incerteza.

◇ Grandeza (L_L)

Fonte de erro associada à resolução do indicador do padrão LASER.

◇ Grandeza ($\Delta T_{P/M}$)

A temperatura ambiente tem sua parcela de influência, uma vez que altera diretamente os valores do padrão e da grandeza medida.

Diante do acima exposto, pode-se dizer que a equação matemática que descreve a medição do erro angular “Pitch” é:

$$M = P + L_L + \Delta T_{P/M}$$

Analogamente, foram realizadas, para cada erro geométrico avaliado, a análise da calibração e a elaboração da respectiva equação matemática. O mesmo procedimento foi utilizado para a medição dos braços fixos dos sistemas de referência, por serem também parâmetros de influência para o cálculo da incerteza, a tabela 61 ilustra os resultados.

Tabela 6.1 - Equações da análise da medição dos erros geométricos

Erros e braços fixos	Equação matemática
Erro angular "Pitch" e "Yaw" e Erro de Retilidade	$M = P + L_L + \Delta_T P/M$
Erro angular "Roll"	$M = P + C_N + L_N$
Erro de ortogonalidade	$M = P + C_C + L_C + C_{EG} + E_P + C_{CE}$
Erro de posição	$M = P + C_L + L_L + L_M + \Delta_T + \Delta_T P/M$
Braços fixos Z^{12}, Z^{56}, Y^{34}	$M = P + L_{MR}$

Os valores numéricos correspondentes às grandezas que descrevem as equações matemáticas estão apresentados no próximo item.

6.1.2 – VALORES NUMÉRICOS CORRESPONDENTES ÀS GRANDEZAS (M) AVALIADAS NA DETERMINAÇÃO DO ERRO DE "PITCH"

➤ Medições dos erros geométricos (M)

Foi utilizada a média dos valores obtidos na medição dos erros geométricos, referente à posição mais próxima do ponto médio de cada

faixa nominal dos eixos da máquina, ou seja, 150mm, 150mm e 100mm, para as posições dos eixos “X”, “Y” e “Z”, respectivamente. Estes valores são apresentados no apêndice A, e referem-se à estimativa x_i da tabela do apêndice B.

➤ **Medições dos braços fixos da máquina (M)**

Os resultados das medições dos braços fixos da MM3C, são apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Dimensão dos braços fixos

Braço medido	Dimensão em mm
Y ⁴⁵	62
Z ¹²	73
Z ⁵⁶	515

Nota:

A incerteza das medições dos braços fixos é de: $\pm 0.5\text{mm}$. No cálculo da incerteza do resultado das medições dos braços fixos foram levadas em conta a resolução da régua, a incerteza da calibração da régua e a dispersão das medidas. Assim, sua incerteza padrão combinada é dada por:

$$u_c = (0,3^2 + 0,05^2 + 0,3^2)^{1/2} = 0,43 \sim 0,5 \text{ mm}$$

6.1.3 - Temperatura e umidade relativa do ar

Durante a calibração da MM3C, tanto a temperatura ambiente quanto a umidade relativa do ar foram mantidas sob controle. A umidade manteve-se em 50%, e o efeito de sua variação é desprezível (ver apêndice E). A tabela 6.3 mostra as variações de temperatura ocorridas durante os ensaios.

Tabela 6.3 – Temperatura em que as medições foram realizadas

Erro medido		Temperatura °C		
Pitch “X”, “Y” e “Z”		20,6	20,6	20,9
Yaw “X”, “Y” e “Z”		20,9	21,0	21,0
Roll “X”, “Y” e “Z”		20,8	20,9	20,6
Retilidade do eixo “X”	Na direção “Z”	21,0		
	Na direção “Y”	21,0		
Retilidade do eixo “Y”	Na direção “X”	21,0		
	Na direção “Z”	21,1		
Retilidade do eixo “Z”	Na direção “X”	20,1		
	Na direção “Y”	20,0		
Posição “X”		21,1		
Posição “Y”		21,0		
Posição “Z”		21,0		
Ortogonalidade XY		20,8		
Ortogonalidade XZ		20,3		
Ortogonalidade ZY		21,0		

Nota:

A incerteza da medição das temperaturas da tabela 6.3 é de : $\pm 0,5 \text{ K}$ (é um valor histórico, em Kelvin, adotado a partir do conhecimento das incertezas normais para termômetros de controle ambiental).

6.1.4 - Dados referentes aos instrumentos utilizados na calibração da MM3C

Os dados referentes à faixa de utilização, resolução e incerteza dos instrumentos utilizados na calibração da MM3C, foram retirados dos manuais de utilização dos instrumentos usados e estão apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Instrumentos utilizados para calibração da MM3C

Medição	Instrumento	Faixa	Resolução	Incerteza
Posição	Laser	40x10 ³ mm	0,01 µm	0,01 µm
Pitch-Yaw	Laser	± 10°	0,05 s	0,05 s
Retilidade	Laser	± 1,5 mm	0,01 µm	0,01 µm
Ortogonalidade	Esquadro de granito	220x150mm		2 s
	Calibrador LVDT	+ 30µm a - 30µm	1µm	0,3 µm
Roll	Nível eletrônico	+ 60s a - 60s	0,1 s	0,2 s
	Nível de bolha	+ 6° a - 6°	4 s	2 s

6.2 – CÁLCULO DA INCERTEZA PADRÃO COMBINADA (u_c) E EXPANDIDA (U) DOS PARÂMETROS QUE COMPÕEM A INCERTEZA DOS ERROS AVALIADOS PELA CALIBRAÇÃO

No caso de medição com máquinas MM3C, pode-se dizer que as grandezas de influência são não-correlacionadas e, portanto, pode-se admitir que o coeficiente de correlação da equação 3.20 é igual a zero. Desta forma, o termo da dependência linear desaparece e a equação passa a ser conforme apresentado na expressão 6.1.

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (6.1)$$

A resolução da equação 6.1 é apresentada a seguir:

6.2.1 - Determinação das equações da incerteza padrão combinada (u_c).

Aplicando-se a equação 6.1 nas equações da tabela 6.1, obtêm-se as equações que representam a variância combinada dos erros geométricos avaliados e dos braços fixos medidos (tabela 6.5). Onde (C_s) representa o coeficiente de sensibilidade, ou seja, a derivada parcial da função com relação à variável em análise.

Tabela 6.5 - Variância combinada (u_c^2)

Erros e braços fixos	Variância combinada
Erro angular "Pitch" e "Yaw" e Erro de Retilidade	$u_c^2 = (C_{sUP})^2 + (C_{sUM})^2 + (C_s u_{LL})^2 + (C_s (u_{\Delta TP/M}))^2$
Erro angular "Roll"	$u_c^2 = (C_{sUP})^2 + (C_{sUM})^2 + (C_s u_{CN})^2 + (C_s u_{LN})^2$
Erro de ortogonalidade	$u_c^2 = (C_{sUP})^2 + (C_{sUM})^2 + (C_s u_{CC})^2 + (C_s u_{LC})^2 + (C_s u_{CEG})^2 + (C_s u_{EP})^2 + (u_{CCE})^2$
Erro de posição	$u_c^2 = (C_{sUP})^2 + (C_{sUM})^2 + (C_s u_{CL})^2 + (C_s u_{LL})^2 + (C_s u_{LM})^2 + (C_s u_{\Delta T})^2 + (C_s u_{\Delta TP/M})^2$
Braços fixos Z^{12}, Z^{56}, Y^{34}	$u_c^2 = (C_{sUP})^2 + (C_{sUM})^2 + (C_s u_{LMR})^2$

6.2.1 - Cálculo da incerteza padrão combinada (u_c)

Para melhor visualização do cálculo da incerteza, os dados estão apresentados em forma de tabela, baseando-se nas equações 3.19 e 3.20. O detalhamento para a elaboração da tabela é apresentado nos próximos parágrafos. A tabela 6.6 apresenta apenas os dados referentes ao erro angular "Pitch" de X, usado neste capítulo para efeito de ilustração. Os demais constam do apêndice B.

Tabela 6.6 - Erro angular "Pitch" $\delta\theta_y(x)$

$$M = P + L_L + \Delta_{TP/M}$$

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padronizada	unidade	distribuição probabilid.	coef. de sensib.	Incerteza $u_i(y)$ rd	Grau de liberdade
P	1,9	0,029	s	retangular	4,85E-06	1,40E-07	infinito
M	1,9	0,110	s	normal	4,85E-06	5,32E-07	2
L_L	0	0,020	s	triangular	4,85E-06	9,90E-08	infinito
$T_{P/M}$	0	0,115	k	retangular	1,01E-10	1,17E-11	infinito
$k = 4,30$					$u_c = 5,59E-07$		2
					$U = 2,40E-06$		

Genericamente, a incerteza combinada do erro angular “Pitch” de Y é dada por:

$$u_C = ((C_S u_P)^2 + (C_S u_M)^2 + (C_S u_{LL})^2 + (C_S (u_{ATPM}))^2)^{1/2} \quad (6.2)$$

onde:

➤ **Grandeza P** (X_1), definida por:

Estimativa $\bar{x}_1$: 1,9 s, erro médio indicado pelo LASER

Incerteza padronizada: 0,05 s, dado obtido do manual do LASER (ver tabela 6.5) – incerteza do tipo B

Distribuição de probabilidade : retangular, assumido de acordo com a orientação do INMETRO, 1998, quando não se dispõem de informação quanto ao nível de probabilidade da incerteza declarada. Como a distribuição de probabilidade foi assumida retangular, o fator de padronização é: $\sqrt{3}$

Coefficiente de sensibilidade: fator de influência da variável em análise no valor da incerteza :

$$C_1 = 1 \times 4,85 \times 10^{-6}$$

Incerteza $u_1(y)$: $4,85 \times 10^{-6} \times 0,03 = 1,40 \times 10^{-7}$ (produto da incerteza padronizada pelo coeficiente de sensibilidade)

Grau de liberdade : $\nu_1 =$ infinito (porque sendo a incerteza do padrão definida por $\pm 0,05s$, tem-se que no intervalo de $-0,05s$ a $+ 0,05s$ existem infinitos valores atribuíveis à indicação do padrão $[1,90 \pm 0,05]$ s).

➤ **Grandeza M** (X_2), definida por:

Estimativa $\bar{x}_2$: 1,9 segundos (representa a média das medidas, obtida na posição $x = 150$ mm)

Incerteza padronizada, da amostra (tipo A): 0,19 (representada pelo desvio padrão das medidas)

Distribuição de probabilidade : normal, característica usual de processos de medição. Como a incerteza padronizada deve se referir ao valor médio medido, a incerteza padronizada deve ser dividida por $\sqrt{n}$, onde n é o número de medições. No exemplo em análise tem-se : $\sqrt{3}$

Coefficiente de sensibilidade: fator de influência da variável, em análise, no valor da incerteza :

$$C_2 = 1 \times 4,85 \times 10^{-6}$$

Nota:

Nas planilhas em que a unidade de medição é em segundos, o coeficiente de sensibilidade está multiplicado pelo fator de conversão de segundos para radianos ($4,85 \times 10^{-6}$), uma vez que para a transformação dos efeitos angulares em lineares necessita-se de que os ângulos estejam expressos em radianos.

Incerteza $u_2(y)$: $4,85 \times 10^{-6} \times 0,19 = 5,32 \times 10^{-7}$ (produto da incerteza padronizada pelo coeficiente de sensibilidade)

Grau de liberdade : $\nu_2 = n-1 = 2$ ($n = 3$)

➡ **Grandeza L_L (X_3)**, definida por:

Estimativa x_1 : 0,0 s, a resolução não é fonte de erro sistemático

Incerteza padronizada: é igual à resolução, que é uma fração do valor de uma divisão do indicador (INMETRO, 1995). Quando se tratar de indicação digital a resolução é igual ao valor de uma divisão, no caso 0,05 s. Dado obtido do manual do LASER (ver tabela 6.5) – incerteza do tipo B

Distribuição de probabilidade : triangular, assumido de acordo com a orientação do INMETRO (1998). Como a distribuição de probabilidade foi assumida triangular, o fator de padronização é: $\sqrt{6}$

Coefficiente de sensibilidade: fator de influência da variável em análise no valor da incerteza :

$$C_3 = 1 \times 4,85 \times 10^{-6}$$

Incerteza $u_3(y)$: $4,85 \times 10^{-6} \times 0,02 = 1,0 \times 10^{-7}$ (produto da incerteza padronizada pelo coeficiente de sensibilidade)

Grau de liberdade : $v_3 = \text{infinito}$ (porque sendo a incerteza definida por $\pm 0,05s$, tem-se que no intervalo de $-0,05s$ a $+ 0,05s$ existem infinitos valores atribuíveis à indicação do padrão).

➤ **Grandeza $\Delta T_{P/M}$ (X_4),** definida por:

Estimativa x_4 : 0,0 k Assumiu-se, em primeira aproximação, que o erro sistemático devido à temperatura ambiente é desprezível (ISO 14253-1:1998)

Incerteza padronizada: 0,2 k - admitida como sendo igual à variação da temperatura ambiente durante os ensaios da MM3C - (incerteza do tipo B).

Distribuição de probabilidade : retangular, assumido de acordo com a orientação do INMETRO (1998). Como a distribuição de probabilidade é a triangular, o fator de padronização é: $\sqrt{3}$

Coefficiente de sensibilidade: fator de influência da variável em análise no valor da incerteza :

$$C_4 = 1 \times 1,01 \times 10^{-10}$$

Incerteza $u_4(y)$: $1,01 \times 10^{-10} \times 0,12 = 1,2 \times 10^{-11}$ (produto da incerteza padronizada pelo coeficiente de sensibilidade)

Grau de liberdade (v_4) = infinito (porque sendo a incerteza definida por $\pm 0,2$ k, tem-se que no intervalo de $-0,2k$ a $+ 0,2k$ existem infinitos valores atribuíveis à indicação da temperatura).

INCERTEZA PADRÃO COMBINADA (u_c):

$$u_c = [(5,3 \times 10^{-7})^2 + (1,4 \times 10^{-7})^2 + (1,0 \times 10^{-7})^2 + (1,2 \times 10^{-11})^2]^{1/2}$$

$$u_c = 5,6 \times 10^{-7} \text{ rd}$$

6.2.2 - Cálculo da incerteza expandida (U)

A incerteza expandida é dada pelo produto da incerteza combinada (u_c) pelo fator de abrangência (k).

$$U = k \cdot u_c$$

Para se determinar a incerteza expandida, foi utilizado o conceito de grau de liberdade efetivo (ν_{ef}) para determinar o coeficiente de abrangência que corresponda a uma confiança estatística de 95%. Esta determinação baseia-se na equação de Welch- Satterthwaite”:

$$\nu_{ef} = \frac{i_c^4(y)}{\sum_i \frac{i_i^4(y)}{\nu}} \quad (6.3)$$

onde:

$i_c(y)$ = incerteza combinada

$i_{i(y)}$ = incerteza padronizada

ν = grau de liberdade

portanto:

$$\nu_{ef} = \frac{i_c^4}{\frac{(i_1)^4}{\nu_1} + \frac{(i_2)^4}{\nu_2} + \frac{(i_3)^4}{\nu_3} + \frac{(i_4)^4}{\nu_4}} \quad (6.4)$$

sendo:

$$\nu_1, \nu_3 \text{ e } \nu_4 = \infty$$

então:

$$\frac{(i_1)^4}{\nu_1} \cong 0, \quad \frac{(i_3)^4}{\nu_3} \cong 0 \quad \text{e} \quad \frac{(i_4)^4}{\nu_4} \cong 0$$

assim:

$$\nu_{ef} = \frac{(i_c)^4}{(i_2)^4} = \frac{(i_c)^4}{(i_2)^4} \times \nu_2 = \frac{(5,59 \times 10^{-7})^4}{(5,32 \times 10^{-7})^4} \times 2 =$$

$$\nu_{ef} = 2,44$$

Com o valor de (ν_{ef}) e a probabilidade de 95%, obtém-se o fator de abrangência k na tabela de t-Student.:

$$k = 4,3$$

INCERTEZA EXPANDIDA (U):

$$U = k \cdot u_c$$

$$U = 4,3 \times 5,6 \times 10^{-7} .$$

$$U = 2,4 \times 10^{-6} \text{ rd}$$

O resultado da incerteza da medição do erro angular “Pitch” de X , realizado na calibração da MM3C, será:

$$U_{\text{Erro de Pitch de X}} = (1,9 \pm 0,5) \text{ s} \\ = (281 \pm 24) 10^{-7} \text{ rd}$$

Nota:

A mesma técnica se aplica ao cálculo da incerteza das demais medições que foram realizadas na calibração da MM3C, cujos resultados se encontram no apêndice B.

6.3 - INCERTEZA DAS COMPONENTES DO ERRO VOLUMÉTRICO

Até aqui, obteve-se a incerteza das medições dos erros geométricos, na calibração da MM3C, nas suas respectivas unidades de medida. Porém, como o objetivo é determinar a incerteza de medição da MM3C, é necessário determinar a incerteza do erro de cada uma das componentes volumétricas E_x , E_y e E_z , da máquina. Para tanto, deve-se aplicar a equação da incerteza combinada (3.20), nas três equações que representam o erro de posicionamento total nas direções E_x , E_y e E_z

(tabela 5.5). Desta forma, obtêm-se as equações que representam a variância combinada (u_c^2) de cada componente volumétrica da MM3C (tabela 6.7).

Tabela 6. 7 – Equações da variância combinada (u_c^2) de E_x , E_z e E_y

$$u_{c_{E_X}}^2 = (- (Z+Z^{56}))^2. (\Delta \delta \theta y(x))^2 + (\delta \theta y(x))^2. (\Delta Z)^2 + (\delta \theta y(x))^2. (\Delta Z^{56})^2 + (Y^{34})^2. (\Delta \delta \theta z(x))^2 + (\delta \theta z(x))^2. (\Delta Y^{34})^2 + (Y^{45})^2. (\Delta \delta \theta z(y))^2 + (\delta \theta z(y))^2. (\Delta Y^{34})^2 + (Z^{12} - Z - Z^{56})^2. (\Delta \delta \theta y(y))^2 + (- \delta \theta y(y))^2. (\Delta Z)^2 + (\delta \theta y(y))^2. (\Delta Z^{12})^2 + (- \delta \theta y(y))^2. (\Delta Z^{56})^2 + (- (Z+Z^{56}))^2. (\Delta \delta \theta y(z))^2 + (\delta \theta y(z))^2. (\Delta Z)^2 + (\delta \theta y(z))^2. (\Delta Z^{56})^2 + (Y^{34})^2. (\Delta \delta \theta zy)^2 + (\delta \theta zy)^2. (\Delta Y^{34})^2 + (- (Z+Z^{56}))^2. (\Delta \delta \theta xy)^2 + (\delta \theta xy)^2. (\Delta Z)^2 + (\delta \theta xy)^2. (\Delta Z^{56})^2 + (1)^2. (\Delta \delta x(x))^2 + (1. \Delta \delta x(y))^2 + (1. \Delta \delta x(z))^2$$

$$u_{c_{E_Z}}^2 = (- Y^{34})^2. (\Delta \delta \theta x(x))^2 + (- \delta \theta x(x))^2. (\Delta Y^{34})^2 + (- Y^{34})^2. (\Delta \delta \theta x(y))^2 + (\delta \theta x(y))^2. (\Delta Y^{34})^2 + (- \delta \theta y(y))^2. (\Delta X)^2 + (- (X))^2. (\Delta \delta \theta y(y))^2 + (-1)^2. (\Delta \delta z(z))^2 + (1)^2. (\Delta \delta z(x))^2 + (1)^2. (\Delta \delta z(y))^2$$

$$u_{c_{E_Y}}^2 = ((Z+Z^{56}))^2. (\Delta (\delta \theta x(x)))^2 + (\delta \theta x(x))^2. (\Delta Z^{56})^2 + (\delta \theta x(x))^2. (\Delta Z)^2 + (- (Z^{12} - Z - Z^{56}))^2. (\Delta (\delta \theta x(y)))^2 + (\delta \theta x(y))^2. (\Delta Z^{56})^2 + (- \delta \theta x(y))^2. (\Delta Z^{12})^2 + (\delta \theta x(y))^2. (\Delta Z)^2 + (X)^2. (\Delta (\delta \theta z(y)))^2 + (\delta \theta z(y))^2. (\Delta X)^2 + ((Z+Z^{56}))^2. (\Delta (\delta \theta x(z)))^2 + (\delta \theta x(z))^2. (\Delta Z^{56})^2 + (\delta \theta x(z))^2. (\Delta Z)^2 + ((Z+Z^{56}))^2. (\Delta (\delta \theta y(z)))^2 + (\delta \theta y(z))^2. (\Delta Z^{56})^2 + (\delta \theta y(z))^2. (\Delta Z)^2 + (X)^2. (\Delta (\delta \theta zy))^2 + (\delta \theta zy)^2. (\Delta X)^2 + (\Delta (\partial \delta y(y)))^2 + (\Delta (\partial \delta y(x)))^2 + (\Delta (\partial \delta y(z)))^2 +$$

Para facilitar os cálculos da incerteza combinada das componentes volumétricas E_X , E_Z e E_Y , pode-se substituir as equações que representam a variância combinada dos erros geométricos (tabela 6.5), nas equações da variância combinada dos erros volumétricos (tabela 6.7); e assim obter o que se apresenta na tabela 6.8.

Tabela 6. 8 - Equações da variância combinada (u_c^2) das componentes volumétricas E_X , E_Z e E_Y

$$u_{c_{E_X}}^2 = [-(Z + Z^{56})]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (\Delta L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [\delta\theta y(x)]^2 \cdot (\Delta Z)^2 + [\delta\theta y(x)]^2 \cdot (\Delta Z^{56})^2 + (Y^{34})^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (\Delta L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [\delta\theta z(x)]^2 \cdot (\Delta Y^{34})^2 + (Y^{34})^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (\Delta L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [\delta\theta z(y)]^2 \cdot [\Delta Y^{34}]^2 + [(Z^{12}) + (-Z) + (-Z^{56})]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (C_N)^2 + (L_N)^2] + [-\delta\theta y(y)]^2 \cdot [\Delta Z]^2 + [\delta\theta y(y)]^2 \cdot [\Delta Z^{12}]^2 + [-\delta\theta y(y)]^2 \cdot [\Delta Z^{56}]^2 + [-(Z^{12} + Z^{56})]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (\Delta L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [\delta\theta y(z)]^2 \cdot (\Delta Z)^2 + [\delta\theta y(z)]^2 \cdot (\Delta Z^{56})^2 + (Y^{34})^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (C_C)^2 + (L_C)^2 + (C_{EG})^2 + (E_P)^2 + (I_C)^2] + [\delta\theta xz]^2 \cdot [\Delta Y^{34}]^2 + (Z^{12} Z^{56})^2 + [(P)^2 + (M)^2 + (C_C)^2 + (L_C)^2 + (C_{EG})^2 + (E_P)^2 + (I_C)^2] + [\delta\theta xy]^2 \cdot (\Delta Z)^2 + [\delta\theta xy]^2 \cdot (\Delta Z^{56})^2 + [(P)^2 + (M)^2 + (C_L)^2 + (L_L)^2 + (L_M)^2 + (\Delta T)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [(P)^2 + (M)^2 + (L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [(P)^2 + (M)^2 + (L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2]$$

$$u_{c_{E_Z}}^2 = [-Y^{34}]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (C_N)^2 + (L_N)^2] + [-\delta\theta x(x)]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (I_{MR})^2] + [-Y^{34}]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (\Delta L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [\delta\theta x(y)]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (I_{MR})^2] + [-\delta\theta y(y)]^2 \cdot [(\Delta X)]^2 + [-(X)]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (C_N)^2 + (L_N)^2] + [(P)^2 + (M)^2 + (C_L)^2 + (L_L)^2 + (L_M)^2 + (\Delta T)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [(P)^2 + (M)^2 + (L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [(P)^2 + (M)^2 + (L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2]$$

$$u_{c_{E_Y}}^2 = [(Z)^2 + (Z^{56})^2] \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (C_N)^2 + (L_N)^2] + [\delta\theta x(x)]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (I_{MR})^2] + [\delta\theta x(x)]^2 \cdot [(\Delta Z)^2] + [-(Z^{12})^2 + (-Z)^2 + (-Z^{56})^2] \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [\delta\theta x(y)]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (I_{MR})^2] + [-\delta\theta x(y)]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (I_{MR})^2] + [\delta\theta x(y)]^2 \cdot [(\Delta Z)^2] + [X]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (\Delta L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [\delta\theta z(y)]^2 \cdot [(\Delta X)^2] + [(Z)^2 + (Z^{56})^2] \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (\Delta L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [\delta\theta x(z)]^2 \cdot [(\Delta Z)^2] + [\delta\theta x(z)]^2 \cdot [(\Delta Z)^2] + [Z + Z^{56}]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (C_C)^2 + (L_C)^2 + (C_{EG})^2 + (E_P)^2 + (I_{CE})^2] + [\delta\theta y(z)]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (I_{MR})^2] + [\delta\theta y(z)]^2 \cdot [(\Delta Z)^2] + [X]^2 \cdot [(P)^2 + (M)^2 + (C_C)^2 + (L_C)^2 + (C_{EG})^2 + (E_P)^2 + (I_{CE})^2] + [\delta\theta zy]^2 \cdot [(\Delta X)^2] + [(P)^2 + (M)^2 + (C_L)^2 + (L_L)^2 + (L_M)^2 + (\Delta T)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [(P)^2 + (M)^2 + (L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2] + [(P)^2 + (M)^2 + (L_L)^2 + (\Delta T_{P/M})^2]$$

Substituindo as grandezas da tabela 6.8 pelos seus respectivos valores numéricos, que se encontram no apêndice G, H e I, se obtêm o que apresenta a tabela 6.9.

Tabela 6. 9 –variância combinada (u_c^2)de E_x , E_z e E_y (μm)

$u_{c_{E_X}}^2 = (1,7\text{E-}01)^2 + (8,5\text{E-}11)^2 + (8,5\text{E-}12)^2 + (1,4\text{E-}01)^2 + (1,4\text{E-}11)^2 + (9,1\text{E-}02)^2 + (4,0\text{E-}12)^2 + (7,9\text{E+}00)^2 + (5,9\text{E-}10)^2 + (5,9\text{E-}11)^2 + (5,9\text{E-}11)^2 + (2,8\text{E+}00)^2 + (5,3\text{E-}11)^2 + (5,3\text{E-}12)^2 + (1,0\text{E+}01)^2 + (8,5\text{E-}08)^2 + (2,1\text{E+}01)^2 + (8,2\text{E-}08)^2 + (8,2\text{E-}08)^2 + (1,5\text{E+}00)^2 + (2,0\text{E-}04)^2 + (2,1\text{E-}04)^2$
$u_{c_{E_Z}}^2 = (7,5\text{E-}01)^2 + (3,8\text{E-}13)^2 + (1,4\text{E-}01)^2 + (4,3\text{E-}11)^2 + (5,9\text{E-}10)^2 + (1,5\text{E+}00)^2 + (1,6\text{E+}00)^2 + (1,9\text{E-}04)^2 + (1,6\text{E-}04)^2$
$u_{c_{E_Y}}^2 = (5,8\text{E+}00)^2 + (3,8\text{E-}12)^2 + (3,8\text{E-}13)^2 + (4,3\text{E+}00)^2 + (4,3\text{E-}11)^2 + (2,3\text{E-}07)^2 + (4,3\text{E-}10)^2 + (5,3\text{E-}01)^2 + (4,0\text{E-}11)^2 + (1,1\text{E+}00)^2 + (1,4\text{E-}11)^2 + (1,4\text{E-}10)^2 + (4,3\text{E+}01)^2 + (5,3\text{E-}12)^2 + (5,3\text{E-}11)^2 + (1,4\text{E+}01)^2 + (5,3\text{E-}07)^2 + (1,1\text{E+}00)^2 + (1,9\text{E-}04)^2 + (1,9\text{E-}04)^2$

Efetuada-se os cálculos das equações da tabela 6.9, obter-se-ão os resultados da incerteza padrão combinada (u_c) dos erros das componentes volumétricas E_x , E_y e E_z , da MM3C (tabela 6.10).

Tabela 6.10 – Resultado da incerteza padrão combinada (u_c) das componentes volumétricas E_X , E_Y e E_Z

$u_{c_{E_X}} = 6,6 \mu\text{m}$
$u_{c_{E_Z}} = 2,0 \mu\text{m}$
$u_{c_{E_Y}} = 8,4 \mu\text{m}$

Nota:

Este resultado mostra que sempre que a referida MM3C estiver indicando a localização de um ponto, cujas coordenadas sejam $X=150\text{mm}$, $Z=100\text{mm}$ e $Y=150\text{mm}$. Significa que neste ponto a incerteza dos erros das componentes volumétrica são $6.6\mu\text{m}$, $2,0\mu\text{m}$ e $8,4\text{mm}$, respectivamente.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, apresentou-se uma metodologia para a determinação da incerteza das medições a três coordenadas. Seu desenvolvimento se deu com base no que estabelece o Guia para Expressão da Incerteza de Medição, o qual coloca as regras para avaliar e expressar a incerteza de medição, que podem ser seguidas em vários níveis de exatidão (INMETRO, 1998).

A análise da literatura pesquisada constatou que é um assunto relativamente novo na história da metrologia, portanto, foi encontrada pouca literatura disponível para pesquisa.

O desenvolvimento desta metodologia envolve a realização da calibração da MM3C, o desenvolvimento de um modelo matemático que

descreva os erros geométricos no espaço tridimensional, avaliando sua contribuição individual nas componentes do erro volumétrico, e o controle ambiental.

Os cálculos foram realizados mediante programa computacional que, por serem relativamente simples e com aplicações basicamente estatísticas para a sua execução, permite o uso de aplicativos comerciais no tratamento dos dados.

A partir dos resultados obtidos, com a aplicação da metodologia proposta em uma MM3C do tipo ponte Móvel, as seguintes conclusões foram obtidas:

→ Apesar de não existir um procedimento normal para a determinação da incerteza dos erros das componentes volum das MM3Cs, a metodologia apresentada é confiável, bastante viável e não muito complexa; pode, também, ser facilmente comprovada, uma vez que foi desenvolvida mediante a utilização de métodos universalmente uniformes.

→ A metodologia pode ser aplicada a qualquer máquina desde que se tenha a modelagem matemática da estrutura da máquina. E pode ser realizada pelos fabricantes, uma vez que ela determina os mapas de calibração, o controle ambiental e as equações de sintetização das componentes volumétricas.

→ A análise geométrica mostrou-se adequada para este tipo de máquina, uma vez que os movimentos desta máquina não são complexos, ou seja, há três movimentos de translação em eixos perpendiculares entre si, o que torna clara a visualização dos efeitos dos erros geométricos sobre a estrutura, permitindo-se escreverem as equações de sintetização.

→ A calibração direta mostrou-se uma ferramenta indispensável na avaliação e no diagnóstico dos erros geométricos.

→ A influência que o laser pode ter na incerteza, quando ocorre variação de temperatura, mostrou-se de menor influência, uma vez que este possui correção automática, reproduzindo um valor de suas medidas relativo a uma temperatura ambiente de 20°C.

A partir destas observações e conclusões, algumas propostas de trabalhos futuros estão delineadas a seguir:

- Comprovação da técnica desenvolvida, utilizando-se barra de esferas.
- Análise da incerteza de medição em MM3C, de peças com características metrológicas conhecidas, para avaliação de métodos anteriormente desenvolvidos.
- Determinação de um programa que permita fazer a varredura da máquina toda em termos de incerteza, mostrando o erro de posição e suas respectivas incertezas (U_x , U_y e U_z) em cada ponto.
- Utilização do método de Máquinas Virtuais para determinação dos erros e suas respectivas incertezas para a mesma MM3C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSI/ASME B89.4.1: *Methods for performance e Evaluation of coordinate measuring machines*. 1995.
- BANAS – *Sistema brasileiro da qualidade* – n. 89, ed. especial, edit. Banas. 1999/2000
- BOSCH, J. A. - *Coordinate measuring machines and systems* - New York, Marcel Dekker, 1995.
- BURDEKIN, M. - *Computer aided calibration of the geometric errors of multi-axis coordinate measuring machines* - paper n.20 published in vol.195, pages 231-239 - Proc Instn Mech Engrs – Mech 1981.
- BURDEKIN, M., DI GIACOMO, B. & XIJING, Z. - *Calibration software and application to co-ordinate measuring machines*. Three Coordinate Measurement Machines Software Coference, NPL, England, Septembre 1984: 1-7.
- CENAM – *Máquinas de medición por coordenadas* – Centro Nacional de Metrologia do México. 1996.
- DENAVIT, J. & HARTENBERG, R. S., in: SATO, D. P. V. (1998). *Uma contribuição ao modelo de sintetização de erros em máquinas ferramentas*. São Carlos. 198p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DI GIACOMO, B. – *Computer aided calibration and hybrid compensation on Geometric errors in Coordinate Measuring Machines* – PhD. Thesis, 418p., England, University of Manchester Institute of Science and Technology, Mai 1986.

- DIETRICH, C.F. - *Uncertainty, calibration & probability* - London, Adam Hilger, 1973.
- DOIRON, T. & STOUN, STOUN J. - *Uncertainty and dimensional calibrations* - Journal of Research of the Institute of Standards and Technology. v. 102, n. 6, November/ December 1997.
- EHRlich, C. D. & SATANLEY, D. R. - *Metrological timelines in traceability* - Journal of research of the National Institute of Standards and Technology. v. 103, n.1. January/February 1998.
- GONZÁLEZ, R. V. B. & SOUZA, A. B. - *Incerteza dos resultados de medição*, in: Mitutoyo News. n. 19. 1999.
- HEWLETT-PACKARD - *LASER measuring system model 5529A* - Measurement reference guide. Santa Clara, USA, 1996.
- INMETRO - *Guia para a expressão da incerteza de medição* - Rio de Janeiro, Agosto 1998.
- ISO /DIS 10360-3.2 - *Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM) - part 1*: 1998.
- ISO 14253-1 - *Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - part 1*: Decision rules proving conformance or non-conformance with specifications. 1998.
- KNAPP et al., in: DI GIACOMO, B. - *Computer aided calibration and hybrid compensation on geometric errors in coordinate measuring machines* - PhD. Thesis, 418p., England, University of Manchester Institute of Science and Technology, Mai 1986.
- KUNZMANN, H.& WÄLDELE, F. - *Performance of CMMA* - Anais do CIRP, 37 (2), 1988:633-40.
- KUNZMANN, H.; TRAPET, E.; WÄLDETE, F. - *Já há como rastrear as medições com máquinas de coordenada*. Máquinas e Metais - Trad. Por Norberto de Paula Lima. São Paulo, agosto 1994.

- NIST Technical Note 1297 - *Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results* - National Institute of Standards and Technology, 1994.
- PAHK, H. J. & Burdekin, M., in: PIRATELLI, A. F. (1997). - *Método para avaliação do desempenho de máquinas de medir a três coordenadas através de planejamento de experimentos* - São Carlos. 225p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PATON, S. M. - *Ilhas de excelência no século da qualidade* - Trad. por: Marisa Souza. Qualidade. ed. Banas. n. 84, p.48 a 50, ano VIII. Maio 1999.
- PEGGS, G. N. - *Creating a Standards Infrastructure for Co-ordinate Measuring Technology* - UK, Annals of the CIRP, v 38/1, p. 521-523, 1989.
- PEGGS, G.N. - *Traceability for co-ordinate measurement technology* - 27th International MATADOR conference, Manchester, p. 463-468, 1990.
- PHILLIPS, S.D. - *Performance evaluations*, in: Bosch, J. A. - *Coordinate Measuring Machines and Systems* - New York, Marcel Dekker, inc., 1995.
- PIRATELLI, A. F. (1997). - *Método para avaliação do desempenho de máquinas de medir a três coordenadas através de planejamento de experimentos* - São Carlos. 225p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SATO, D. P. V. (1998). - *Uma contribuição ao modelo de sintetização de erros em máquinas ferramentas*. São Carlos. 198p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SLOCUM, A. H. – *Introduction to precision machine design* in: *Precision Machine Design*, Massachusetts Institute of Tecnology, Prentice-Hall Inc. 1992.
- SURESH, K. & VOELCKER. H.B.- *New challenges in dimensional metrology: a case study based on 'size'*. Manufacturing Review, v.7, n.4,

p.291 – 303, Dec. 1994 apud MARTINS, F. P. R. – *Calibração de Padrões Metrológicos Utilizando Visão Computacional* – (1999). São Paulo, 197p.Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SWYT, D. A. - *The international standard of length*, in: Bosch, J. A. - *Coordinate Measuring Machines and Systems*, New York, Marcel Dekker, 1995.

VDI/VDE 2617 – PART 3: *Characteristic parameters and their Checking, Components of measurement Deviation of the Machine*. 1989

INMETRO - *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia* - Duque de Caxias, RIO DE JANEIRO. 1995

WECKENMANN, A.; KANAUER, M. - *The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-measurements* - PTB Braunschweig - January 8, 1998.

BIBLIOGRAFIA

- ABACKERLI, A.; CAUCHICK, M. P.; KING, T.G. – *CMM traceability in manufacturing systems* - XVI Encontro Nacional de Eng. de Produção e II Congresso Internacional de Eng. Industrial, Taquaral – CT UNIMEP, 1996.
- BALSAMO, A.; CIOMMO, M. Di; MUGNO, R.; REBAGLIA, B. I.; RICCI, E.; GRELLA, R. - *Evaluation of uncertainty through monte carlo simulations* - Annals of the CIRP v. 48/1/1999
- BRYAN, J. B. - *The Abbè principle revisited: in updated interpretation* - Precision Engineering, v.1, n 1, 129-132, jul. 1979.
- CARDOZA, J. A. S. (1995) – *Máquinas virtuais de medir a três coordenadas* – São Carlos, 209 p.. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos- USP, Brasil, agosto 1995.
- CHARLES, D. E. & STANLEY, D. R. – *Metrological timelines in traceability* - Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology – v.103, n.1, january-february, 1998.
- INSTONE, I. - *Simplified method for assessing uncertainties in a commercial production environment* – Hewlett Packard Ltd, october 1996.
- ISO/TC 213 – *Dimensional and geometrical product specifications and verification* -. 1999.
- KAKINO, Y.; IHARA, Y.; SHINOHARA, A.. *Accuracy inspection of NC machine tools by double ball bar method* - Ed. By Dr. Johannes Heidenhain GmbH. Munich, Vienna, New York. 1993.
- LINK, W. - *Metrologia mecânica – Expressão da Incerteza de Medição* - Programa RH Metrologia, julho 1997.

- MARQUES, A. (1999) - *A correção entre os erros de retilineidade e angulares nas máquinas de medir a três coordenadas* - São Carlos. 131p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MARTIN, P. - *Metrology* – SIP, Société Genevoise D'instruments de Physique. Geneva. Suíça, 1986.
- MENDENHALL, W. & SINCICH, T. - *Statistic for the engineering and computer sciences* - Second Edition Maxwell Macmillan International Editions, 1988, in: Sato, D. P. V. (1998). *Uma contribuição ao modelo de sintetização de erros em máquinas ferramentas*. São Carlos. 198p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MONTGOMERY, D. C.; Runter, G.C. & Montgomery, D. - *Applied statistic and probability for engineers* - New York, John Wiley & Sons, 1994.
- NIS3003 - *The expression of uncertainty and confidence in measurement for Calibration* – p. 1-45, ed.8, may 1995.
- ORREGO, R. M. M (1999) - *Método de calibração direta para máquinas de medir a três coordenadas* - São Carlos. 175p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PEGGS, G.N. - *Creating a standards infrastructure for co-ordinate measuring technology* - UK, Annals of the CIRP, v 38/1, p. 521-523, 1989.
- PEGGS, G.N. *Traceability for co-ordinate measurement technology* - 27th International MATADOR conference, Manchester, p 463-468, 1990.
- PHILLIPS, S.D.- *Performance evaluations*, in: Bosch, J.^a *Coordinate Measuring Machines and Systems*, New York, Marcel Dekker, inc., 1995.
- WAENY, J. C. C. - *Repetitividade reprodutividade II* – ACM – 20 IPT, 1980.
- WECKENMANN, A.; KANAUER, M. - *The Influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM-Measurements* -, PTB Braunschweig - January 8, 1998.

VDI/VDE 2617 – *Accuracy of coordinate measuring machines*, Part 1: *Characteristics and their checking*, 1986. Part 2: *Characteristic parameters and their checking. Measuring task. Specific measurement uncertainty – Length measurement uncertainty*. 1986

APÊNDICE A

Gráficos dos erros geométricos avaliados na calibração da MM3C

Os gráficos apresentam no eixo das ordenadas os valores dos erros medidos e, no eixo das abscissas as posições em que estes erros foram medidos. Através dos gráficos, pode-se analisar o comportamento do deslocamento dos carros sobre o eixo em análise tanto na ida, quanto no retorno. Em torno do valor médio da ida, é apresentada a dispersão das medidas com 3s.

Foi apresentado apenas o resultado final (completo) para um sentido do movimento, porque as dispersões, tanto para a ida quanto para a volta, foram bastante similares. Não se adotou o valor médio entre a ida e a volta porque isto mascararia a histerese que, em muitos casos, teve o seu valor bastante significativo.

- Erro angular "Pitch" $\delta\theta(y)$

$M = P + L_L + \Delta T_{PM}$

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padronizada	unidade	distribuição probabilid.	coef. de sensib.	Incerteza $u_i(y)$ rd	Grau de liberdade
P	1,9	0,029	s	retangular	4,85E-06	1,40E-07	infinito
M	1,9	0,110	s	normal	4,85E-06	5,32E-07	2
L_L	0	0,020	s	triangular	4,85E-06	9,90E-08	infinito
T_{PM}	0	0,115	k	retangular	1,01E-10	1,17E-11	infinito
k= 4,30						5,59E-07	2
						2,40E-06	

Erro angular "Pitch" $\delta\theta(x)$

$M = P + L_L + \Delta T_{PM}$

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padronizada	unidade	distribuição probabilid.	coef. de sensib.	Incerteza $u_i(y)$ rd	Grau de liberdade
P	4,3	0,029	s	retangular	4,85E-06	1,40E-07	infinito
M	4,3	0,289	s	normal	4,85E-06	1,40E-06	2
L_L	0	0,020	s	triangular	4,85E-06	9,90E-08	infinito
T_{PM}	0	0,115	k	retangular	2,29E-10	2,65E-11	infinito
k= 4,30						1,41E-06	2
						6,07E-06	

Erro angular "Pitch" $\delta\theta(z)$

$M = P + L_L + \Delta T_{PM}$

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padronizada	unidade	distribuição probabilid.	coef. de sensib.	Incerteza $u_i(y)$ rd	Grau de liberdade
P	4,1	0,029	s	retangular	4,85E-06	1,40E-07	infinito
M	4,1	0,173	s	normal	4,85E-06	8,40E-07	2
L_L	0	0,020	s	triangular	4,85E-06	9,90E-08	infinito
T_{PM}	0	0,115	k	retangular	2,19E-10	2,52E-11	infinito
k= 4,30						8,57E-07	2
						3,69E-06	

Erro de retilidade $\delta y(x)$

$M = P + L_L + \Delta T_{PM}$

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padronizada	unidade	distribuição probabilid.	coef. de sensib.	Incerteza $u_i(y)$ μm	Grau de liberdade
P	-0,09	0,006	μm	retangular	1,0	5,77E-03	infinito
M	-0,09	0,002	μm	normal	1,0	1,50E-03	2
L_L	0	0,004	μm	triangular	1,0	4,08E-03	infinito
T_{PM}	0	0,115	k	retangular	-9,90E-07	-1,14E-07	infinito
k= 1,96						7,23E-03	1075
						1,42E-02	

Erro de retilidade $\delta z(x)$

$M = P + L_L + \Delta T_{PM}$

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza padronizada	unidade	distribuição probabilid.	coef. de sensib.	Incerteza $u_i(y)$ μm	Grau de liberdade
P	0,03	0,006	μm	retangular	1,0	5,77E-03	infinito
M	0,03	0,002	μm	normal	1,0	2,25E-03	2
L_L	0	0,004	μm	triangular	1,0	4,08E-03	infinito
T_{PM}	0	0,115	k	retangular	3,30E-07	3,81E-08	infinito
k= 1,97						7,42E-03	236
						1,46E-02	

APÊNDICE C

Influência da temperatura ambiente na acuracidade da MM3C

A acuracidade da máquina, fornecida pelo fabricante, é para uma temperatura ambiente de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, sendo:

Acuracidade linear (B89- bandwidth) $6\mu\text{m}$

Repetibilidade (B89- bandwidth) $2\mu\text{m}$

A variação da temperatura fora do limite de tolerância estabelecido pelo fabricante passa a ter uma influência significativa no valor da medida, conseqüentemente na sua incerteza. Para se saber o quanto a variação de temperatura afeta na incerteza, basta utilizar a equação (1C):

$$E = L \times \alpha \times \Delta t \quad (1C)$$

onde:

E = erro

L = comprimento medido a 20°C

α = coeficiente de expansão linear

Δt = variação da temperatura

APÊNDICE D

Graus de liberdade

O valor do grau de liberdade efetivo (ν_{ef}) permite identificar se há predominância de algum tipo (A ou B) de incerteza. Para processo de medição com valor de (ν_{ef}) entre 200 a 3000, pode-se dizer que está sob controle. Se for maior que 3000, a predominância está em alguma incerteza do tipo B, a qual deve ser reavaliada, porque pode estar levando a um resultado da incerteza combinada superestimado.

Por outro lado, quando o fator de abrangência k for maior que 2, tem-se no processo uma predominância da incerteza do tipo A. Aumentando-se o número de medições, esse valor pode ser diminuído até o limite de 2 (Informações adquiridas durante o curso de Cálculo de Incerteza ministrado pela Mitutoyo Sulamericana, 2000).

No exemplo dado na página 90, o resultado obtido para o valor de k foi 4,3, o que mostra que o desvio padrão das medições (tipo A) prevalece no cálculo da incerteza expandida.

APÊNDICE E

Fator de compensação do laser

O sistema de medição a LASER tem seu princípio de medição baseado no comprimento de onda da luz. A alteração da temperatura em 1k pode variar de uma parte por milhão na velocidade da luz, o que conseqüentemente acarretará na variação do comprimento de onda da luz, afetando assim o valor da medição. A equação abaixo correlaciona o comprimento de onda, a frequência e a velocidade da luz:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1E)$$

onde:

λ = comprimento de onda

v = velocidade da luz

f = frequência

A velocidade da luz é constante no vácuo, porém, no ar, varia em função da temperatura deste, da pressão e da umidade.

A frequência do LASER é constante, assim o comprimento de onda da luz variará com a variação da velocidade da luz e esta variação do comprimento de onda afetará a medição.

Por exemplo: a variação de uma parte por milhão na velocidade da luz pode ser consequência de:

- 1k na mudança da temperatura.
- 2,5 mmHg na mudança da pressão do ar ambiente.
- 80% da mudança da umidade relativa do ar.

A distância mostrada no Display de medição da unidade LASER é igual ao número de comprimento de ondas (N), multiplicado por um fator de compensação (C) e, este resultado é então multiplicado pelo comprimento de onda no ar (W_A), ou no vácuo (W_V) conforme equação 2E.

$$D = N \cdot C \cdot W_A \quad (2E)$$

A equação 3E permite determinar o fator de compensação (C) em caso de não ser usado o compensador automático. O termo N é calculado a partir da equação 4E, que leva em conta os efeitos das variáveis ambientais sobre o resultado da medição (comprimento de onda), (HEWLETT-PACKARD, 1996).

$$C = \frac{10^{12}}{N + 10^{-6}} - 999000 \quad (3E)$$

$$N = 0.3836391P \times \left[\frac{1 + 10^{-6} P(0.817 - 0.0133T)}{1 + 0.0036610T} \right] - 3.033 \times 10^{-3} H(e^{0.057627T}) \quad (4E)$$

Onde:

N = número de comprimento de onda do movimento

T – temperatura em graus Celsius

P – pressão em milímetros de mercúrio

H –umidade relativa em porcentagem

As principais fontes de erros na utilização de sistema LASER de medição são:

- 1 – variação da temperatura, pressão e umidade relativa do ar.
- 2 – desalinhamento entre o movimento da máquina e o eixo de medição do sistema LASER.
- 3 - medição sem compensação do path lengths

O sistema de compensação automático do LASER atendeu plenamente a variação de temperatura ocorrida durante às medições, não causando erro sistemático significativo. Para confirmação, foram realizados os cálculos, conforme tabela E1(HEWLETT-PACKARD, 1996). Uma vez que estas variações estavam dentro da tolerância admissível para correção, pôde-se assumir 20°C para a temperatura durante a calibração da MM3C. A variação da temperatura ambiente foi considerada nos cálculos das incertezas dos erros geométricos e dos braços fixos.

Tabela - E1 - Cálculo do fator de correção do LASER						
	P	T	H	N	C	ΔC
eixo X	682,51	21,15	50	242,6	757,5	-0,0277
	682,36	21,12	50	242,6	757,5	
eixo Y	680,34	21,11	50	241,9	758,2	-0,0121
	680,21	21,07	50	241,8	758,2	
eixo Z	684,05	21,02	50	243,3	756,8	0,0573
	683,68	20,8	50	243,3	756,7	

APÊNDICE F

Princípio de Abbè

O princípio de Abbè foi elaborado por Ernest Abbè, em 1890, e descreve o princípio básico para a metrologia dimensional.

Segundo Bryan (1979), “o erro de Abbè é o deslocamento que ocorre na linha de medição causado por possíveis movimentos angulares que surgem devido ao Braço de Abbè”.

Na figura 1F, estão apresentadas as duas situações: uma, em que há concordância com o princípio de Abbè onde o eixo de medição coincide com o da escala e, outra, em que não há transgressão do princípio de Abbè, e os dados do movimento angular devem ser usados para corrigir a leitura.

Em uma MM3C, este erro é causado pelo movimento de rotação do carro de medição e o afastamento da sonda em relação ao eixo de referência da escala. A esta distância dá-se o nome de Braço de Abbè.

Figura 1F - Micrômetro (concordância com o Princípio de Abbè) e Paquímetro (transgressão do Princípio de Abbè)

APÊNDICE G

Tabela de cálculo da incerteza da medição da componente volumétrica E_x da MM3C, elaborada pelo programa anexo

tabela - 6.12 capítulo - VI		erro geométrico	incerteza padronizada	Erro Geométrico	Unidade	incerteza expandida Up	Coefficiente de sensibilidade Cs
incerteza combinada (Uci μm)							
Ex1	1,7E-01	pitch y(x)	4,85E-07	9,21E-06	rd	2,40E-06	4,848E-06
Ex2	8,5E-11	pitch x(y)	4,85E-07	2,08E-05	rd	6,07E-06	4,848E-06
Ex3	8,5E-12	pitch x(z)	0,00E+00	1,99E-05	rd	3,69E-06	4,848E-06
Ex4	1,4E-01	yaw y(z)	1,94E-06	7,27E-06	rd	9,67E-06	4,848E-06
Ex5	1,4E-11	yaw z(x)	4,85E-07	-1,16E-05	rd	6,07E-06	4,848E-06
Ex6	9,1E-02	yaw z(y)	1,45E-06	-6,30E-06	rd	4,87E-06	4,848E-06
Ex7	4,0E-12	posição x	1,7	1,70E+00	μm	1,2	1,000E+00
Ex8	7,9E+00	posição y	0,4	-2,70E+00	μm	1,0	1,000E+00
Ex9	5,9E-10	posição z	0,4	4,80E+00	μm	1,3	1,000E+00
Ex10	5,9E-11	ortog xy	5,42991E-05	2,87E-04	μm	4,6	4,848E-06
Ex11	5,9E-11	ortog xz	0,000242407	2,42E-04	μm	2,8	4,848E-06
Ex12	2,8E+00	ortog zy	-0,000707828	7,27E-04	μm	3,7	4,848E-06
Ex13	5,3E-11	retil Xz	0,0002	5,00E-02	μm	1,39E-02	1,000E+00
Ex14	5,3E-12	retil Xy	0,0008	-3,00E-01	μm	1,39E-02	1,000E+00
Ex15	1,0E+01	retil Yz	0,0004	2,40E-01	μm	1,27E-02	1,000E+00
Ex16	8,5E-08	retil Yx	0,0008	-9,00E-02	μm	1,42E-02	1,000E+00
Ex17	2,1E+01	retil Zx	0,0005	3,00E-02	μm	1,46E-02	1,000E+00
Ex18	8,2E-08	retil Zy	0,3698	-1,20E-01	μm	1,39E-02	1,000E+00
Ex19	8,2E-08	roll x	1,79284E-06	1,94E-06	rd	1,40E-06	4,848E-06
Ex20	1,5E+00	roll y	1,47383E-06	2,42E-05	rd	8,23E-06	4,848E-06
Ex21	2,0E-04	braço Y45		6,20E+04	μm	3,16E-01	1,000E+03
Ex22	2,1E-04	braço Z12		5,15E+05	μm	3,16E-01	1,000E+03
	6,6	braço Z56		7,30E+04	μm	3,16E-01	1,000E+03
		Z	100000 μm				
		Z56	73000 μm				
		Z12	515000 μm				
		Y	150000 μm				
		y45	62000 μm				
		X	150000 μm				
		Δz	1				
		Δy	1				
		Δx	1				
$U_x =$		6,6 μm					

APÊNDICE H

Tabela de cálculo da incerteza da medição da componente volumétrica E_V da MM3C, elaborada pelo programa anexo

tabela - 6.14 capítulo - VI						
	incerteza Combinada U_{ci} (μm)	erro geométrico	incerteza padronizada (μm)	erro geométrico	unidade	incerteza expandida U_{pi} (μm) coeficiente de sensibilidade C_s
Ey1	5,8E+00	pitch y(x)	4,85E-07	9,21E-06	rd	2,40E-06 4,848E-06
Ey2	3,8E-12	pitch x(y)	4,85E-07	2,08E-05	rd	6,07E-06 4,848E-06
Ey3	3,8E-13	pitch x(z)	0,00E+00	1,99E-05	rd	3,69E-06 4,848E-06
Ey4	4,3E+00	yaw y(z)	1,94E-06	7,27E-06	rd	9,67E-06 4,848E-06
Ey5	4,3E-11	yaw z(x)	4,85E-07	-1,16E-05	rd	6,07E-06 4,848E-06
Ey6	2,3E-07	yaw z(y)	1,45E-06	-6,30E-06	rd	4,87E-06 4,848E-06
Ey7	4,3E-10	posição x	1,7	1,70E+00	μm	1,2 1,000E+00
Ey8	5,3E-01	posição y	0,4	-2,70E+00	μm	1,0 1,000E+00
Ey9	4,0E-11	posição z	0,4	4,80E+00	μm	1,3 1,000E+00
Ey10	1,1E+00	ortog xy	5,42991E-05	2,87E-04	μm	4,6 4,848E-06
Ey11	1,4E-11	ortog xz	0,000242407	2,42E-04	μm	2,6 4,848E-06
Ey12	1,4E-10	ortog zy	-0,000707828	7,27E-04	μm	3,7 4,848E-06
Ey13	5,3E-12	retil Xz	0,0002	5,00E-02	μm	1,39E-02 1,000E+00
Ey14	5,3E-11	retil Xy	0,0008	-3,00E-01	μm	1,39E-02 1,000E+00
Ey15	1,4E+01	retil Yz	0,0004	2,40E-01	μm	1,27E-02 1,000E+00
Ey16	5,3E-07	retil Yx	0,0008	-9,00E-02	μm	1,42E-02 1,000E+00
Ey17	1,1E+00	retil Zx	0,0005	3,00E-02	μm	1,46E-02 1,000E+00
Ey18	1,9E-04	retil Zy	0,3698	-1,20E-01	μm	1,39E-02 1,000E+00
Ey19	1,9E-04	roll x	1,79284E-06	1,94E-06	rd	1,40E-05 4,848E-06
Ey20	4,3E+01	roll y	1,47383E-06	2,42E-05	rd	8,23E-06 4,848E-06
	8,4	braço Y45		6,20E+04	μm	3,16E-01 1,000E+03
		braço Z12		5,15E+05	μm	3,16E-01 1,000E+03
		braço Z56		7,30E+04	μm	3,16E-01 1,000E+03
		Z	100000 μm			
		Z56	73000 μm			
		Z12	515000 μm			
		Y	150000 μm			
		y45	62000 μm			
		X	150000 μm			
		Δz	1			
		Δy	1			
		Δx	1			
$U_y =$		8,4 μm				

APÊNDICE I

Tabela de cálculo da incerteza da componente volumétrica Ez da MM3C, elaborada pelo programa anexo

tabela - 6.13 capítulo-VI							
	incerteza combinada Uci (μm)	erro geométrico	incerteza padronizada (μm)	erro geométrico	Unidade	incerteza expandida Up, (μm)	coeficiente de sensibilidade Cs
Ez1	7,5E-01	pitch y(x)	4,85E-07	9,21E-06	rd	2,40E-06	4,848E-06
Ez2	3,8E-13	pitch x(y)	4,85E-07	2,08E-05	rd	6,07E-06	4,848E-06
Ez3	1,4E-01	pitch x(z)	0,00E+00	1,99E-05	rd	3,69E-06	4,848E-06
Ez4	4,3E-11	yaw y(z)	1,94E-06	7,27E-06	rd	9,67E-06	4,848E-06
Ez5	5,9E-10	yaw z(x)	4,85E-07	-1,16E-05	rd	6,07E-06	4,848E-06
Ez6	1,5E+00	yaw z(y)	1,45E-06	-6,30E-06	rd	4,87E-06	4,848E-06
Ez7	1,6E+00	posição x	1,7	1,70E+00	μm	1,2	1,000E+00
Ez8	1,9E-04	posição y	0,4	-2,70E+00	μm	1,0	1,000E+00
Ez9	1,6E-04	posição z	0,4	4,80E+00	μm	1,3	1,000E+00
	2,0	ortog xy	5,42991E-05	2,87E-04	μm	4,6	4,848E-06
		ortog xz	0,000242407	2,42E-04	μm	2,8	4,848E-06
		ortog zy	-0,000707828	7,27E-04	μm	3,7	4,848E-06
		retil Xz	0,0002	5,00E-02	μm	1,39E-02	1,000E+00
		retil Xy	0,0008	-3,00E-01	μm	1,39E-02	1,000E+00
		retil Yz	0,0004	2,40E-01	μm	1,27E-02	1,000E+00
		retil Yx	0,0008	-9,00E-02	μm	1,42E-02	1,000E+00
		retil Zx	0,0005	3,00E-02	μm	1,48E-02	1,000E+00
		retil Zy	0,3698	-1,20E-01	μm	1,39E-02	1,000E+00
		roll x	1,79284E-06	1,94E-06	rd	1,40E-05	4,848E-06
		roll y	1,47383E-06	2,42E-05	rd	8,23E-06	4,848E-06
		braço Y45		6,20E+04	μm	3,16E-01	1,000E+03
		braço Z12		5,15E+05	μm	3,16E-01	1,000E+03
		braço Z56		7,30E+04	μm	3,16E-01	1,000E+03
		Z	100000	μm			
		Z56	73000	μm			
		Z12	515000	μm			
		Y	150000	μm			
		y45	62000	μm			
		X	150000	μm			
		Δz	1				
		Δy	1				
		Δx	1				
	Uz =	2,0 μm					