

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

**CALIBRAÇÃO INDIRETA  
DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS  
COORDENADAS**

VAGNER AUGUSTO DE SOUZA

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

**EXEMPLAR REVISADO**

Data de entrada no Serviço: 27 / 10 / 00

Ass.: *Jam*

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



31100016749

ORIENTADOR: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo

São Carlos

2000



Class.	TESE - EESC
Curr.	S5779
Tombo	T0243/00

31100016749

st 1110088

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

S729c Souza, Vagner Augusto de  
Calibração indireta de máquinas de medir a três  
coordenadas / Vagner Augusto de Souza. -- São Carlos,  
2000.

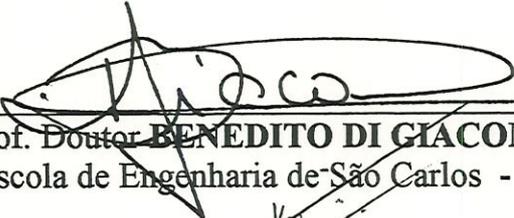
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de  
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.  
Área: Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo.

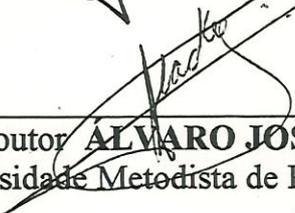
1. Calibração. 2. Máquinas de medir a três  
coordenadas. 3. Transformações homogêneas. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

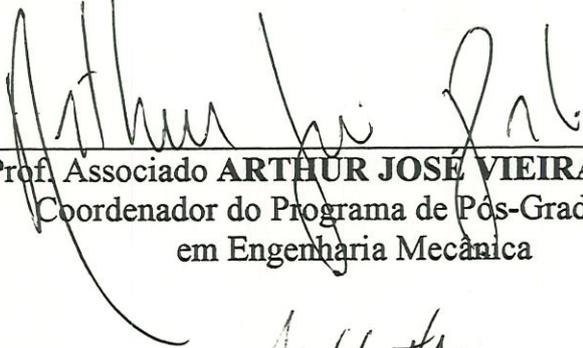
Candidato: Engenheiro **VAGNER AUGUSTO DE SOUZA**

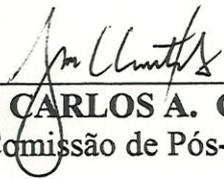
Dissertação defendida e aprovada em 26.05.2000  
pela Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Doutor **BENEDITO DI GIACOMO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Doutor **ÁLVARO JOSÉ ABACKERLI**  
(Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Doutora **DENISE PIZARRO VIEIRA SATO**  
(Associação das Escolas Reunidas de São Carlos - ASSER)

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

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

*Aos meus pais APARECIDO E SANTA.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Benedito Di Giacomo pelos ensinamentos, orientação, apoio, incentivo, paciência e amizade. Serei eternamente grato.

Ao Prof. Dr. Mario Francisco Mucheroni e Prof. Dr. Eduardo Morgado Belo pela amizade e apoio.

Aos colegas Fabricio, Fabricio Flores, Antônio Almeida, Fernando Santoro, Helder, Piratelli, José Claudio, Marcello Dalla, Rosana, Alexandre, Aguinaldo, Luciana Montanari, Fabiana, Beth, Ana Paula, Regina, Luiza Tanegutti, Gislaine pela amizade e apoio manifestado durante o transcorrer do trabalho.

À Kellen Cristina Crivelaro, pela amizade e carinho durante todos esses anos.

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

À Renata Belluzzo Ziroidi, Roberto Tsunaki e Alessandro Marques, pelas sugestões e amizade.

À Rosenda Valdes Arencibia pelo carinho e alegria, pela sinceridade e pela ajuda na conclusão deste trabalho. Muito obrigado.

À Prof. Dr<sup>a</sup> Denise Vieira Sato pelos ensinamentos e amizade.

À Renata Ribeiro pela paciência, afeto e carinho demonstrados durante a elaboração desta dissertação.

À minha amiga Roxana Maria Martinez Orrego pelos ensinamentos, pela amizade e alegria que sempre esteve presente durante o desenvolvimento deste trabalho.

À meus pais, irmãos Adriana, Rosemara, Rosângela e Fernando, meu cunhado Marcílio e sobrinhos Eliane, William, Yara, Bruno e Eduardo. Sempre serei grato à Deus por vocês existirem.

Ao CNPq pela bolsa concedida e ao Departamento de Engenharia Mecânica, Comissão de Pós Graduação e corpo administrativo.

Agradeço a *University North Caroline* pelas fotos 2.11, 2.12 e 2.14 gentilmente concedidas.

E a todos aqueles que por esquecimento ou ausência deixaram de ser citados, os nossos agradecimentos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE SÍMBOLOS .....	vi
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 - FATORES QUE AFETAM O ERRO DE MEDIÇÃO E MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS .....</b>	<b>4</b>
2.1 - TIPOS DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS .....	4
2.2 - FATORES QUE AFETAM O ERRO DE MEDIÇÃO DA MM3C .....	12
2.3 - PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO DESMPENHO DAS MM3Cs .....	19
2.3.1 - MÉTODOS NORMALIZADOS .....	19
2.3.2 - PROCEDIMENTOS COMPARATIVOS E TESTES DE REPETIBILIDADE E REPRODUCIBILIDADE .....	24
2.4 - MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS .....	25
2.4.1 - CALIBRAÇÃO INDIRETA .....	26
2.4.2 - CALIBRAÇÃO DIRETA .....	33
2.4.2.1 - MÉTODOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DIRETA.....	35

<b>3 - ERROS GEOMÉTRICOS E MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS .....</b>	<b>41</b>
3.1- ERROS GEOMÉTRICOS .....	42
3.2 - TEORIA DA MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS	48
3.2.1 - TEORIA DAS TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS EM MM3Cs .....	49
3.3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS .....	59
<b>4 - PROPOSTA PARA A CALIBRAÇÃO INDIRETA DE UMA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS .....</b>	<b>65</b>
<b>5 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS TIPO PONTE MÓVEL .....</b>	<b>71</b>
5.1 - MODELAGEM DA MM3C UTILIZANDO A TÉCNICA DE TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS .....	72
5.2 -CALIBRAÇÃO DIRETA DA MM3C .....	80
5.2.1 - CARACTERÍSTICAS DA MM3C UTILIZADA .....	80
5.2.2 - INSTRUMENTAÇÃO PARA CALIBRAÇÃO DIRETA DA MM3C .....	82
5.2.3 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO .....	85
5.3 - CALIBRAÇÃO INDIRETA DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS .....	98
5.3.1 - DESCRIÇÃO DA CALIBRAÇÃO DA BARRA DE ESFERAS .....	99
5.3.2 - DESCRIÇÃO DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM A BARRA DE ESFERAS .....	102
5.4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO DE SINTETIZAÇÃO DE ERROS .....	105

<b>6 - TESTES EXPERIMENTALES, RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>107</b>
6.1 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS DA MM3C DO TIPO PONTE MÓVEL ..	108
6.1.1 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE POSIÇÃO .....	108
6.1.2 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE RETILINEIDADE .....	111
6.1.3 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS ERROS ANGULARES .....	116
6.1.4 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE ORTOGONALIDADE .....	123
6.2 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA BARRA DE ESFERAS .....	123
6.3 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO INDIRETA .....	125
6.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	127
<b>7 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>130</b>
<b>8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>134</b>

## ANEXOS

<b>1 - ANÁLISE E PROJEÇÃO DO ERRO VOLUMÉTRICO NA DIREÇÃO DE MEDIÇÃO DA BARRA DE ESFERAS .....</b>	<b>137</b>
---	------------

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2: FATORES QUE AFETAM O ERRO DE MEDIÇÃO E MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Figura 2.1	MM3C tipo “Ponte Móvel” .....	5
Figura 2.2	MM3C tipo “Ponte Fixa” .....	6
Figura 2.3	MM3C tipo “Cantilever” .....	7
Figura 2.4	MM3C tipo “Braço Horizontal” .....	8
Figura 2.5	MM3C tipo “Ponte” .....	9
Figura 2.6	MM3C tipo “Modo Duplex” .....	10
Figura 2.7	MM3C tipo “Braço Horizontal com Mesa Móvel” .....	11
Figura 2.8	MM3C tipo “Coluna” .....	11
Figura 2.9	Influência do braço de Abbé .....	13
Figura 2.10	Sonda de Medição .....	14
Figura 2.11	Barra de Esferas .....	26
Figura 2.12	Calibração com Barra de Esferas .....	27
Figura 2.13	Calibração com Barra de Esferas do Tipo FMBB .....	28
Figura 2.14	Placa de Esferas.....	30
Figura 2.15	Placa de Furos.....	30
Figura 2.16	Padrão Tetraédrico .....	31
Figura 2.17	Padrão passo a passo .....	32
Figura 2.18	Padrão de ferro fundido com 24 esferas .....	33
Figura 2.19	Fio tensionado .....	36
Figura 2.20	“Set Up” de medição de retilineidade utilizando interferômetro laser .....	37
Figura 2.21	Medição de ortogonalidade utilizando esquadro mecânico .....	38

Figura 2.22	Calibração do erro “Pitch” do eixo “Z” .....	39
Figura 2.23	Medição do erro de “Roll” utilizando esquadro mecânico .....	40

### **CAPÍTULO 3: ERROS GEOMÉTRICOS E MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS**

Figura 3.1	Máquina de Medir a Três Coordenadas .....	43
Figura 3.2	Os seis erros geométricos .....	44
Figura 3.3	Modelo do erro de ortogonalidade .....	45
Figura 3.4	Calibração hipotética de um dos erros geométricos ...	47
Figura 3.5	Representação do ponto de prova segundo translações do sistema de referência .....	52
Figura 3.6	Rotação $\alpha$ do sistema $(X_1, Y_1, Z_1)$ em torno do eixo “X”	54
Figura 3.7	Rotação $\beta$ do sistema $(X_1, Y_1, Z_1)$ em torno do eixo “Y”	55
Figura 3.8	Rotação $\gamma$ do sistema $(X_1, Y_1, Z_1)$ em torno do eixo “Z”	56
Figura 3.9	Curva normal reduzida .....	61

### **CAPÍTULO 5: DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS TIPO PONTE MÓVEL**

Figura 5.1	MM3C com os respectivos sistemas de coordenadas .	74
Figura 5.2	Representação Vetorial dos caminhos real e ideal.....	75
Figura 5.3	MM3C a ser calibrada .....	80
Figura 5.4	Princípio interferométrico para medir o erro de posição	86
Figura 5.5	Calibração do erro de posição do eixo “X” .....	87
Figura 5.6	Princípio interferométrico da medição do erro de retilidade .....	89
Figura 5.7	Calibração do erro de retilidade do eixo “X” na direção de “Z” .....	90
Figura 5.8	Calibração do erro de retilidade do eixo “Z” na direção de “X” .....	91

Figura 5.9	Princípio interferométrico para medir os erros “Pitch” e “Yaw” .....	92
Figura 5.10	Calibração do erro “Pitch” do eixo “X” .....	93
Figura 5.11	Calibração do erro de “Yaw” do eixo “X” .....	94
Figura 5.12	Princípio de funcionamento do Nível eletrônico .....	95
Figura 5.13	Calibração do erro de “Roll” do eixo “Y” .....	96
Figura 5.14	Técnica da reversão .....	97
Figura 5.15	Calibração do erro de ortogonalidade entre “X” e “Z” ..	98
Figura 5.16	Dimensões da Barra de Esferas .....	100
Figura 5.17	Medição do comprimento total da Barra de Esferas ...	101
Figura 5.18	Medição de uma das esferas na “S.I.P” .....	101
Figura 5.19	Posições de calibração segundo a norma ANSI/ASME B89.....	102
Figura 5.20	Calibração da MM3C com a Barra de Esferas .....	103
Figura 5.21	Barra de Esferas na posição 14 para calibração da MM3C .....	104
Figura 5.22	Projeção dos vetores erro volumétrico na direção da Barra de Esferas .....	106

## CAPÍTULO 6: TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 6.1	MM3C tipo “Ponte Móvel” .....	109
Figura 6.2	Erro de posição do eixo “X” .....	109
Figura 6.3	Erro de posição do eixo “Y” .....	110
Figura 6.4	Erro de posição do eixo “Z” .....	111
Figura 6.5	Erro de retilineidade Vertical do Eixo “X” .....	112
Figura 6.6	Erro de retilineidade Horizontal do eixo “X” .....	113
Figura 6.7	Erro de retilineidade Horizontal do eixo “Y” na direção de “X” .....	114
Figura 6.8	Erro de retilineidade Horizontal do eixo “Y” na direção de “Z” .....	114
Figura 6.9	Erro de retilineidade do eixo “Z” na direção de “Y” .....	115

Figura 6.10	Erro de retilineidade Horizontal do eixo "Z" .....	116
Figura 6.11	Erro angular "Pitch" do eixo "X" .....	117
Figura 6.12	Erro angular "Pitch" do eixo "Y" .....	118
Figura 6.13	Erro angular "Pitch" do eixo "Z" .....	118
Figura 6.14	Erro de rotação "Yaw" em torno do eixo "X" .....	119
Figura 6.15	Erro de rotação "Yaw" devido ao movimento na direção "Y" .....	120
Figura 6.16	Erro de rotação "Yaw" devido ao movimento em "Z" .	121
Figura 6.17	Erro angular "Roll" do eixo "X" .....	121
Figura 6.18	Erro angular "Roll" do eixo "Y" .....	122
Figura 6.19	Resultado gráfico do teste com Barra de Esferas .....	126
Figura 6.20	Comparação entre métodos .....	128

#### **ANEXO 1 - ANÁLISE E PROJEÇÃO DOS VETORES ERRO VOLUMÉTRICO NA DIREÇÃO DE MEDIÇÃO DA BARRA DE ESFERAS**

Figura A1	Representação de uma Barra de Esferas .....	138
Figura A2	Representação do Erro Volumétrico e suas componentes escalares .....	139
Figura A3	Ângulos diretores da Barra de Esferas .....	140
Figura A4	Projeção do Erro volumétrico na direção de medição da Barra de Esferas .....	143

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Tipos de erros em MM3Cs e suas notações .....	46
Tabela 5.1	Informações Técnicas sobre a MM3C tipo “Ponte Móvel”	81
Tabela 5.2	Características dos instrumentos para medição dos erros de posição .....	83
Tabela 5.3	Características dos instrumentos para medição dos erros angulares .....	83
Tabela 5.4	Instrumentação para medição dos erros de retilidade e ortogonalidade .....	84
Tabela 5.5	Instrumentação utilizada na calibração dos Erros....	85
Tabela 6.1	Resultados da calibração dos erros de ortogonalidade .....	123
Tabela 6.2	Resultados da calibração da Barra de Esferas .....	124
Tabela 6.3	Resultado da Calibração Indireta .....	125
Tabela 6.4	Resultado da Calibração Direta .....	127
Tabela 6.5	Tabela de comparação entre métodos .....	128

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $E_v$  - Erro volumétrico da MM3C.
- $E_x, E_y, E_z$  - Componentes do erro volumétrico da MM3C, na direção dos eixos "X", "Y" e "Z".
- $E_{bi}$  - erro de medição pelo método indireto.
- $E_{bd}$  - erro de medição pelo método direto.
- $E_{b1}$  - projeção do erro volumétrico do centro da primeira esfera.
- $E_{b2}$  - projeção do erro volumétrico do centro da segunda esfera.
- [E] - erro total da máquina.
- [e] - vetor.
- Erro - erro de posição.
- $D_1$  - diâmetro da esfera 1.
- $D_2$  - diâmetro da esfera 2.
- L - distância entre centros das esferas.
- $L_0$  - distância entre as extremidades da barra de esferas.
- [Maq] - matriz que representa o caminho da peça.
- $V_{mm}$  - valor medido pela máquina.
- $V_b$  - valor do padrão.
- $V_i$  - valor indicado pelo laser.
- $V_d$  - valor encontrado através das equações de desalinhamento.
- $V_{etsonda}$  - caminho da sonda.
- $V_{etpeça}$  - caminho da peça.
- $\chi^2$  - variável aleatória Qui-quadrado.
- $\bar{x}$  - média de uma amostra.
- s - desvio padrão amostral.
- $\mu$  - média de uma população.
- $\sigma$  - desvio padrão de uma população.
- n - número de observações de uma amostra.
- $n_e$  - freqüências esperadas ou teóricas.
- $n_o$  - freqüências observadas.
- N - número de observações de uma população.

- $R_1$  – repetibilidade unidirecional.  
 $Y$  – função densidade de probabilidade.  
 $\alpha$  - rotação do sistema em torno do eixo “X”.  
 $\beta$  - rotação do sistema em torno do eixo “Y”.  
 $\gamma$  - rotação do sistema em torno do eixo “Z”.  
 $U_i$  – erro de histerese.  
 $\bar{\bar{X}}$  - erro sistemático.  
 $Ps_i$  – erro aleatório.  
 $\bar{u}$  - vetor no espaço.  
 $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$  - vetores unitários.  
 $Q$  – ponto no espaço.  
 $T$  – matriz de transformação homogênea.  
 $T_{mov}$  - matriz de translação.  
 $T_{fixa}$  - matriz de translação pura.  
 $T_{pr}$  - matriz de translações infinitesimais.  
 $Rot(X, \alpha)$  – matriz de rotação em torno do eixo “X”.  
 $Rot(X, \beta)$  – matriz de rotação em torno do eixo “Y”.  
 $Rot(X, \gamma)$  – matriz de rotação em torno do eixo “Z”.  
 $M_{rot}$  – matriz que representa as rotações infinitesimais.  
 $Orto(x, y, z)$  – matriz de ortogonalidade.  
 $M_{erro}$  – matriz erro.  
 $\delta x(x)$  – erro de posição do eixo “X”.  
 $\delta y(y)$  – erro de posição do eixo “Y”.  
 $\delta z(z)$  - erro de posição do eixo “Z”.  
 $\delta y(x)$  – erro de retilineidade do eixo “X” na direção “Y”.  
 $\delta z(x)$  – erro de retilineidade do eixo “X” na direção “Z”.  
 $\delta x(y)$  – erro de retilineidade do eixo “Y” na direção “X”.  
 $\delta z(y)$  – erro de retilineidade do eixo “Y” na direção “Z”.  
 $\delta x(z)$  – erro de retilineidade do eixo “Z” na direção “X”.  
 $\delta y(z)$  – erro de retilineidade do eixo “Z” na direção “Y”.  
 $\epsilon y(x)$  – erro pitch do eixo “X”.

$\varepsilon_x(y)$  – erro pitch do eixo “Y”.

$\varepsilon_x(z)$  – erro pitch do eixo “Z”.

$\varepsilon_z(x)$  – erro yaw do eixo “X”.

$\varepsilon_z(y)$  – erro yaw do eixo “Y”.

$\varepsilon_y(z)$  – erro yaw do eixo “Z”.

$\varepsilon_x(x)$  – erro roll do eixo “X”.

$\varepsilon_y(y)$  – erro roll do eixo “Y”.

$\varepsilon_z(z)$  – erro roll do eixo “Z”.

$\varepsilon_{z0}$  – erro de ortogonalidade entre os eixos “X” e “Y”.

$\varepsilon_{y0}$  – erro de ortogonalidade entre os eixos “X” e “Z”.

$\varepsilon_{x0}$  – erro de ortogonalidade entre os eixos “Z” e “X”.

$\rho$  - ângulo diretor da Barra de Esferas com o eixo “X”.

$\xi$ - ângulo diretor da Barra de Esferas com o eixo “Y”.

$\eta$ - ângulo diretor da Barra de Esferas com o eixo “Z”.

$\lambda$  - vetor unitário.

## RESUMO

SOUZA, V. A. *Calibração Indireta de Máquinas de Medir a Três Coordenadas*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2000.

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) possuem erros inerentes à sua estrutura que afetam a acuracidade e a repetibilidade das medições. Dos erros presentes nestas máquinas, os erros geométricos são, na maioria das vezes, os de maior influência. Para caracterizar esses erros procedimentos de avaliação das MM3Cs fazem uso de processos de calibração direta e indireta. A calibração indireta utiliza artefatos padrões pré-qualificados e normalizados, considerados mais rápidos e econômicos. Este trabalho tem por objetivo calibrar indiretamente uma MM3C do tipo “Ponte Móvel” utilizando uma Barra de Esferas e seus resultados comparados com o método da Sintetização de erros. Envolve a medição de uma Barra de Esferas em 20 posições e orientações diferentes no volume de trabalho da máquina, conforme a norma ANSI/ASME B 89 4.1, 1995. A distância entre os centros das esferas foi calculada e comparada à distância padrão determinando o erro da máquina nas posições em que a Barra de Esferas foi medida. Posteriormente, as coordenadas dos centros das esferas foram sintetizadas no volume de trabalho da MM3C utilizando as equações de sintetização que foram obtidas através do uso de técnicas de Transformação Homogêneas. Os resultados obtidos foram comparados, demonstrando que ambos os métodos apresentam resultados similares, porém, a calibração utilizando uma Barra de Esferas é mais rápida e econômica. Por sua parte o método de sintetização de erros necessita de equipamentos mais sofisticados.

**Palavras-chaves:** Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs), calibração, transformação Homogênea.

## ABSTRACT

SOUZA, V. A. Indirect Calibration of Three Coordinates Measuring Machines. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2000.

The measurement accuracy and the repeatability of Three Coordinates Measuring Machines (3CMM) are affected by several errors sources. Those CMM errors are characterized through calibration procedures that can be divided in direct and indirect calibration methods. The indirect calibration uses standards artifacts as reference and usually it is faster and more economic than the direct calibration. The two direct methods are known as synthetization method and the grid method. They have as main objective the determination of the machine volumetric errors. In this work a "Moving Bridge" CMM was indirectly calibrated using as reference Ball Bars. The results of this calibration were compared with those obtained with the synthetization method. The Ball Bars was measured in 20 (twenty) positions and orientations within the machine working volume. The measurement positions are recommended by the ANSI / ASME B89 4. 1. The distance between the centers of the spheres of Ball Bars was calculated and compared with the calibrated distance of the Ball Bars. In this way, the machine error for each measured position was determined. Further, the volumetric error of center coordinates of spheres were determined using the errors synthetization equations obtained with the application of homogenous transformation techniques. The comparison showed that the results of both calibrations method are very similar. The indirect calibration with the Ball Bars is, however, cheap and faster than the direct calibration that needs sophisticated measurement equipment.

**Keywords:** Three Coordinate Measuring Machines (3CMM), calibration, homogenous transformation.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

A qualidade da produção mecânica sempre estará ligada à busca por tolerâncias cada vez mais apertadas, obrigando a indústria em meio a este mercado globalizado a investir em tecnologias na procura por meios mais efetivos para o controle dimensional. A inovação tecnológica das máquinas ferramentas, somado ao crescente aumento da produção e da qualidade dos produtos, faz surgir a necessidade de se construir ou aperfeiçoar sistemas de medição que possam avaliar com grande rapidez e acuracidade as mais diversas dimensões estruturais.

Um dos mais nobres, versáteis e poderosos instrumentos de medição que supre às necessidades apresentadas pela indústria no controle de qualidade de peças manufaturadas é a Máquina de Medir a Três Coordenadas.

Desde a sua introdução em 1959 as Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) destacam-se entre os instrumentos metrológicos convencionais por possuírem alta acuracidade, grande volume de inspeção, rapidez e flexibilidade. Possuindo basicamente três eixos ortogonais entre si, geram um sistema de coordenadas cartesianas e apresentam sistemas de identificação de coordenadas através de sondas e escalas. As MM3Cs provém dessa maneira um

meio físico para o mapeamento das características de uma forma qualquer, viabilizando o processo de inspeção com alta acuracidade.

Estas máquinas porém, dependendo da qualidade de seus sistemas, apresentam graus de acuracidade diferenciados que podem comprometer o resultado de uma medição. A qualidade recai então, principalmente sobre a montagem dos três eixos ortogonais e nos erros inerentes aos componentes individuais da MM3C derivados dos seus processos de fabricação, chamados de erros geométricos. Tudo isso, somado ao braços de Abbè e outras pequenas fontes de erros, contribuem para o erro total que influencia na medição final de uma peça.

As fontes desses erros e a busca por soluções para minimizá-los tornaram-se uma preocupação de âmbito mundial para os metrologistas. O desafio para o desenvolvimento de um método que possa avaliar sistematicamente, com rapidez e acuracidade o desempenho metrológico das MM3C, persiste até hoje.

Sabe-se que a calibração avalia o comportamento metrológico dessas máquinas. Porém alguns métodos de calibração visam avaliar os erros das máquinas individualmente, elevando o custo e tempo de calibração. Outros métodos determinam o erro total da máquina através de artefatos padrões, estes são mais rápidos e baratos.

É com essa visão que esse trabalho tem como objetivo calibrar uma Máquina de Medir a Três Coordenadas de acordo com um método normalizado e comparar os resultados obtidos utilizando um método de calibração direta. O método normalizado é proposto pela norma ANSI/ASME B89.4.1, 1995 que especifica a medição de uma Barra de Esferas padrão em vinte posições diferentes no volume de trabalho de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas.

A comparação dos resultados obtidos através do método proposto foi feita com os resultados encontrados utilizando-se um método de calibração direta, a citar, o método da sintetização de erros que utiliza técnicas matemáticas e instrumentos de calibração mais avançados, caros e relativamente demorados.

Uma pesquisa bibliográfica abrangente e minuciosa no campo da metrologia das medições a três coordenadas está exposta no capítulo dois donde se procurou selecionar as informações dos trabalhos que pudessem contribuir para o desenvolvimento do objetivo proposto. Um estudo dos erros das MM3Cs, dos procedimentos de avaliação desses erros e dos métodos de calibração das máquinas, tiveram uma atenção especial na busca do estado da arte.

No capítulo três apresenta-se toda a teoria necessária para o desenvolvimento da dissertação e as ferramentas estatísticas utilizadas para a análise dos dados experimentais.

O capítulo quatro apresenta a proposta do trabalho a qual é calibrar uma MM3C do tipo Ponte Móvel com uma Barra de Esferas padrão. As etapas envolvidas para a efetivação da proposta também são apresentadas.

O desenvolvimento da metodologia está descrita no capítulo 5 em quatro etapas; na primeira etapa um modelo cinemático da Máquina de Medir a Três Coordenadas do Tipo Ponte Móvel foi elaborado utilizando-se a técnica de transformações homogêneas, colocando em evidência a necessidade de se calibrar cada erro geométrico presente nas equações de sintetização formuladas. Os procedimentos de calibração desses erros também estão descritos na segunda etapa neste capítulo. Por sua parte, a terceira etapa expõe a calibração da Barra de Esferas feita na máquina universal de medir "S.I.P" e a calibração da MM3C utilizando-se a Barra de Esferas padrão. Na quarta e última etapa descreve-se a aplicação do método de sintetização.

No capítulo seis são apresentados e discutidos os resultados individuais de cada método e o resultado da comparação entre o método proposto e o método da sintetização de erros.

As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são relatadas no capítulo sete desta dissertação.

## **CAPÍTULO 2**

### **FATORES QUE AFETAM O ERRO DE MEDIÇÃO E MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS.**

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas são extensamente usadas como o equipamento mais universal de inspeção e controle de qualidade na manufatura industrial (*Park et al.,1991*). Com a aproximação do novo milênio a tendência à tolerâncias cada vez mais apertadas e superfícies pretendidas mais próximas da ideal, faz da MM3C o instrumento ideal para enfrentar essa situação (*Hocken, 1991*). As mais diversas dimensões e formas a serem inspecionadas induzem o surgimento de várias configurações de máquinas no mercado. Essa diversidade, de projeto, flexibilidade e acuracidade são os requisitos primordiais que devem ser muito bem analisados pelo futuro usuário durante avaliação da relação custo-benefício.

#### **2.1- TIPOS DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS**

A Norma Americana *ASME B89.4.1,1995* classifica as máquinas de medir em 11 tipos distintos porém, neste trabalho, estão apresentados apenas oito tipos, representando os mais importantes e comuns disponíveis no mercado. As demais são pequenas variações dos modelos aqui relacionados.

### ➤ Tipo Ponte Móvel

A máquina de medir tipo Ponte Móvel apresenta-se como a configuração mais utilizada no meio industrial. Seu projeto consta de uma ponte que translada sobre mancais aerostáticos, que pôr sua vez carrega, sobre a viga horizontal um outro carro que transporta a sonda.

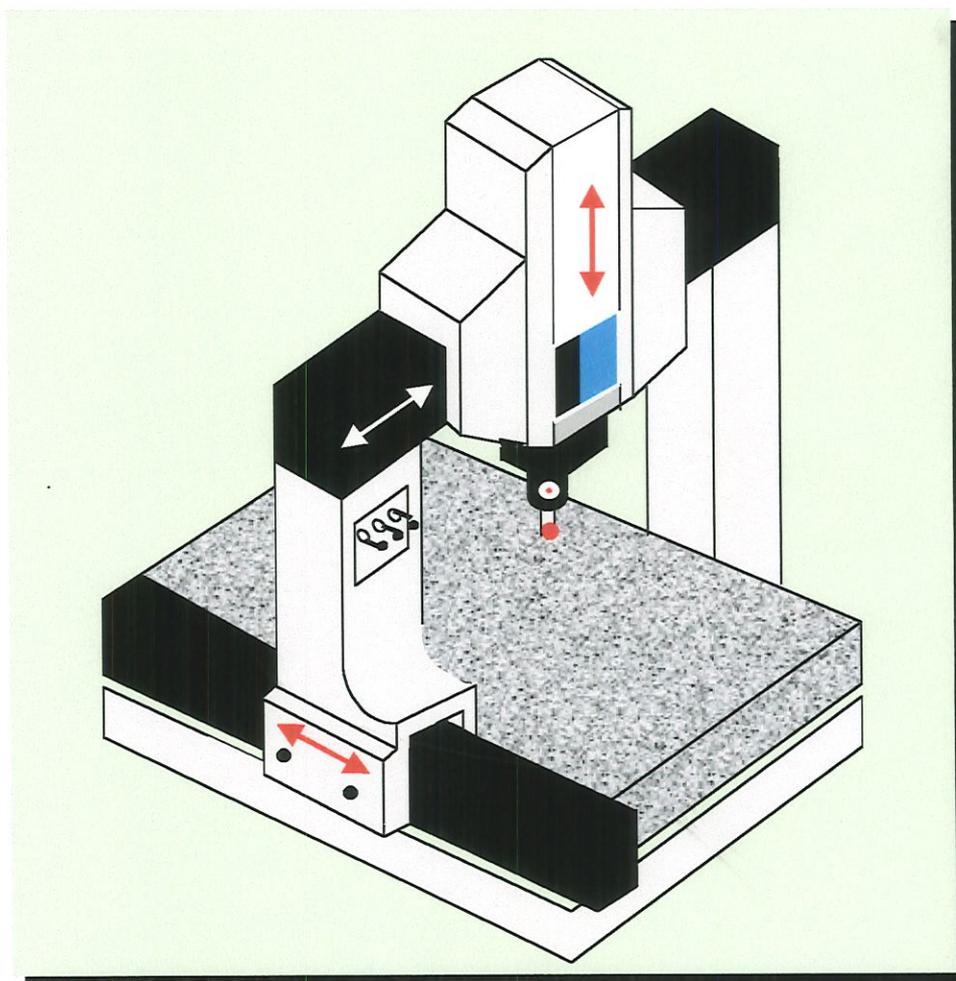


Figura 2.1: MM3C tipo Ponte Móvel.

### ➤ Tipo Ponte Fixa

Nesta configuração a ponte permanece fixa na estrutura da máquina e a mesa, onde a peça a ser medida é colocada, possui movimento. Este projeto busca minimizar os efeitos de “Yaw” e reduz consideravelmente o erro de Abbè, pois as escalas estão localizadas na posição central da mesa na mesma direção do movimento. As MM3Cs do tipo Ponte Fixa tem suas limitações como o peso da peça a ser medida e as dimensões das guias.

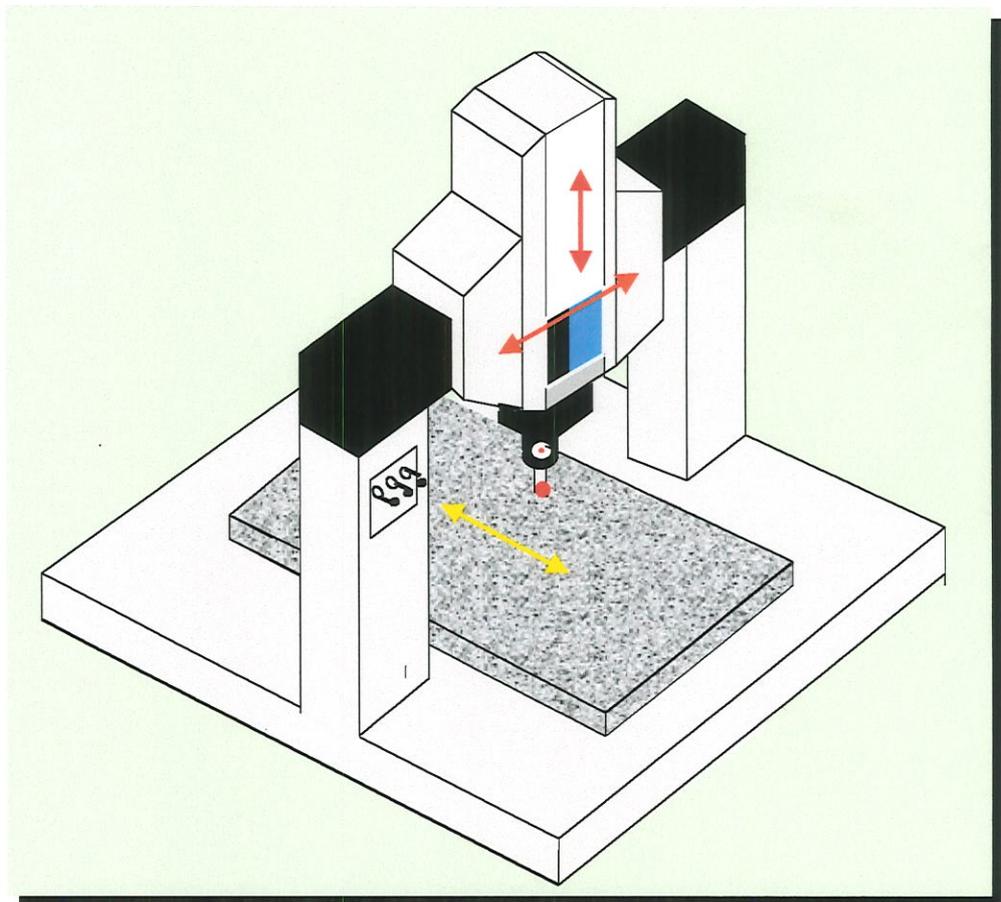


Figura 2.2: MM3C tipo Ponte Fixa.

### ➤ Tipo Cantilever

A máquina do tipo Cantilever possui um carro que transporta uma viga engastada ortogonalmente a ele, o qual é responsável pelo

movimento do carro que transporta a sonda. A peça a ser medida é colocada sobre a base da máquina, obtendo bom desempenho na medição de peças pesadas, pois elas poderiam afetar a acuracidade das medições. As máquinas do tipo Cantilever oferecem pequena faixa de medição em dois eixos, porém, particularmente, são adequadas para a medição de peças longas (ASME B89.4.1,1995)

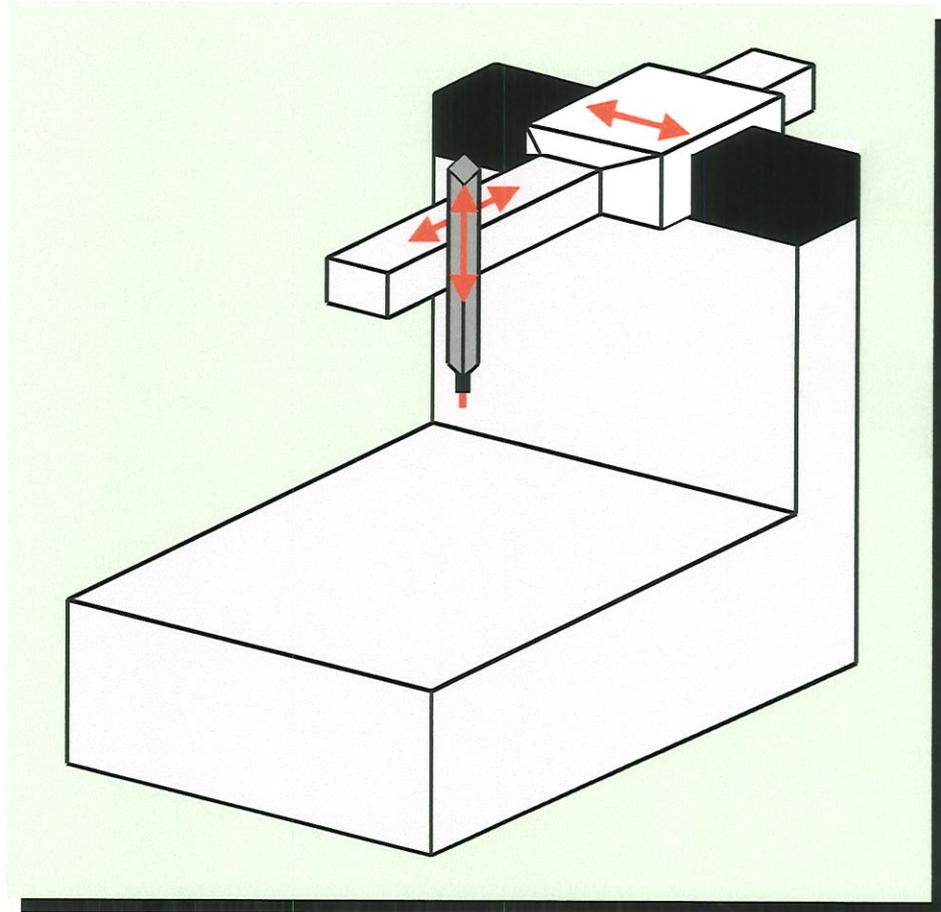


Figura 2.3: MM3C tipo Cantilever.

#### ➤ Tipo Braço Horizontal

Altas velocidades e versatilidade nas medições são características deste projeto. Geralmente um dos eixos é muito extenso comparado com os demais.

Apesar de grande versatilidade sua estrutura promove a presença de grandes braços de Abbè. Outra observação pode ser feita ao eixo responsável pela identificação da peça, devido seu grande comprimento a força da gravidade provoca flexão desse braço, contribuindo dessa forma para a falta de acuracidade, porém, esse fator pode ser corrigido utilizando um método de compensação de erros via programa computacional.

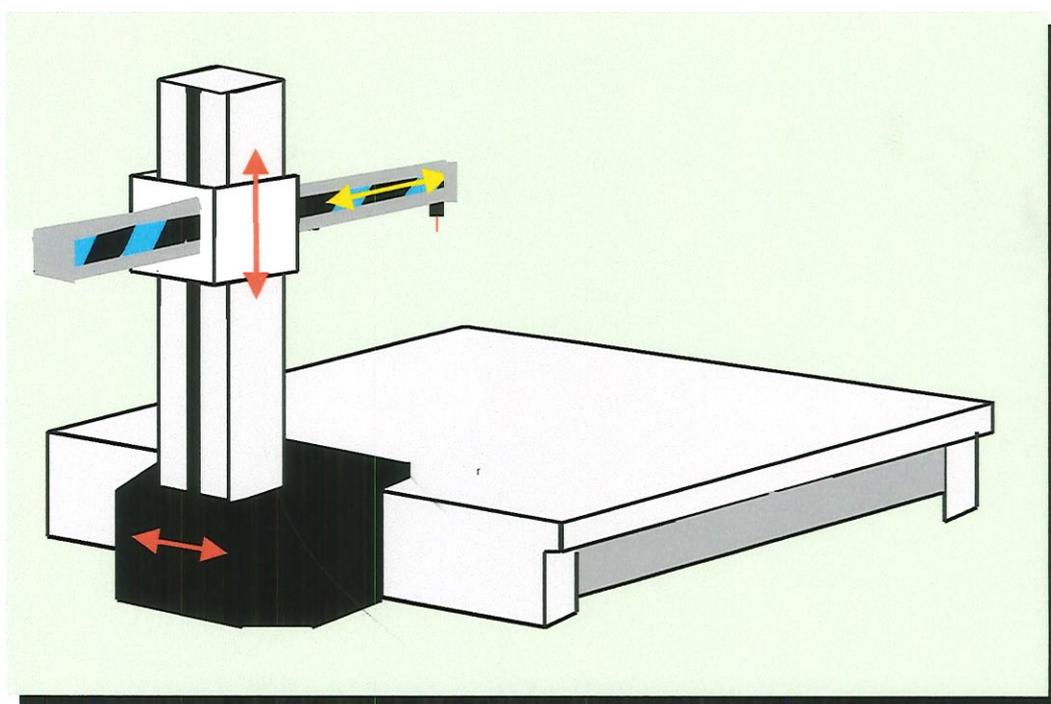


Figura 2.4: MM3C do Tipo Braço Horizontal.

### ➤ Tipo Pórtico

Para medições de estruturas muito grandes essa configuração é ideal, pois ela se apresenta com volume de medição superior a 10 metros cúbicos ou mais.

Cuidados devem ser tomados para a instalação e monitoramento da máquina, a fundação deve permitir a fixação de uma estrutura rígida para limitar efeitos de torção e vibrações, dois sistemas de controle são necessários para controlar os mancais que

se deslocam paralelamente e em sincronismo, os quais podem proporcionar erros de “Yaw”.

Os custos que envolvem o sistema podem ser considerados grandes devido a dois fatores: envolvem o controle simultâneo do sistema de mancais e os gastos com a adequação para fixação das vigas são consideravelmente altos.

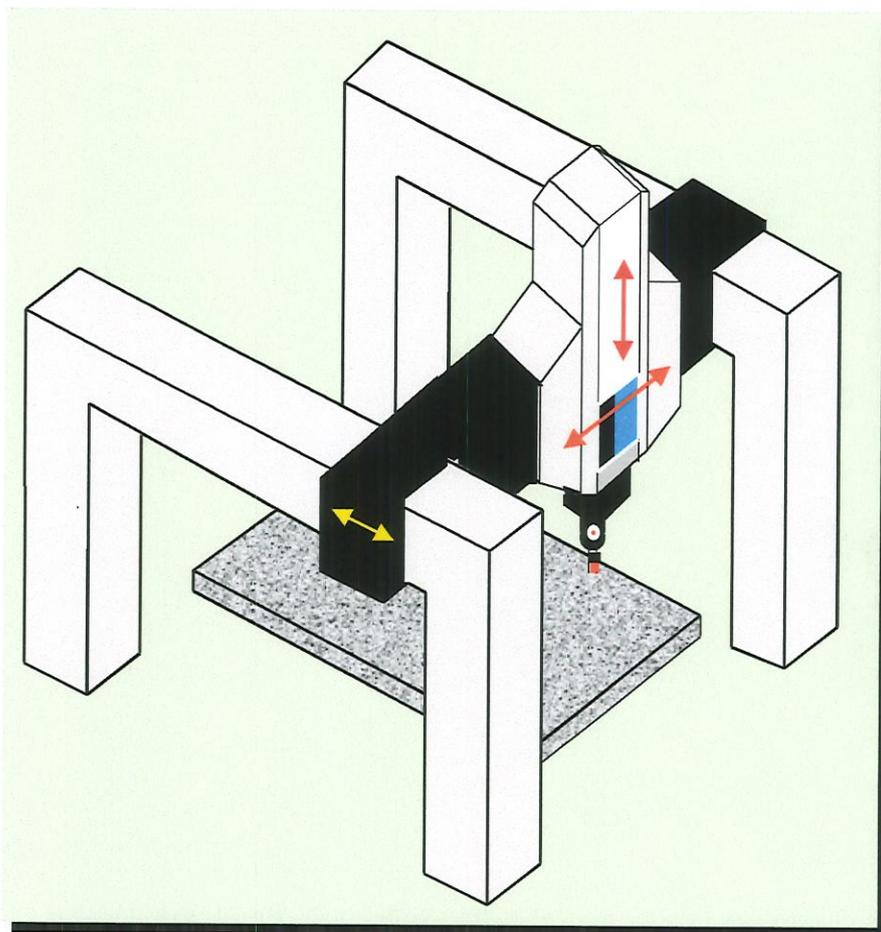


Figura 2.5: MM3C tipo Ponte.

### ➤ Tipo Modo “Duplex”

Este tipo de máquina na verdade são duas máquinas de medir que possuem a base em comum e têm definidas a relação entre seus sistemas de coordenadas. O acesso a medição é feito por dois braços horizontais móveis que transportam as sondas.

Na figura abaixo uma MM3C tipo modo "Duplex".

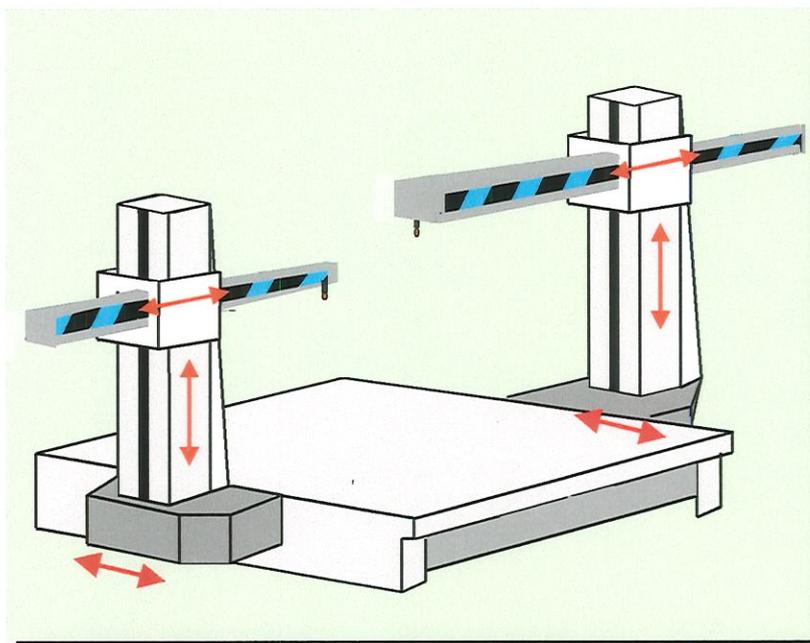


Figura 2.6: MM3C Modo "Duplex".

#### ➤ Tipo Braço Horizontal com Mesa Móvel

A máquina tipo Braço Horizontal com mesa móvel explora três componentes móveis que transladam com movimentos mutuamente perpendiculares. A sonda é fixada ao braço horizontal móvel o qual é suportado perpendicularmente por uma viga que também é responsável por um dos movimentos. A peça a ser medida é então colocada sobre a mesa que representa a terceira componente móvel. A Figura 2.7 mostra esse tipo de máquina e a direção dos movimentos.

#### ➤ Tipo Coluna

Uma MM3C do tipo Coluna é constituída por duas mesas sobrepostas uma sobre a outra explorando movimentos perpendiculares entre si. A mesa superior suporta a peça a ser

identificada pela sonda, fixada sobre o braço vertical que se desloca perpendicularmente em relação as mesas.

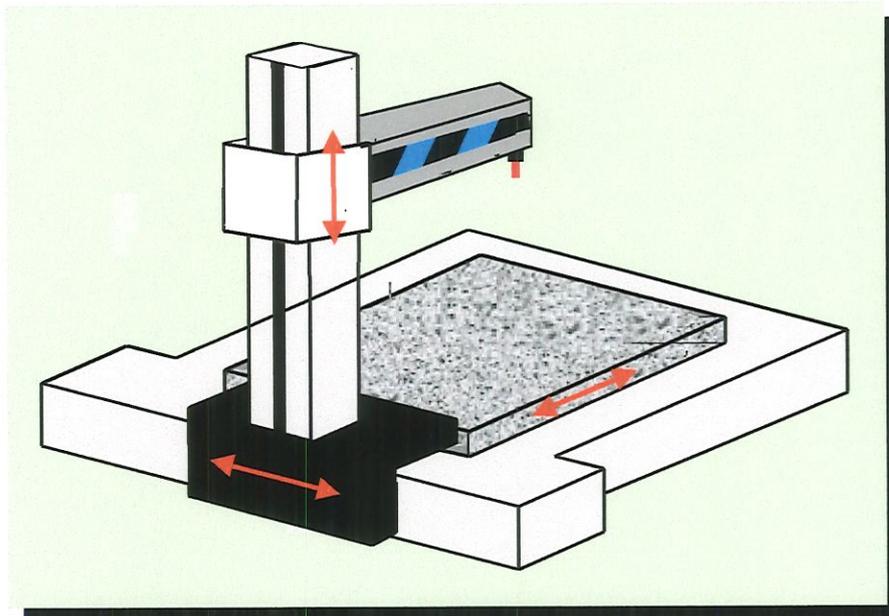


Figura 2.7 : MM3C tipo Braço Horizontal com Mesa Móvel

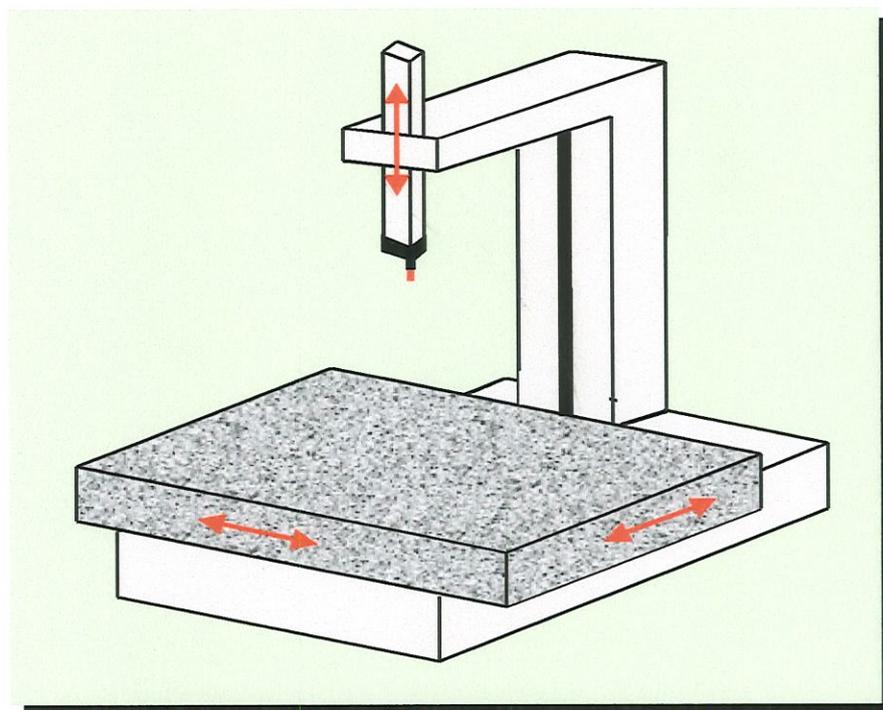


Figura 2.8: MM3C tipo Coluna.

## 2.2- FATORES QUE AFETAM O ERRO DE MEDIÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas são caracterizadas por possuir uma estrutura rígida acompanhada de um sistema de escalas e sonda que tem a finalidade de identificar coordenadas cartesianas no espaço de trabalho.

Como qualquer instrumento metrológico, as máquina de medir apresentam erros que afetam a qualidade final da medição dos produtos industrializados. Portanto, é necessário que periodicamente seu desempenho seja avaliado, isto é, que seja determinados os seus erros e providências para sua minimização sejam tomadas.

O erro nas medições a três coordenadas é resultado da influência de fatores que agem interna ou externamente sobre todo o sistema máquina de medir. Abaixo estão descritas as principais fontes de erros das Máquinas de Medir a Três Coordenadas.

### ➤ Erro de Abbè

O princípio de Abbè foi publicado pela primeira vez em 1890 no *Journal for Instrumental Information* vol. 1, que discute as vantagens de se alinhar a escala de medida com o deslocamento a ser medido (*Bryan, 1979*). Esse conceito é considerado o primeiro princípio da metrologia dimensional e do projeto de máquinas de medir e ferramentas.

Bryan formulou uma outra versão do princípio de Abbè, uma abordagem mais geral, para o caso onde o princípio não pode ser obedecido, ou seja, quando não é possível estar o sistema de medição alinhado com o deslocamento a ser medido (*Bryan, 1979*). O princípio reformulado diz o seguinte:

“O sistema de medição deve estar alinhado com o ponto funcional, onde o deslocamento é medido. Se isto não for possível, todas as guias que transferem o deslocamento devem estar livres de

movimentos angulares ou os dados do movimento angular devem ser usados para compensar os desvios ocorridos”. Na Figura 2.9, pode-se visualizar a concordância e a transgressão do princípio de Abbè respectivamente.

Nas Máquinas de Medir a Três Coordenadas observa-se que o ponto funcional corresponde ao apalpador da sonda e em nenhum instante, para qualquer configuração de MM3Cs, estará alinhado com as três escalas simultaneamente. As distâncias fixas entre o ponto funcional e as escalas são chamadas de braços de Abbè.

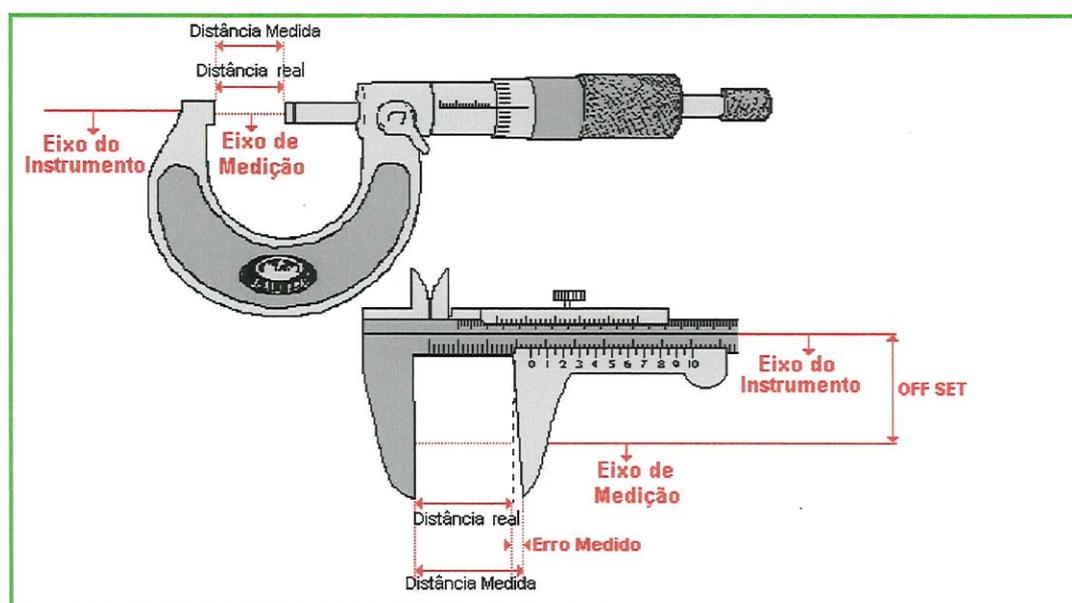


Figura 2.9: Influência do Braço de Abbè.

### ➤ Erro devido ao sistema da sonda

As sondas são responsáveis pela identificação dos pontos da superfície de uma peça, e contribuem também por uma grande parcela de erros ocorridas durante um processo de medição.

Existem no mercado vários tipos de sondas que podem ser caracterizadas segundo o contato entre a sonda e a peça. As mais comuns utilizadas são as sondas de contato, chamadas de “Touch-Trigger” que em contato com a peça liberam um sinal elétrico com-

gelando as coordenadas dos pontos lidas pela escala no momento disparo (Yang et al,1996). Estas sondas possuem a capacidade de adaptação de vários tipos de serviços permitindo a utilização de vários tipos de hastes no momento da medição e assim uma maior versatilidade e rapidez na avaliação das peças medidas. Podem-se dividir as sondas tipo “Touch” em três partes, corpo, haste e apalpador observados na Figura 2.10.



Figura 2.10: Sonda de medição.

Muitas são as variantes que influenciam o resultado das medições com sondas do tipo “Touch”, podendo-se relacionar as mais influentes (Yang et al,1996):

- ◇ a força exercida sobre a sonda durante a medição, ainda que pequena, pode causar uma deformação elástica do apalpador e fletir a haste;
- ◇ o comprimento da haste e velocidade de medição também são fontes de erro no sistema da sonda, haja visto, que comprimentos grandes da haste implicam no aumento dos braços de Abbè e distorções da mesma durante o contato com a peça;
- ◇ o deslocamento da MM3C entre a posição de contato da peça e do “Trigger” (distância pré-travel) variam entre as sondas. Esse fato somado às irregularidades geométricas do apalpador (efeito de lóbulo) provocam erros consideráveis nas medições.

Estes erros, porém, são geralmente sistemáticos e muitos métodos podem ser aplicados para avaliá-los (*Yang et al, 1996*). Apesar disso, uma prática utilizada para um bom desempenho da sonda, consiste na seleção de comprimentos curtos da haste, alta dureza do apalpador, controle das forças de contato (entre o apalpador e a peça) e boa estratégia de medição.

#### ➤ **Fatores relacionados à peça**

As imperfeições geométricas da peça e suas características físicas, como peso e dureza contribuem para o erro total de uma medição.

O peso da peça sobre a mesa da máquina causa deformações estruturais em todo sistema provocando erros. Alguns tipos de máquinas possuem um projeto melhor para enfrentar esses problemas. Apoios adequados e colocados em lugares estratégicos podem minimizar as deformações na estrutura, por outro lado os erros relacionadas com dureza e acabamento final das peças podem ser evitados com boas estratégias e baixas velocidades de medição.

#### ➤ **Fatores relacionados às imperfeições na estrutura da MM3C e montagem entre sistemas**

Os erros de forma, que vem do processo de fabricação de cada componente da estrutura das máquinas de medir, constituem a maior e mais relevante fonte de erros de uma medição. Este erros são definidos como erros geométricos e produzem durante a translação dos eixos, movimentos indesejáveis em outras direções além da preferencial. Eles são em geral sistemáticos e há várias técnicas para avaliá-los e compensá-los (*Slocum, 1992; Burdekin et al., 1981*).

Na literatura, os erros geométricos, são classificados como erros paramétricos e não paramétricos. Os paramétricos são aqueles

que podem ser avaliados individualmente e parametrizados na posição pois dependem desta, enquanto os não paramétricos dependem da relação entre os eixos da máquina e não podem ser parametrizados na posição.

Durante a montagem da estrutura das MM3Cs se busca uma ortogonalidade perfeita, porém é sabido que isto é praticamente impossível. A falta de ortogonalidade entre cada par de eixo contribui para a falta de acuracidade do sistema, contudo elas podem ser deduzidas algebricamente, calibradas e corrigidas por um método de compensação de erros (*Di Giacomo, 1986*).

### ➤ **Fatores ambientais**

As Máquinas de Medir à Três Coordenadas apresentam erros relacionadas às variações no comportamento térmico e dinâmico do ambiente e da própria máquina que comprometem a medição.

O sistema de medição à três coordenadas deve estar desprovido da ação dos efeitos dinâmicos provocado pelo sistema ou por variantes externas. As vibrações do meio próximo à máquina, bem como o não controle da massa de ar que flui para os mancais provocam vibrações na estrutura da máquina e na peça, acarretando a não identificação adequada da posição medida e dificultando ainda a leitura das posições nas escalas.

Os erros térmicos são também fontes importantes de erros em MM3Cs. Como geralmente as MM3Cs são construídas por diferentes materiais, granito, aço, alumínio, a variação do coeficiente de expansão térmica provocará diferentes dilatações na estrutura da máquina promovendo falta de acuracidade nas medições durante variações de temperatura (*Lingard et. al., 1991*). As fontes térmicas típicas de uma MM3Cs são os sistemas eletrônicos, condições do ar que alimentam os mancais, iluminação, operador etc.

*Traped e Waldele, 1991*, fizeram estudos através da aplicação da técnica de elementos finitos para prever as distorções de uma

mesa de granito de uma MM3C. Os resultados mostraram uma distorção da ordem de 10  $\mu\text{m}$  para uma variação de 0.5 graus celsius de temperatura.

A redução das distorções mecânicas em MM3Cs causadas por temperaturas não uniformes tem sido objeto de estudo de metrologistas do mundo todo os quais procuram desenvolver técnicas que minimizem os erros de origem térmica (*Balsamo et al., 1990*).

Em geral os erros nas medições promovidas pelos efeitos térmicos das máquinas de medir podem ser minimizados através de:

- melhoria no projeto da estrutura e da localização das fontes de calor.
- controle térmico e de umidade do ambiente.
- correção em tempo real de deformação, via “software”, baseado nas medições de distribuição de temperatura e nos modelos de correção de temperatura para deformação.

Apesar das pesquisas feitas até hoje Bryan (*J. Bryan, 1990*) comenta que: “Os efeitos térmicos ainda são os grandes causadores de erros e de não repetibilidade das máquinas e instrumentos de medição”.

### ➤ **Erros influenciados pelos programas computacionais da MM3C**

Um elemento de fundamental importância nas Máquinas de Medir à Três Coordenadas são os programas computacionais.

Segundo *Weckenmann et al., 1985*, estes programas são responsáveis;

- ◇ pela obtenção das coordenadas das escalas a cada sinal de “Trigger” emitido pela sonda e compensação das coordenadas, do diâmetro do apalpador, e armazenagem em memória;

- ◇ pela avaliação dos dados da medição, isto é, a medição em uma MM3C não é feita diretamente, os pontos coordenados da superfície da peça identificados pela sonda são guardados em memória e servem de dados de entrada nos programas de ajuste das curvas que são os responsáveis por tomar esses pontos e traçar por dentre eles o melhor perfil que se ajusta no modelo da peça (mínimos quadrados, mínima zona etc.);

*Weckenmann et al., 1985* consideram dois métodos para avaliar os programas computacionais utilizados na medição a três coordenadas. O primeiro visa comparar o resultado da medição de um padrão com os resultados obtidos durante a medição de uma peça, o outro avalia os programas computacionais sem o uso da máquina (Padrão Volumétrico Virtual), que consiste na geração de pontos coordenados imaginários da superfície de uma peça e analisar os resultados obtidos a partir daquelas coordenadas.

De uma maneira geral programas computacionais de baixa qualidade cujos algoritmos não sejam otimizados podem propagar erros de forma bastante severa, isto acontece muito freqüentemente nos programas feitos para análise geométrica.

### ➤ **Outros efeitos**

A qualidade do ar, como umidade e poeira comprometem o sistema de medição. O excesso de umidade degrada as guias e prejudica o bom desempenho dos mancais, aumentando o atrito eventual entre o mancal e a guia, acelerando o desgaste (*ASME B89.4.1 – 1995*). Filtros de ar, secadores e as limpezas constantes na Máquina minimizam esses fatores, possibilitando assim medições mais precisas e o aumento do tempo de vida útil da máquina.

## **2.3- PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS**

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas revolucionaram a metrologia dimensional e tornaram-se parte integrante do processo de garantia da qualidade, pois permitem baixos custos de inspeção e aumento da produtividade. Desde o surgimento da primeira máquina de medir a quarenta anos atrás, fabricantes e usuários vem demonstrando um grande interesse para compreender e avaliar o desempenho das MM3Cs. A influência de diversos tipos de erros e a mudança do comportamento metrológico da máquina com o passar do tempo, coloca a acuracidade da máquina e eficiência dos métodos de avaliação de desempenho como elementos primordiais de pesquisa.

Esse fato promoveu as Organizações Nacionais e Internacionais bem como alguns institutos e companhias em desenvolver diferentes procedimentos para avaliar o desempenho das MM3Cs. Estes procedimentos são classificados de acordo com o critério de avaliação dos testes e são divididos em (*Bosch, J. A., 1995*): procedimentos normalizados, procedimentos comparativos e testes de repetibilidade e reprodutibilidade, modelagem matemática e testes de avaliação de desempenho (interim testing). Muitos desses procedimentos são totalmente ou parcialmente baseados em medições de blocos, anéis ou artefatos padrões.

### **2.3.1- Procedimentos Normalizados**

São muitas as normas que tratam dos procedimentos de avaliação de desempenho das MM3Cs. As principais normas estão descritas a seguir (*Bosch, J. A., 1995*):

➤ **ASME B89.4.1, 1995**

Há uma tendência de muitos fabricantes e usuários virem a adotar os procedimentos propostos por normas, isto devido a universalidade e simplicidade desses ensaios.

Pela norma *ASME B89.4.1, 1995* atual, os testes de desempenho estão separados em sete diferentes tipos de ensaios: repetibilidade, acuracidade do deslocamento linear, teste com Barra de Esferas, teste volumétrico com sondas múltiplas, teste de MM3Cs com mesa rotativa, teste de comprimento bidirecional e desempenho de sondagem ponto-a-ponto.

O teste de repetibilidade incorporado pela norma procura avaliar o sistema completo e inclui todos os efeitos próprios da máquina, do usuário e dos algoritmos utilizados. O teste de repetibilidade é feito a partir da medição de uma esfera padrão, colocada no centro do volume de trabalho da MM3C. Um total de dez medições da esfera são realizadas sendo que para cada medição é necessário se tomar um mínimo de quatro pontos sobre a esfera. A amplitude dos desvios da coordenada do centro da esfera é chamada de repetibilidade e pode ser estendida para todo o volume da MM3C.

O teste de acuracidade do deslocamento linear inclui a medição dos erros de cada um dos três eixos por um padrão passo a passo ou um interferômetro laser. O procedimento constitui da medição do padrão de dez distâncias diferentes sendo que cada uma é medida três vezes. A amplitude dos desvios dos valores medidos comparado com o padrão é o resultado da acuracidade de cada eixo.

O teste de desempenho volumétrico é feito através de uma calibração indireta utilizando uma Barra de Esferas não calibrada.

A norma B89 especifica características dimensionais quanto ao comprimento da barra e esfericidade das esferas. A Barra de Esferas deve ser medida em diferentes posições e orientações no volume de trabalho da máquina, o número de posições também varia conforme o volume da máquina. Para o caso de máquinas com volume de

trabalho aproximadamente cúbico a barra deve ser colocada em vinte posições pré determinadas.

O teste volumétrico com a sonda utiliza uma Barra de Esferas para verificar a influência dos vários apalpadores da sonda durante o processo de medição. O teste consiste da medição de uma Barra de Esferas disposta nos planos "XY" e "XZ" em quatro posições diferentes no volume de trabalho da MM3C. Em cada posição a Barra de Esferas deve ser medida duas vezes com inclinação de 45 graus, o comprimento entre o término do eixo "Z" e o apalpador deve ser de 150mm. Após feita a primeira medição do comprimento da barra, o apalpador deve ser revertido de 180 graus e novamente se executar a outra medição. Este teste avalia a influência do "Roll" do eixo "Z" nas medições.

O teste de desempenho volumétrico utilizando MM3Cs com mesas rotativas consiste na medição de duas esferas posicionadas sobre a mesa defasadas de 180° e possuindo diferentes alturas em relação à base. Dá-se neste ensaio a avaliação dos erros na combinação do alinhamento da mesa, dos erros geométricos e acuracidade linear da MM3C.

O teste de comprimento bidirecional avalia o apalpador da sonda através da medição de um bloco padrão de 25mm de comprimento colocado em três posições na direção preferencial do eixo e uma numa posição aleatória. Este ensaio visa a determinação dos erros do diâmetro do apalpador e análise da histerese do sistema de sonda. Já o teste de sondagem ponto-a-ponto avalia os fatores dinâmicos da máquina e ao erros da sonda. Este teste consiste da medição de uma esfera padrão colocada sobre o desempenho da MM3C, a esfera é medida por três sondas de diferentes comprimentos da haste.

➤ **VDI/VDE 2617**

Ao contrário da norma americana B89, a norma européia VDI exige altos custos e experiência dos usuários. A norma VDI tende a especificar procedimentos para verificar simultaneamente a ação de todos os erros da máquina, usando padrões pré calibrados ou ainda um interferômetro laser .

Geralmente a especificação dos erros é feito através do critério U95, ou seja, usando somente 95% dos valores medidos.

Um teste para verificar o desempenho da sonda esta apresentado na parte 3 da norma, e valores de desempenho para uma, duas e três dimensões são calculados, usando respectivamente um bloco padrão, um anel padrão e uma esfera. Os resultados são apresentados usando o critério U95.

Outros testes são propostos para MM3C com mesa rotativa, com objetivo de determinar os erros paramétricos e executar uma avaliação do desempenho, este similar ao teste proposto pela norma ASME B89.4.1 (1995).

A VDI porém, não trás considerações sobre erros nas medições influenciados pela variação térmica do ambiente e da repetibilidade da máquina.

➤ **NORMA INGLESA BS6808**

Segundo a "*British Standard BS6808*" a avaliação do desempenho das MM3Cs é especificado geralmente em termos do desvio padrão e pelo critério U95 dos resultado das medições.

Dois são os testes especificados pela norma para avaliar o desempenho das máquinas. Um deles consiste na medição da repetibilidade unidirecional e o outro do erro tridimensional de medição de comprimentos.

A repetibilidade unidirecional ( $R_1$ ) é levantada através da medição de um mesmo ponto sobre a superfície de um bloco padrão

alinhado ao longo de um dos eixos coordenados. O teste é feito para cada um dos três eixos da máquina e os desvios padrão calculados dos testes sobre cada eixo são computados. O valor do maior desvio padrão dos três eixos,  $S_{\max}$ , é então utilizado na relação  $R_1 = 0.72 S_{\max}$  para o cálculo da repetibilidade.

No teste tridimensional de medição de comprimento, um padrão, padrão passo a passo, é posicionado nas direções das diagonais principais do volume de trabalho da MM3C e a medição de vários comprimentos é feita várias vezes com diferentes comprimentos. Os desvios devem estar dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante.

### ➤ **NORMA INTERNACIONAL “ISO 10 360”**

A “*International Standard ISO 10 360 Coordinate Metrology*” consiste de duas partes: a primeira, de definições e aplicações dos fundamentais princípios geométricos. A segunda parte avalia o desempenho das MM3Cs o qual se dá pela determinação do erro indicado na medição do comprimento feito através de blocos padrões ou padrão passo a passo. São feitos cinco testes de medição de diferentes comprimentos. Cada comprimento é medido três vezes em sete posições e orientações distintas no volume de trabalho da MM3C.

### ➤ **PADRÃO CMMA**

A CMMA “*The Coordinate Measuring Machine Manufacturers Association Standard*”, não é de fato uma norma, mas sim um conjunto de requisitos criados por uma associação entre os maiores fabricantes de MM3Cs. A associação propõe uma série de especificações para a avaliação da acuracidade das MM3Cs, e estão divididas em três seções: acuracidade na medição de comprimento,

medição da acuracidade tridimensional e um teste suplementar que envolve a determinação dos erros paramétricos.

O teste de acuracidade de medição de comprimento é feito usando três padrões de comprimentos  $1/3$ ,  $1/2$  e  $3/4$  do comprimento do maior eixo da máquina. Os três padrões são medidos em quatro posições diferentes que podem ser as diagonais principais.

### **2.3.2- Procedimentos Comparativos e Testes de Repetibilidade e Reproducibilidade (R&R).**

O método da comparação consiste da medição um padrão semelhante à peça a ser medida. A medição do padrão deve ser realizada nas mesmas condições e características de medição da peça inspecionada. Por exemplo, o padrão deverá ser colocado e fixado na mesma posição e orientação da peça envolvendo as mesmas condições ambientais e as mesmas técnicas de medição.

Esta filosofia de medição envolve combinações apropriadas das fontes de erros das MM3Cs numa medição específica. A resultado da avaliação é dado pela média e desvio padrão das medições. O erro das medições é tomado a partir do estabelecimento de um intervalo de confiança e do desvio padrão.

Os testes de repetibilidade e reproducibilidade (R&R) procuram determinar os efeitos das variáveis da MM3C através da variação obtida na medição. Essas variáveis compreendem o conjunto de fatores que são responsáveis pelos erros presentes durante o trabalho da máquina em um ambiente de fábrica como posição e orientação da peça no volume de trabalho da MM3C, variáveis ambientais, variáveis relacionadas à sonda.

Um ensaio bastante usado para o teste R&R consiste da medição de dez peças selecionadas aleatoriamente dentro de um lote fabricado, essa medição é feita variando-se as condições presentes dentro de uma fábrica.

## **2.4- MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS**

Com o grande ritmo produtivo de peças feito pelas máquinas automatizadas houve a necessidade de se construir um instrumento de medição que acompanhasse essa evolução tecnológica, avaliando com rapidez e acuracidade as peças produzidas, pois os instrumentos convencionais não conseguiam. As Máquinas de Medir a Três Coordenadas surgiram para essa avaliação, como o equipamento de medição de alta acuracidade, eficiência e grande flexibilidade (Peggs, 1989).

Porém, como visto, há muitas fontes de erros, as quais interagem de forma complexa por todo o sistema das MM3Cs provocando erros nas medições.

Grande parte desses erros podem ser identificados e se forem sistemáticos podem ser compensados.

Para caracterizar esses erros os procedimentos de avaliação dos erros em MM3Cs fazem uso dos processos de calibração os quais vem sendo estudados.

De acordo com Sartori, 1995 os métodos de calibração de MM3Cs podem ser classificados em: calibração direta e calibração indireta.

Os métodos de calibração indireta baseiam-se na utilização de artefatos ou padrões pré-qualificados e normalizados. Nestes métodos não se consegue determinar os erros individuais da MM3C e nem diagnosticar suas fontes, o que se observa é a avaliação do erro total. Os ensaios são rápidos e baratos quando comparados com a calibração direta e são os preferidos dos usuários.

Os métodos de calibração direta tem como objetivo calibrar individualmente cada eixo da máquina e obter o mapa dos erros que contribuem para o erro volumétrico. Este é considerado o melhor método para caracterizar metrologicamente os erros das MM3Cs,

porém o tempo consumido no processo de calibração e os custos envolvidos são consideráveis (Sartori, 1995)

#### 2.4.1- Calibração Indireta

São vários os tipos de formas dos artefatos utilizados na calibração indireta, mas são usualmente escolhidos de acordo com o número de coordenadas do sistema de medição. (Peggs, 1989).

Abaixo estão relacionados os principais artefatos utilizados para a calibração indireta.

##### ➤ Barra de Esferas (Ball Bar)

A utilização das barras de esferas na calibração de uma máquina de medir é considerado o mais simples e econômico método de determinação de erros volumétricos (Philipis, 1993). A calibração envolve a medição da distância entre os centros das esferas da barra em várias posições do volume de trabalho da máquina, os desvios na medição, com relação ao padrão indicam o erro (ASME B89.4.1, 1995; J. Bryan, 1982).



Figura 2.11: Barra de Esferas  
(Cortesia U.N.C Charlotte)

O sistema de Barra de Esferas é composto de uma barra de comprimento fixo, com duas esferas colocadas uma em cada extremo

da barra e um suporte para fixação da barra em diferentes orientações.

Uma descrição detalhada do processo de calibração utilizando Barra de Esferas para avaliação das Máquinas de Medir a Três Coordenadas é feito pela norma americana *ANSI / ASME B89.4.1*.

Esta norma sugere que a distância entre os centros das esferas não seja maior que 900mm e que seja aproximadamente 100mm menor que o menor eixo da máquina. As esferas podem ser feitas de carbeto de tungstênio, rubi, cerâmica ou aço e devem possuir uma esfericidade melhor do que 20% da repetibilidade da máquina. De preferência a barra deve possuir a forma de um tubo aumentando a frequência natural e diminuindo o peso, para amenizar problemas vibratórios e distorções (*Philips et al, 1993*).

O sistema de fixação da barra deve apresentar um suporte que permita um ajuste rí-gido do acoplamento da barra e de fixação na mesa em diversas posições especificadas pela norma, mantendo dessa forma uma distância constante entre as esferas e não fletindo a barra durante o toque da sonda nas esferas na calibração (*Philips et al, 1993; ASME B89.4.1, 1995*).



Figura 2.12: Calibração com Barra de Esferas.  
(Cortesia U.N.C Charlotte)

Os principais erros no sistema de Barra de Esferas derivam de fontes térmicas, vibrações do sistema da barra, erros de forma das esferas e forças gravitacionais.

Com esse artefato é possível obter informações sobre a repetibilidade e erros sistemáticos da MM3C.

### ➤ Barra de Esferas Magnética (*Fixed Magnetic Ball Bar*)

A Barra de Esferas também pode ser usada com apoios cinemáticos (*Kinematic Reference Standards*) que neste caso são os soquetes magnéticos desenvolvidos no Physikalische Technische Bundesanstalt (P.T.B). As Barras de esferas magnéticas (F.M.B.B) podem apresentar um ou dois soquetes magnéticos (*Bryan, 1982*). As esferas permanecem fixas sobre os soquetes magnéticos, uma esfera é montada sobre o desempenho enquanto a outra é fixada no lugar da sonda. Assim a barra descreve um círculo sobre o plano de referência da máquina quando movimentada. Observando que o comprimento da barra é o raio constante de um círculo, qualquer desvio com relação a este modelo circular é caracterizado como erro.

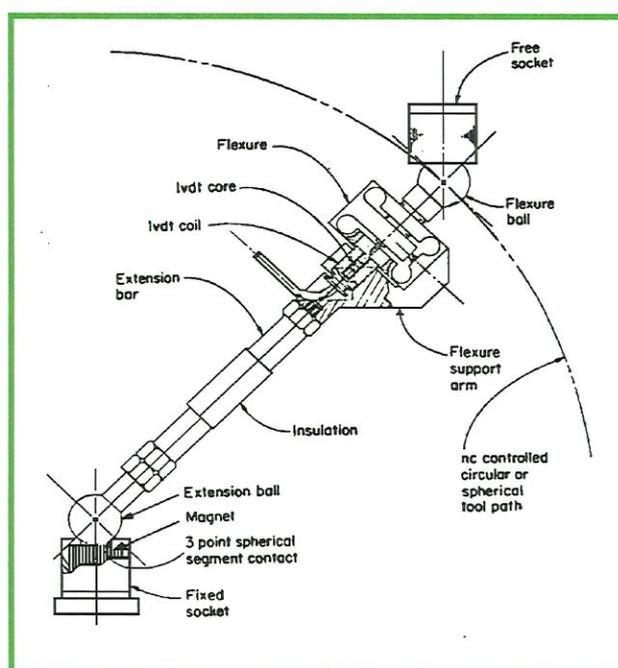


Figura 2.13: Calibração com Barra de Esferas do Tipo F.M.B.B

Críticas sobre a aplicação da F.M.B.B estão relacionadas a deformações elásticas que ao atrito com a montagem do soquete magnético causa a sonda 3-D, a direção desta deformação depende do movimento circular.

### ➤ Placa de Esferas

São poucas as normas que especificam o uso da Placa de esferas “*Ball Plate*”. A norma inglesa BS 6808 recomenda ao usuário que considere a aplicação deste artefato para inspeção periódica das MM3Cs, mas a norma VDI/VDE 2617 é mais específica na descrição no uso da Placa de Esferas.

A Placa de Esferas consiste de uma placa de aço onde são fixadas diversas esferas no mesmo plano da placa arranjadas em uma malha regular. Os diâmetros e as distâncias entre esferas são padronizadas. A calibração é feita medindo-se as distâncias entre os centros das esferas, a placa pode ser colocada em diversas posições do volume de trabalho da máquina dependendo da estratégia de medição programada para a calibração (*Knapp et al., 1991*).

*Traped, E. & Waldele, F., 1991* descreveram o uso da Placa de Esferas em maiores detalhes em um tutorial apresentado na Alemanha em 1991. A calibração com este artefato pode também ser aplicada para determinar os 21 erros geométricos de uma MM3C.

A Placa de Esferas possui a versatilidade de se executar diversas medições com uma única posição no volume de trabalho, se comparado com outros artefatos reduziria grandemente o tempo de calibração, porém problemas de curvatura e peso da placa podem inserir incertezas no método (*Traped, E. & Waldele, F., 1991*).

*Caskey et al., 1991*, apresentou o resultado do N.I.S.T (National Institute of Standards and Technolog) onde dados de 34 MM3C de 13 diferentes organizações foram analisadas.

*Kruth et al., 1994*, descreveu um procedimento de auto calibração usando um modelo matemático e uma Placa de Esferas não calibrada para identificar os erros geométricos de uma MM3C-CN

e compensá-los via software. As medições da Placa de esferas são feitas em diversas posições paralelas aos planos XY, XZ e YZ.



Figura 2.14: Placa de Esferas.  
(Cortesia U.N.C Charlotte)

#### ➤ Placa de Furos

Fisicamente a Placa de Furos (*Hole Plate*) é uma placa plana com diversos furos arranjados simetricamente sobre a mesma. A distância entre os centros dos furos é conhecida e o processo de calibração é semelhante a calibração com a Placa de Esferas.

A placa é levada a diversas posições do volume de trabalho da MM3C até que o mesmo seja varrido totalmente.



Figura 2.15: Hole Plate (Bosch, J. A, 1995).

### ➤ Padrão Volumétrico Tetraédrico

*J. Bury* propôs em 1976 um artefato de montagem tridimensional de barras de esferas com grande estabilidade dimensional. Este artefato pode ser calibrado com instrumentos de medição linear, permitindo a determinação das distâncias entre esferas com boa acuracidade.

A forma proposta para o padrão espacial é bastante rígida e suas junções são feitas por esferas de carbeto de tungstênio, unidas por barras de fibras de carbono.

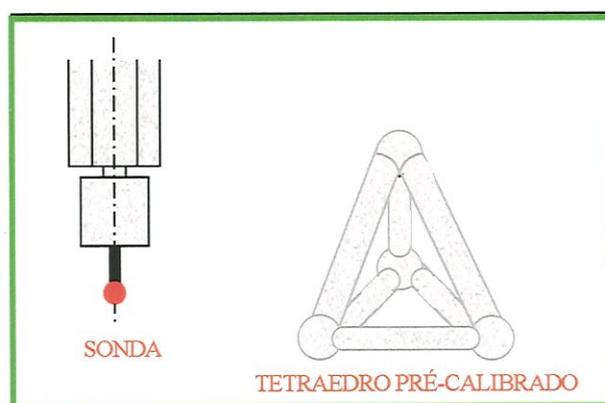


Figura 2.16: Padrão Tetraédrico.

### ➤ Anel Padrão

Um artefato circular com diâmetro padrão pode ser usada para avaliar as MM3Cs. A medição do círculo padrão em diversas posições do volume de trabalho da MM3C é considerado um método eficiente de verificação de MM3C a ser aplicado dia-a-dia.

*Pahk e Kim, 1993* desenvolveram um sistema de calibração de erros utilizando um círculo padrão. O círculo foi medido com uma sonda de contato e os dados foram analisados.

O autor conclui que, os erros de ortogonalidade, de escala e os erros de lóbulos do apalpador podem ser avaliados.

### ➤ Padrão Passo a Passo

O padrão passo a passo “*Step Gauge*” é o resultado da montagem de vários blocos padrões dispostos linearmente com distâncias fixas entre blocos. As avaliações são feitas medindo-se as distâncias entre os blocos em diversas posições e orientações no volume da máquina. Variações observadas nas distâncias entre blocos são tratados matematicamente e os erros sistemáticos e aleatórios são avaliados.

A norma “*ASME B89.4.1,1995*” indica a utilização do padrão passo a passo para teste da acuracidade do deslocamento linear, o procedimento constitui da medição desse artefato em dez distâncias diferentes, sendo que cada uma é medida três vezes.



Figura 2.17: Padrão Passo a Passo

### ➤ Padrões Especiais

A literatura apresenta ainda outros trabalhos que utilizam artefatos pouco aplicados na avaliação de MM3Cs e estão citados a seguir.

*Schussler, 1983*, sugeriu o uso de um padrão tridimensional cúbico para avaliar erros de ortogonalidade, “Pitch”, “Yaw”, “Roll” e dilatação térmica ao longo dos eixos.

*Lim et al., 1988*, apresentaram um teste com um artefato bidimensional o qual estava inserido cones com 25mm de diâmetro de base, alinhados e que se cruzavam no plano da placa, o objetivo da avaliação é identificar erros de posição, ortogonalidade e retilidade num curto espaço de tempo.

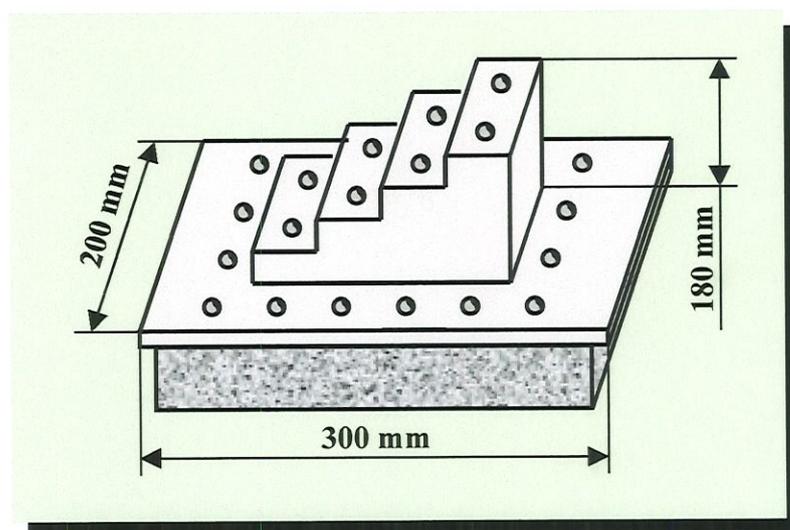


Figura 2.18: Padrão de ferro fundido com 24 esferas.

*Belforte et al., 1987*, sugerem um método para avaliar os erros geométricos da MM3C usando dois artefatos padrões. Um deles consiste de uma Pirâmide Truncada de aço com 36 esferas e o outro um padrão de ferro fundido com 24 esferas. A idéia básica é usar uma MM3C-CN para medir os artefatos e identificar os erros sistemáticos da máquina para posterior compensação.

#### 2.4.2- Calibração Direta

Os métodos diretos de calibração consistem em técnicas de medições de erros individualmente. Esta técnica nos dá evidências diretas sobre a acuracidade da máquina (*Sartori, 1995*), porém o

tempo e os custos envolvidos nestes processos de calibração podem encarecer o processo ( *Kruth J. P. et al., 1994*).

Há dois métodos que podem ser destacados na calibração direta em metrologia tridimensional, o método do volume dividido e o método da sintetização.

### ➤ **Método do Volume Dividido**

Neste método geratrizes de planos paralelos no volume de trabalho da máquina são identificados e o erro de posição do eixo de interesse é levantado. A medição do erro de posição é repetida diversas vezes em todas as geratrizes formando uma grade de erros (*Di Giacomo, 1986*). Considerando que no valor medido do erro de posição os erros de retilidade, rotação e ortogonalidade estão agindo combinadamente, pode-se concluir que o resultado da calibração dos erros de posição é um mapeamento do comportamento do erro volumétrico.

Neste método de calibração geralmente um interferômetro laser é utilizado. Até alguns anos atrás o método era pouco empregado pois exigia um elevado consumo de tempo, ficando o método exposto a erros de origem térmica influenciando o resultado do processo de calibração. Na atualidade, porém, com os avanços na tecnologia laser, o tempo de calibração e avaliação de dados diminuíram consideravelmente podendo o método passar a ser uma potente ferramenta a ser usada mais freqüentemente para diagnosticar fontes de erros e construção de sistemas de compensação.

### ➤ **Método da Sintetização de Erros**

O método da sintetização ou método paramétrico se apresenta como o mais completo método de calibração para avaliação de erros. O método se utiliza da teoria da cinemática dos corpos rígidos para modelar geometricamente a estrutura da máquina e obter a

contribuição de cada componente da expressão do erro volumétrico (*Burdekim et al., 1981*).

Para se aplicar essa técnica desenvolve-se primeiramente um modelo matemático da máquina que combine e propague todos os efeitos de seus erros individuais até qualquer ponto coordenado pertencente a seu volume de trabalho e depois, segundo o modelo proposto, medem-se seus 21 erros geométricos.

As componentes do erro volumétrico  $Ev$  podem ser equacionadas a partir de uma análise geométrica que determine a contribuição de cada um dos erros geométricos em cada direção preferencial (*Love & Scarr, 1973; Di Giacomo, 1986*). Através de uma análise vetorial também é possível representar as contribuições individuais dos erros pela diferença entre os vetores que descrevem a máquina com erros e a máquina ideal (sem erros) (*Hocken et al., 1977; Reschetov & Portman, 1988*). Pode-se também utilizar a técnica das Transformadas Homogêneas, a qual modela o comportamento da estrutura da máquina através de sistemas de coordenadas associados a cada um de seus elementos (*Donmez, et al., 1988; Soons, 1992; Cardoza, 1995; Vieira Sato, 1998*).

O método da sintetização possui a versatilidade de possibilitar o uso das curvas de erros obtidos através das calibrações para compensação dos erros sistemáticos, devido a esse fato, observa-se uma grande tendência dos usuários na utilização desse método (*Burdekim, 1981*). Alguns pesquisadores vêm no uso do método de sintetização como o princípio de uma saída para atingir a rastreabilidade em medições a três coordenadas.

#### **2.4.2.1- MÉTODOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DIRETA**

Os métodos de calibração direta ou paramétrica visam o levantamento das curvas de erros individuais de cada componente de uma MM3C.

### ➤ Calibração do Erro de Posição

Os erros de posição são comumente medidos por blocos padrões, padrão passo a passo, interferômetro laser e escalas de precisão. O uso de escalas de precisão, porém, são limitadas à máquinas com baixa acuracidade (ASME B89, 1995; WeK, 1984).

### ➤ Calibração dos Erros de Retilidade

Os métodos comuns de medição de retilidade fazem uso de réguas mecânicas, fio tensionado e interferômetro laser.

As réguas mecânicas são usadas apenas para pequenas máquinas. A régua é alinhada paralelamente a guia do eixo e medida com um indicador eletrônico. As medições podem ser corrigidas através da calibração da régua utilizando do método da reversão, isto é, revertendo a régua 180 graus e fazendo a medição novamente.

A medição com fio tensionado, mostrada na Figura 2.19, é freqüentemente usada para grandes máquinas. O fio é esticado ao longo da direção de um eixo e as medições são feitas com um microscópio montado no lugar da sonda da máquina.

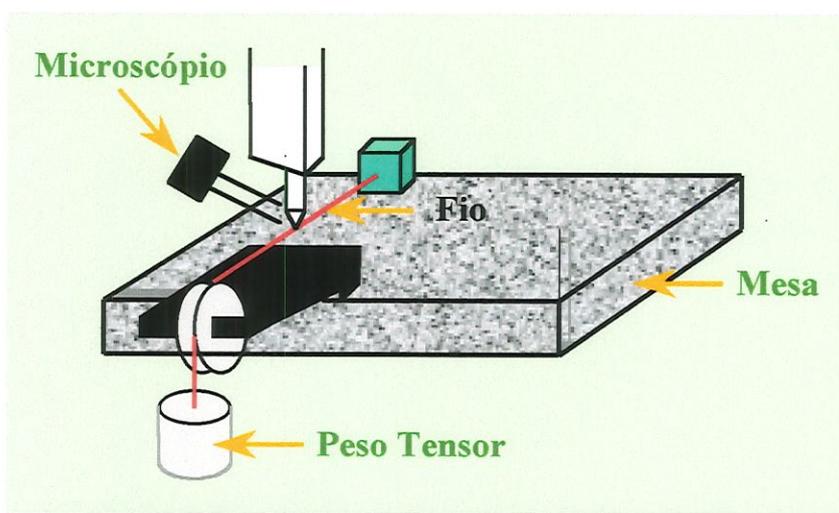


Figura 2.19: Fio Tensionado

A montagem experimental da medição de erros de retilidade com interferômetro laser esta exposta na Figura 2.20. Utiliza-se o prisma de Wollaston colocado no lugar da sonda da MM3C para dividir a luz emitida pelo canhão em dois feixes divergentes. Eles então são refletidos por dois espelhos de refletores os quais são montados sobre a mesa da máquina.

As variações do feixe emitido pelo canhão comparado com o feixe de volta indicam os erros de retilidade.

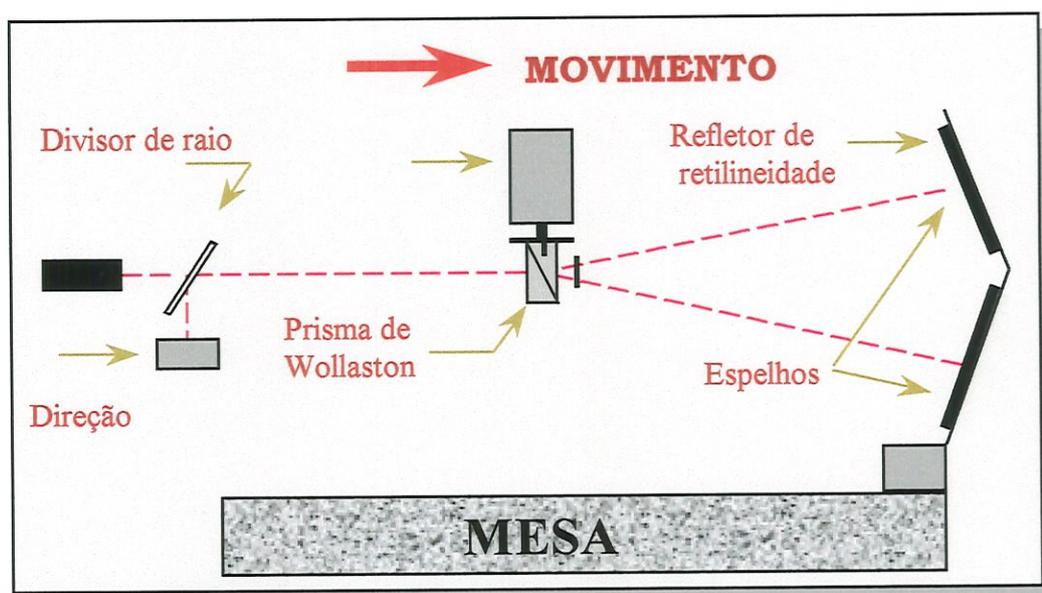


Figura 2.20: “Set Up” de medição de retilidade utilizando Interferometro laser

### ➤ Calibração dos Erros de Ortogonalidade

Esquadros mecânicos, esquadro óptico e Barra de Esferas são bastante utilizados da medição de erros de ortogonalidade.

O esquadro mecânico é colocado no plano da mesa da máquina e um de seus lados é alinhado com um do eixos da máquina. O lado não alinhado é então percorrido pelo sensor da máquina diagnosticando o desvio. Alguns problemas conhecidos dificultam a acuracidade do processo, dentre eles: desgaste das faces do esquadro, os dados da calibração do esquadro podem ser

incorretamente aplicados e a linha calibração ao longo de cada lado é usualmente não identificada.

O procedimento de medição de ortogonalidade utilizando-se uma Barra de Esferas garante excelentes resultados. A Barra de Esferas é colocada sucessivamente em duas posições de medição no plano em questão. A primeira posição consiste em posicionar a barra a 45 graus do plano e a outra em colocá-la perpendicular à primeira posição.

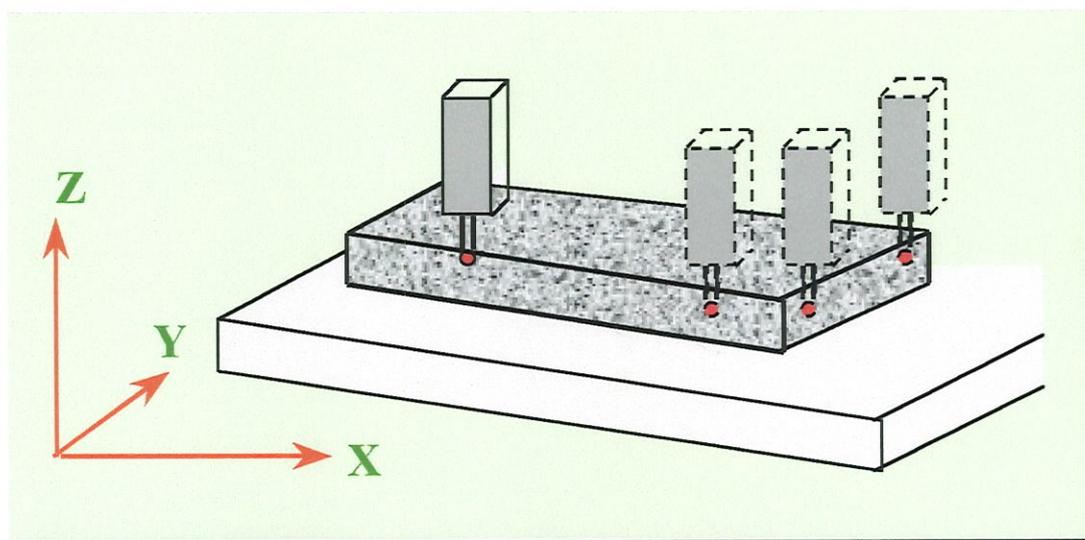


Figura 2.21: Medição de ortogonalidade utilizando esquadro mecânico.

A medição considera a distância entre as esferas e os desvios em relação ao padrão indicam o erro de ortogonalidade. Blocos padrões ou medições de distâncias com o interferômetro laser podem ser usados no lugar da Barra de Esferas.

#### ➤ Calibração dos erros angulares “Pitch” e “Yaw”

Os erros de “Pitch” e “Yaw” são diretamente medidos por utilizando-se níveis de bolha ou eletrônico, autocolimadores ou interferômetro laser, e indiretamente por meios de medição de deslocamento linear.

Os níveis eletrônicos são meios bastante eficientes para a medição de “Pitch” e “Yaw”. Dois níveis são necessários para a medição, um colocado como referência sobre a mesa da máquina e o outro fixo no lugar da sonda. Isto devido a mudança do centro de gravidade da máquina durante o deslocamento dos carros. A leitura do erro em questão é feita através da diferença entre as leituras dos níveis envolvidos.

A medição de todos os erros de “Pitch” e “Yaw” baseiam-se na interação entre defasagem de feixes de luz quando se utiliza o interferômetro laser. O feixe emergente do canhão é dividido em dois feixes paralelos pelo interferômetro colocado sobre a mesa da máquina os quais retornam por dois refletores colocados no lugar da sonda. Variações dos feixes de volta em relação ao feixe de luz padrão indicam erros de “Yaw” ou “Pitch”.



Figura 2.22: Calibração do Erro “Pitch” do eixo “Z”.

### ➤ **Calibração do erro angular de “Roll”**

O “Roll” é comumente medido por meio de níveis de precisão e medição de retlineidades paralelas. Os níveis de precisão medem

apenas os erros de “Roll” de eixos horizontais, o método de medição é similar ao métodos de medição de “Pitch” e “Yaw”.

Os erros de “Roll” na vertical são determinados por dois conjuntos paralelos de medição de reticidade. O princípio é ilustrado na Figura 2.23 que mostra a montagem da medição do erro de “Roll” de um eixo na vertical com um esquadro mecânico e um indicador.

Após medida a reticidade a sonda é movida sobre o eixo normal do plano de medição da reticidade e novamente a reticidade é determinada. O “Roll” em particular para uma posição vertical é nominalmente a diferença entre as duas medições de reticidade daquela posição dividida pela distância entre as duas posições da sonda.

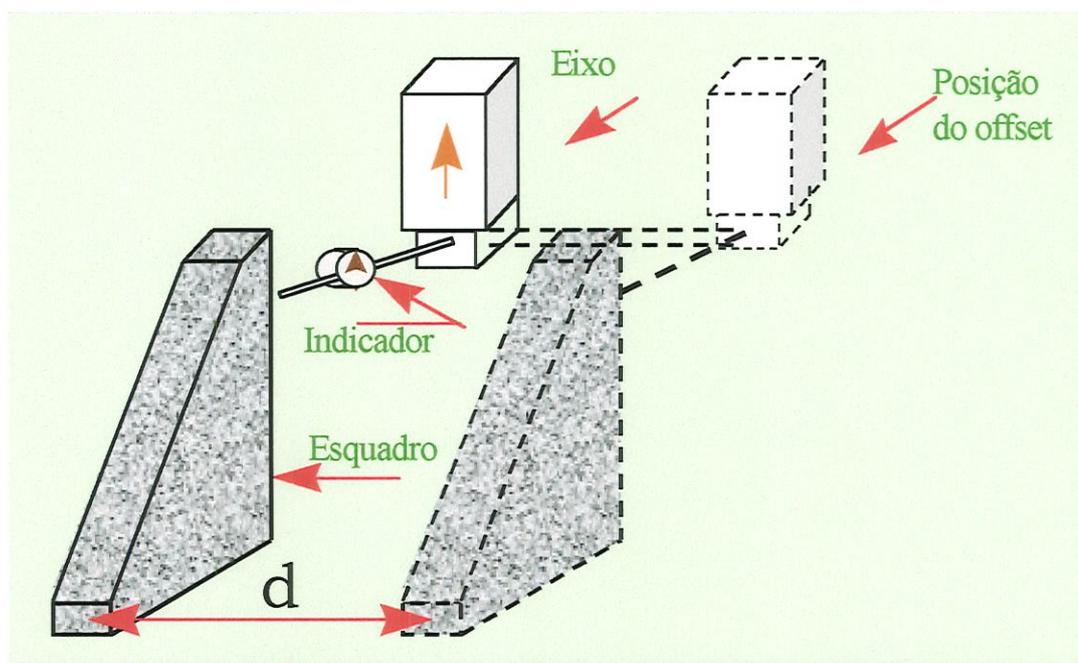


Figura 2.23: Medição do erro de “Roll” utilizando esquadro mecânico.

## CAPÍTULO 3

### ERROS GEOMÉTRICOS E MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS

É sabido que as Máquinas de Medir a Três Coordenadas apresentam erros nas medições, assim como todas as máquinas independentemente da sua especialidade também os apresentam. Os erros nas medições em MM3Cs entretanto são muito mais complexos do que os erros da instrumentação convencional de medição, pois derivam e se combinam em diferentes componentes (*Bush et al., 1985*).

No capítulo 2 foram expostas as principais fontes de erros que afetam a acuracidade das MM3C (*Burdekim, 1981*):

- Erros térmicos;
- Erros geométricos;
- Erros devido ao sistema de sonda;
- Erros devido ao peso da peça e da estrutura da Máquina;

A interação de todos esses erros constitui o que é chamado de erro volumétrico.

Os erros geométricos, aqueles identificados pelos movimentos indesejáveis nas direções não preferenciais durante uma translação, apresentam uma contribuição muito significativa para a formação do erro volumétrico das MM3Cs. Estes erros são tratados com maior

destaque neste capítulo. Aqui também está apresentada a teoria de modelagem matemática utilizando transformações homogêneas, a calibração dos erros geométricos e a teoria de tratamento estatístico que são as ferramentas utilizadas na conclusão deste trabalho.

### 3.1- ERROS GEOMÉTRICOS

Todo movimento indesejável nas direções não preferenciais durante uma translação são causados por imperfeições na geometria dos componentes individuais e da relação funcional entre eles que formam a estrutura de uma MM3C. Essas imperfeições derivam dos processos de fabricação de cada componente da máquina, portanto esses erros dependem da acuracidade dos componentes e dos ajustes da máquina durante a instalação e manutenção da mesma (*Weekers, et al., 1995*).

Os erros geométricos, dessa forma, estão relacionados ao movimento relativo entre as várias partes que compõem a estrutura de uma máquina, e podem ser divididos em dois grupos; aqueles que são individuais a cada componente denominados “paramétricos” e aqueles que acontecem através da relação entre os componentes, “não paramétricos”.

Considere uma Máquina de Medir com três eixos de translação, considere também que os carros e as guias que fazem parte da máquina se comportam como corpos rígidos. Sabe-se que a posição de um corpo rígido no espaço pode ser definida através de 6 graus de liberdade, conseqüentemente associa-se seis erros geométricos para cada eixo de translação. Como a máquina possui três eixos de movimentação, estão a ela associados 18 erros geométricos paramétricos e 3 não paramétricos que são derivados da falta de ortogonalidade entre os eixos da máquina.

Na Figura 3.1 pode-se visualizar uma Máquina de Medir a Três Coordenadas do Tipo Ponte Móvel cujos componentes principais são:

uma ponte, que se movimenta ao longo do eixo “Y”, um carro que se desloca sobre a guia do eixo “X”, e um outro, que transporta a sonda, responsável pela identificação dos pontos físicos, que translada na direção do eixo “Z”. Esse tipo de máquina será objeto de estudo neste trabalho.

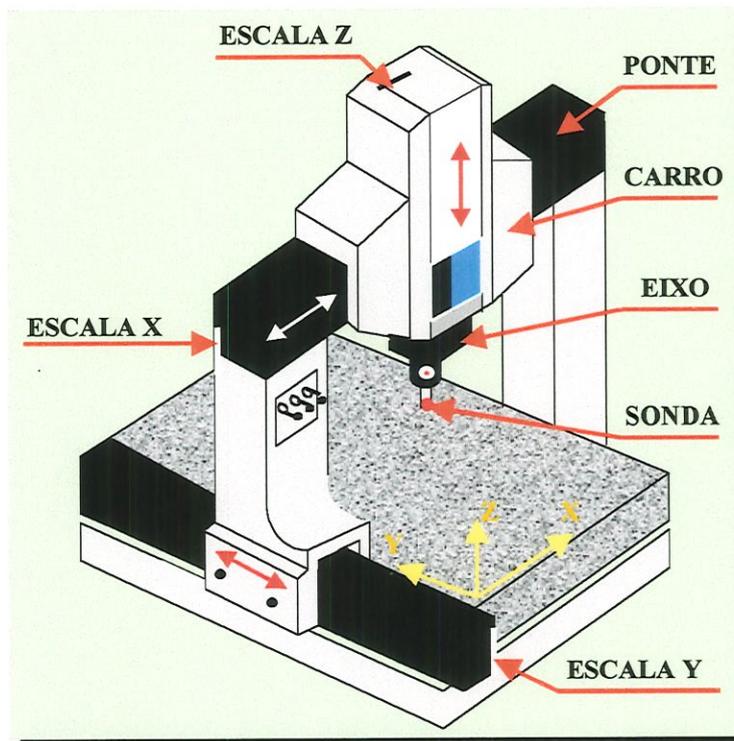


Figura 3.1: Máquina de Medir a Três Coordenadas.

O carro responsável pelo movimento no eixo “X” que translada sobre a ponte é mostrado simplificada na Figura 3.2 com os seus respectivos erros paramétricos.

As imperfeições na geometria da guia da ponte por onde translada-se o carro do eixo “X”, faz com que este carro experimente movimentos em outras direções que não a preferencial. Para agravar o problema as limitações eletrônicas do sistema de medição, os erros na leitura das escalas responsáveis pela medição da posição do carro, não indicam o valor verdadeiro do deslocamento sofrido pelo carro

resultando num chamado erro de posição ou de escala propriamente dito.

As translações indesejáveis, perpendiculares ao movimento do carro, são denominados erros de retilidade. As translações ocorridas na direção do eixo “Y”, enquanto o carro “X” se desloca são chamados de “erros de retilidade na direção “Y” devido ao movimento em “X””. Do mesmo modo as translações ocorridas na direção do eixo “Z”, enquanto o carro “X” se desloca, são chamados de “erros de retilidade na direção “Z” devido ao movimento em “X””

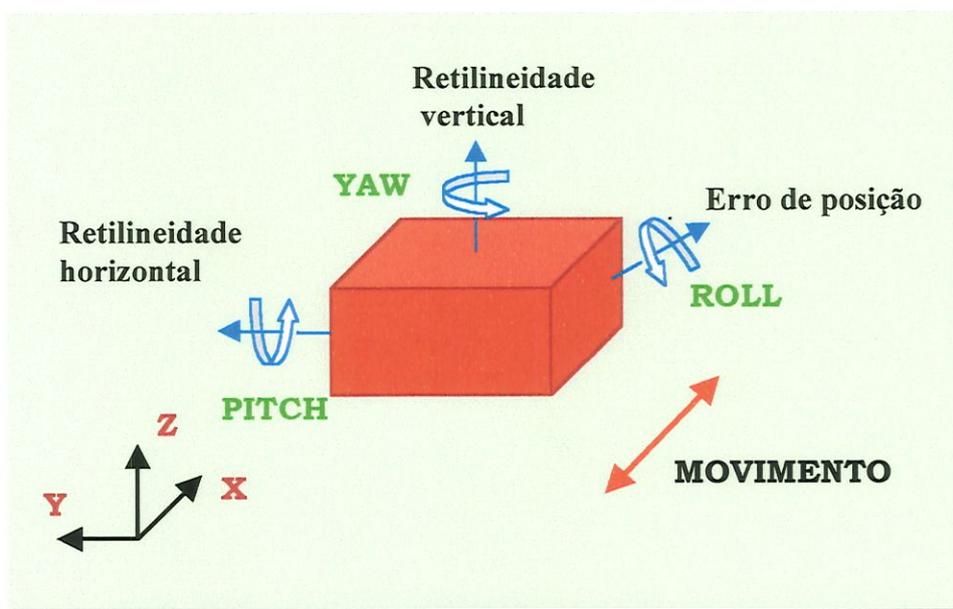


Figura 3.2: Os seis erros geométricos.

Além dos movimentos de translação, ocorrem também rotações indesejáveis do carro em torno de cada um dos três eixos do sistema, e são denominados erros angulares. Tais rotações são definidas em relação ao eixo por onde ocorre a rotação.

Considerando a Figura 3.2 denomina-se “Pitch” as rotações ocorridas em torno do eixo “Y”, “Yaw” as rotações sofridas pelo carro “X” em torno do eixo “Z” e “Roll” as rotações em torno do eixo de movimentação. Observa-se que para movimento do carro na direção

“X” exposto associou-se seis erros geométricos: um erro de posição, dois erros de retilidade e três erros angulares.

Quando na máquina dois ou mais eixos lineares ou eixos de rotação são combinados, outros parâmetros geométricos podem ser introduzidos para especificar a orientação angular de cada eixo com relação aos outros, os quais são chamados de erros de ortogonalidade (Hocken, 1980). Estes erros são causados pela relação geométrica entre eixos. Para o caso de uma MM3C a relação entre os três eixos faz com que surjam mais três erros de ortogonalidade. Observe a Figura 3.3 onde é definido um sistema de coordenadas cartesianas (X,Y,Z).

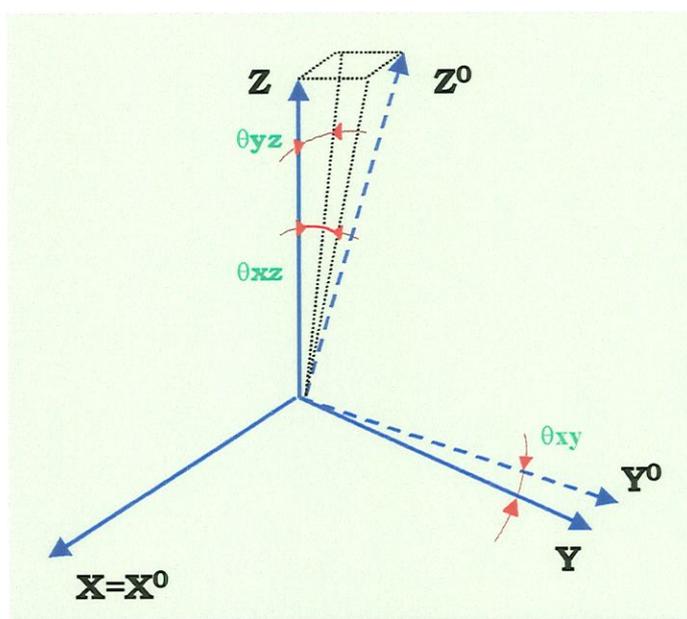


Figura 3.3: Modelo do Erro de Ortogonalidade

Escolhendo-se arbitrariamente o eixo “X” como referência observa-se que os eixos de movimento  $X^0$ ,  $Y^0$  e  $Z^0$  assumem uma posição particular no espaço. O ângulo formado entre os eixos “X” e  $X^0$  será entendido como erro de ortogonalidade entre  $X^0$  e  $Y^0$ , a mesma análise pode ser feita com o ângulo observado quando se projeta o eixo  $Z^0$  no plano “XZ”, esse ângulo é definido como erro de

ortogonalidade entre “X” e “Z”. Dando seqüência à análise, o erro de ortogonalidade entre os eixos “Y” e “Z” é definido pelo ângulo formado pelo eixo  $Z^0$  projetado no plano “ZY” e o eixo “Z”.

A notação utilizada neste trabalho para denominar os erros geométricos pode ser visto na Tabela 3.1 considerando que:

$\delta u(v) \Rightarrow$  erro de translação na direção “u” devido ao movimento em “v”.

$\epsilon u(v) \Rightarrow$  erro de rotação em torno de “u” devido ao movimento em “v”.

$\epsilon wo \Rightarrow$  desvio de ortogonalidade entre os eixos que pertencem ao plano perpendicular ao eixo “w”.

Tabela 3.1: Tipos de erros em MM3Cs e suas notações.

<b>ERROS DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS</b>			
Direção	X	Y	Z
Posição	$\delta x(x)$	$\delta y(y)$	$\delta z(z)$
Retilidade	$\delta y(x)$	$\delta x(y)$	$\delta x(z)$
	$\delta z(x)$	$\delta z(y)$	$\delta y(z)$
“Pitch”	$\epsilon y(x)$	$\epsilon x(y)$	$\epsilon x(z)$
“Yaw”	$\epsilon z(x)$	$\epsilon z(y)$	$\epsilon y(z)$
“Roll”	$\epsilon x(x)$	$\epsilon y(y)$	$\epsilon z(z)$
Ortogonalidade	$\epsilon xo$	$\epsilon yo$	$\epsilon zo$

Os 21 erros geométricos associados aos movimentos de uma MM3Cs tipo Ponte Móvel estão combinados no volume de trabalho da máquina gerando o “erro volumétrico” que é definido por:

$$E_v = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (3.1)$$

onde  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$  são as componentes do erro volumétrico em cada uma das direções preferenciais dos eixos da máquina.

Cada um dos 21 erros geométricos possui duas componentes, a componente aleatória e a sistemática. A parcela sistemática pode ainda ser dividida em mais uma componente designada como parte histerética.

O erro aleatório é resultado de influências externas ou internas não controladas que provocam o aparecimento de erros não repetitivos (Doebelin, 1990). É aquele que se medido em condições aparentemente iguais em uma dada posição resultam em valores diferentes. Esse fato priva os erros aleatórios de serem compensados, eles podem apenas ser expressos estatisticamente e usualmente serem reduzidos numa medição através do aumento do número de medições. Com os resultados de uma calibração Figura 3.4, pode-se definir o erro aleatório como mais ou menos três vezes o desvio padrão do valor do erro calculado em uma dada posição.

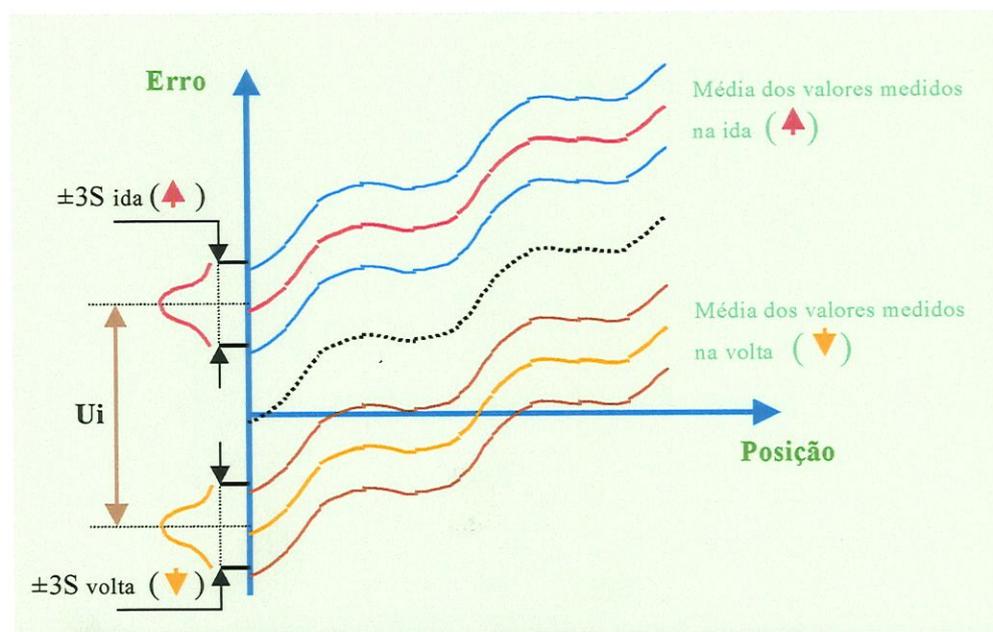


Figura 3.4: Calibração Hipotética de um Erro Geométrico de uma MM3C.

O erro sistemático, não pode ser totalmente eliminado mas podem ser reduzido por processos de compensação de erros.

Expressa-se o erro sistemático como sendo o valor da média de um determinado erro quando este é medido várias vezes em uma determinada posição.

Como já citado a histerese também é um erro sistemático de alta reproducibilidade. Baseando-se no gráfico hipotético de uma calibração exposto pela Figura 3.4 este erro é dado pela diferença entre os valores médios do erro nos dois sentidos de deslocamento para cada posição de medição.

Os erros de histerese são gerados geralmente por folgas, atrito e tensões internas dos componente mecânicos e eletrônicos e podem ser reduzidos através de programas computacionais de compensação de erros ou através de uma aferição adequada.

Tem-se que o erro sistemático  $\bar{\bar{X}}$ , o erro aleatório  $Ps_i$  e a histerese  $U_i$  podem ser calculados através das equações (3.2), (3.3) e (3.4), respectivamente.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_i \uparrow - \bar{X}_i \downarrow)}{n} \quad (3.2)$$

$$Ps_i = 6\bar{s}_i \quad (3.3)$$

$$U_i = |\bar{X}_i \uparrow - \bar{X}_i \downarrow| \quad (3.4)$$

### **3.2- TEORIA DA MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS**

As técnicas de modelagem matemática constituem poderosas ferramentas utilizadas para analisar os erros geométricos das máquinas ferramentas e das MM3Cs. São várias as técnicas de modelagem matemática utilizadas no campo da engenharia para caracterizar o comportamento das máquinas, dentre elas: análise

vetorial, transformação homogênea, análise estatística, redes neurais, análises geométricas e elementos finitos. Neste trabalho utilizou-se a técnica das transformações homogêneas.

O estudo das relações cinemáticas entre componentes de um mecanismo utilizando transformações homogêneas, foi inicialmente realizado por *Denavit e Hartenberg* em 1955. Muitos pesquisadores vieram a seguir e utilizaram essa técnica em máquinas de medir (*Burdekim, 1981; Di Giacomo, 1997*), máquinas ferramentas (*Vieira Sato, 1998; Domez et al., 1988*) e robôs (*Abackerli, 1992*).

### 3.2.1- Teoria das Transformações Homogêneas em MM3Cs

De um modo geral os componentes das máquinas podem ser considerados como sendo corpos rígidos. Desta forma, podem ser estabelecidas relações entre partes da máquina e um sistema de coordenadas de referência. Através de vetores e matrizes é possível descrever a posição e orientação da ponta da sonda (MM3C) ou ferramenta (MF) com relação ao sistema de coordenadas de referência.

Se cada componente de uma MM3C sofre rotações e translações com relação a um sistema de coordenadas absoluto, então cada componente pode ser representado por um sistema de coordenada intermediário. Esses sistemas podem ser representados por matrizes de transformação homogêneas com relação a um sistema de coordenada fixo.

Uma transformação homogênea no espaço  $R^3$  é uma matriz  $4 \times 4$  e pode representar translações e rotações. Dado um ponto (Q) no espaço  $R^3$ , o ponto pode ser representado por um vetor  $\vec{u} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k}$  com relação a um sistema de coordenadas cartesianas, onde  $\vec{i}, \vec{j}$  e  $\vec{k}$  são os vetores unitários dos eixos X, Y e Z respectivamente. A representação em coordenadas homogêneas deste ponto (Q) é dada

por um vetor com  $(n+1)$  coordenadas, onde  $(n+1)$ -ésima coordenada é chamada de fator de escala.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \cdot \\ q_n \\ q_{n+1} \end{bmatrix}, Q \in \mathfrak{R}^n \quad (3.5)$$

O ponto “Q” então pode ser representado em coordenadas homogêneas pelo vetor dado na equação (3.6) onde  $a = \frac{q_1}{w}$ ,  $b = \frac{q_2}{w}$ ,  $c = \frac{q_3}{w}$

e  $w$  sendo o fator de escala.

$$\vec{u} = (q_1, q_2, q_3, w)^T \quad (3.6)$$

Observe que se  $w$  for igual a 1, os valores em coordenadas homogêneas do vetor são exatamente iguais aos valores em coordenadas cartesianas. Caso  $w$  se aproxime de zero, tem-se que as coordenadas  $a$ ,  $b$ ,  $c$  tendem a  $\infty$  (infinito). Vetores cujo fator escala tendem a  $\infty$  são usados para representar direções ou ângulos. Estes vetores tem um papel importante quando se quer representar movimentos rotacionais nas matrizes de transformação homogênea (Vieira Sato, 1998).

Segundo Reshetov & Portman, 1988, a representação tridimensional através de vetores de quarta ordem pode ser dividida em duas classes distintas dependendo de sua natureza geométrica (física). A primeira classe esta relacionada com os vetores que representam um ponto no espaço e portanto, sua quarta coordenada não homogênea é não nula. Enquanto que a segunda classe contém os vetores que representam direções ou ângulos e, portanto, seu fator de escala é nulo.

As matrizes de transformações homogêneas em um espaço tridimensional são constituídas por matrizes 4 x 4 que representam a posição e orientação de um corpo rígido no espaço com relação a um sistema fixo de coordenada.

Dessa forma as matrizes de transformação homogênea conseguem explicar matricialmente os deslocamentos relativos sofridos pelos sistemas de coordenadas colocados em cada componente de uma MM3C.

$$T = \begin{bmatrix} o_{1x} & o_{2x} & o_{3x} & p_x \\ o_{1y} & o_{2y} & o_{3y} & p_y \\ o_{1z} & o_{2z} & o_{3z} & p_z \\ o_{1s} & o_{2s} & o_{3s} & p_s \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Os vetores  $o_1$ ,  $o_2$ ,  $o_3$ , e  $p$  em (3.7) representam respectivamente as direções e posições de um dado sistema de coordenadas com relação a outro, isto é, expressam as rotações e translações do sistemas de coordenadas.

Como pode ser observado, o conceito de coordenadas homogêneas pode ser facilmente estendido para o estudo de máquinas, cabendo para isto apenas a interpretação conveniente dos vários graus de liberdade presentes na máquina. Estes graus de liberdade devem ser interpretados como deslocamentos relativos entre suas partes (*Vieira Sato, 1998*).

Observe a estrutura de uma máquina na Figura 3.5 representada por uma sucessão de elementos transitórios.

Pode-se representar a posição do ponto (Q) colocando sistemas de referências em cada uma das articulações presentes no esquema da máquina e interpretar as distâncias ( $d_i$ ) como translações entre suas origens.

Com este procedimento e aplicando a teoria das transformações homogêneas pode-se escrever operadores de translação e rotação que expressam o deslocamento dos componentes da máquina.

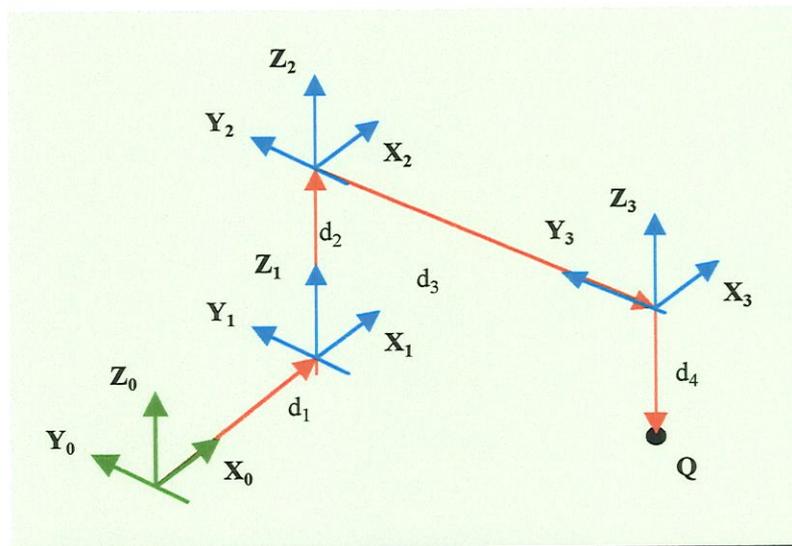


Figura 3.5: Representação do ponto de prova segundo translações do sistema de referência (Abackerli, 1992)

#### ♦ Matrizes de translação

Após colocados os sistemas de coordenadas fixo e intermediários nos devidos componentes de uma MM3C é possível representar através de matrizes de T.H as translações desses sistemas em relação a um sistema de coordenada de referência. Há três tipos de matrizes de transformação homogênea que podem expressar as translações dos sistemas de coordenadas.

Quando um sistema de coordenadas está vinculado a um componente móvel de uma MM3C que translada ao longo de um eixo preferencial, ele experimenta uma translação em relação a um sistema de coordenada anterior.

Este deslocamento é considerado *sem erros* e é representado pela matriz  $[T_{\text{mov}}]$ , que representa a leitura da escala da máquina referente a uma direção preferencial X, Y ou Z.

A matriz de translação fica da seguinte forma:

$$[T_{\text{mov}}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

O vínculo entre dois sistemas de coordenadas fixados em partes não móveis da máquina são denominadas de translações puras. Estas translações puras são devido aos braços de Abbé que são identificados pela distâncias rígidas entre dois referenciais e podem ser representadas nas matrizes de transformação homogênea por  $[T_{\text{fixa}}]$ , onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  representam o valor da distância entre sistemas de coordenadas em suas direções preferenciais.

$$[T_{\text{fixa}}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

As translações dos sistemas de coordenadas vinculadas a um componente móvel e o que ocorre na direção que não seja a preferencial (definida pela guia por onde translada o carro) pode ser representada pela matriz de T.H que representa as translações infinitesimais. Esta matriz pode ser vista abaixo reconhecida por  $[T_{\text{pr}}]$ .

Translações infinitesimais representam os erros de posição e retilineidade já definidos anteriormente, e “ $k$ ” na matriz, representa a direção do movimento que ocorre a translação.

A seguir, a matriz que representa as translações infinitesimais.

$$T_{pr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta x(k) \\ 0 & 1 & 0 & \delta y(k) \\ 0 & 0 & 1 & \delta z(k) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

#### ◆ **Matriz de rotação**

As matrizes de transformação homogênea que define a rotação dos sistemas de coordenadas vinculados a um componente mecânico (previamente definido) de uma MM3C, podem ser construídas se analisarmos a rotação de um sistema de coordenadas em torno de um eixo, tomado como referência.

#### ➤ **Rotação em torno do eixo “X”**

Considere um sistema de coordenadas  $(X_1, Y_1, Z_1)$ , o sistema experimentou uma rotação  $\alpha$  em torno do eixo “X”, Figura 3.6.

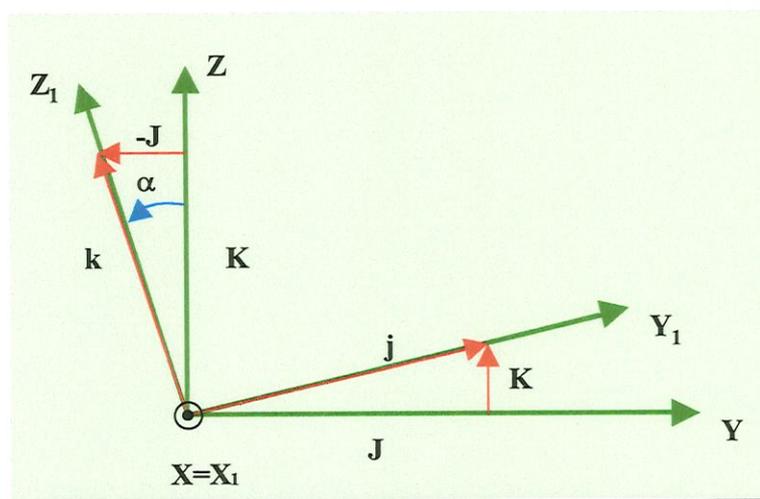


Figura 3.6: Rotação “ $\alpha$ ” do sistema  $(X_1, Y_1, Z_1)$  em torno do eixo “X”.

As expressões que representam as novas direções do sistema de coordenadas em função do sistema de coordenadas anterior são dadas por.

$$\begin{aligned}\bar{i} &= \bar{I} + 0\bar{J} + 0\bar{k} \\ \bar{j} &= 0\bar{I} + \cos\alpha\bar{J} + \text{sen}\alpha\bar{K} \\ \bar{k} &= 0\bar{I} - \text{sen}\alpha\bar{J} + \cos\alpha\bar{K}\end{aligned}$$

Logo a matriz de transformação homogênea que define a rotação do sistema de coordenadas em torno do eixo “X” é dada por (3.11):

$$\text{Rot}(X, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\text{sen}\alpha & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

### ➤ Rotação em torno do eixo “Y”

Rotacionando o sistema em torno do eixo “Y”, Figura 3.7, e procedendo de forma análoga, obtém-se as equações das novas direções do sistema  $X_1$ ,  $Y_1$  e  $Z_1$ .

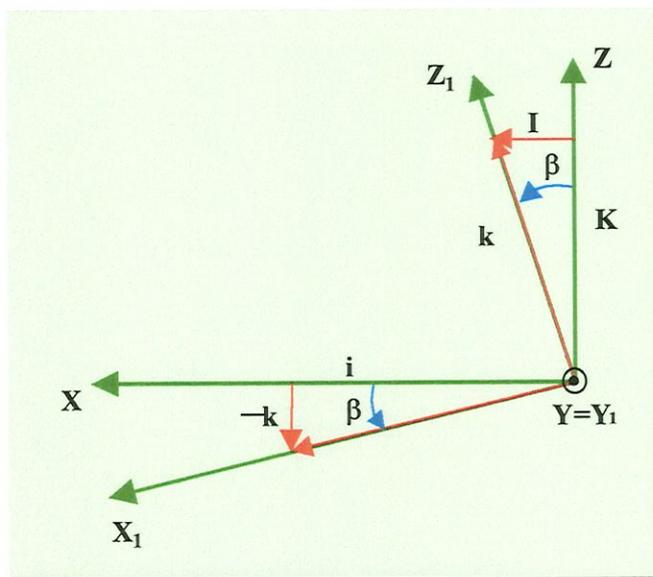


Figura 3.7: Rotação “ $\beta$ ” do sistema  $(X_1, Y_1, Z_1)$  em torno do eixo “Y”.

As expressões para a rotação do sistema em torno do eixo “Y” são.

$$\bar{i} = \cos \beta \bar{I} + 0\bar{J} - \text{sen } \beta \bar{k}$$

$$\bar{j} = 0\bar{I} + \bar{J} + 0\bar{K}$$

$$\bar{k} = -\text{sen } \beta \bar{I} + 0\bar{J} + \cos \beta \bar{K}$$

Representando as equações em matriz transformação tem-se:

$$\text{Rot}(Y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \text{sen } \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen } \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

### ➤ Rotação em torno do eixo “Z”

Considere agora que o sistema  $X_1Y_1Z_1$  tenha sofrido uma rotação  $\gamma$  em torno do eixo “Z”, Figura 3.8.

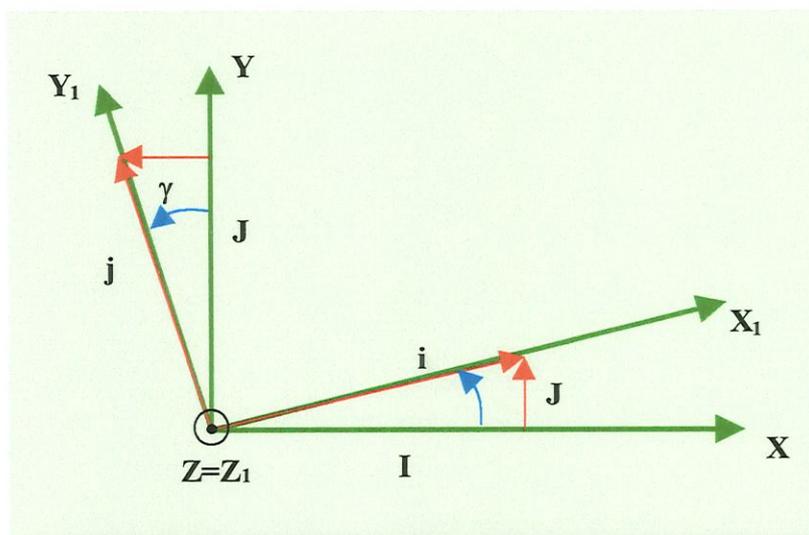


Figura 3.8: Rotação “ $\gamma$ ” do sistema  $(X_1, Y_1, Z_1)$  em torno do eixo “Z”.

As expressões que representam a rotação em torno do eixo “Z” estão escritas nas equações abaixo:

$$\begin{aligned}\bar{i} &= \cos \delta \bar{I} + \text{sen} \delta \bar{J} + 0 \bar{k} \\ \bar{j} &= -\text{sen} \delta \bar{I} + \cos \delta \bar{J} + 0 \bar{K} \\ \bar{k} &= 0 \bar{I} + 0 \bar{J} + \bar{K}\end{aligned}$$

e a matriz transformação de rotação em torno do eixo “Z” é :

$$\text{Rot}(Z, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\text{sen} \gamma & 0 & 0 \\ \text{sen} \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

### ➤ Matriz de rotação Infinitesimal

A matriz de Transformação Homogênea que representa as rotações infinitesimais ao longo dos três eixos durante o movimento de um carro ao longo de uma guia, é dado através da expressão (3.14).

$$\text{Mrot} = \text{“Pitch”} * \text{“Yaw”} * \text{“Roll”} \quad (3.14)$$

Com o resultado desse produto tem-se agrupado em uma única matriz de transformação todas as rotações (erros angulares) que desenvolve um “carro” da MM3C durante uma translação. Para elementos móveis com um grau de liberdade em translação, pode-se assumir que estas rotações envolvidas pela matriz de transformação são muito pequenas, com valores muito próximos de zero. Dessa forma é possível utilizar a aproximação descrita em (3.15):

$$\text{sen} \theta = \theta \quad \text{e} \quad \cos \theta = 1 \quad (3.15)$$

Utilizando (3.15) e desconsiderando eventuais termos de segunda ordem, que são produtos de dois ou mais valores infinitesimais (*Di Giacomo et al., 1997*) obtém-se a matriz de T.H (3.16) que descreve as rotações infinitesimais, ou seja:

$$M_{rot} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon z(i) & \varepsilon y(i) & 0 \\ \varepsilon z(i) & 1 & -\varepsilon x(i) & 0 \\ -\varepsilon y(i) & \varepsilon x(i) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

#### ◆ **Matriz de Ortogonalidade**

São inevitáveis os desvios de ortogonalidade que ocorre entre os três eixos de uma MM3C. Esses desvios podem ser expressos em matrizes de T.H para ortogonalidade representada por (3.17).

$$Orto(x,y,z) = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon z_0 & -\varepsilon y_0 & 0 \\ \varepsilon z_0 & 1 & -\varepsilon x_0 & 0 \\ \varepsilon y_0 & \varepsilon x_0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

#### ◆ **Matriz Erro**

Todas as matrizes de transformação descritas acima podem ser agrupadas em uma única matriz, designada por  $M_{erro}$  (3.18) a qual é composta pela combinação de matrizes de orientação e um vetor de posição:

$$M_{erro} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon z(i) & \varepsilon y(i) & \delta x(i) \\ \varepsilon z(i) & 1 & -\varepsilon x(i) & \delta y(i) \\ -\varepsilon y(i) & \varepsilon x(i) & 1 & \delta z(i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

onde (i) representa o eixo de movimento em questão.

Através da manipulação adequada e conveniente dessas matrizes de transformação, o modelo matemático que prevê o erro volumétrico de uma MM3C pode ser elaborado. Para tanto primeiramente deve-se escolher um sistema de referência para o modelamento. Além desse sistema, sistemas intermediários devem ser colocados em pontos estratégicos da máquina para que todos os movimentos e erros de um sistema como relação a outro sejam descritos.

### 3.3- ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS

É uma prática antiga em quase todas as áreas de pesquisa analisar resultados experimentais utilizando ferramentas estatísticas. Conceitos básicos tais como média, desvio padrão e variância ajudam na análise e interpretação de grandes volumes de dados experimentais. Neste item serão apresentados alguns conceitos básicos para o tratamento estatístico dos dados levantados durante a calibração dos erros da MM3C .

#### ◆ **Conceitos**

A média aritmética ou média simples ( $\bar{X}$ ) é a medida mais comum da tendência de um conjunto de dados ou amostra. A média aritmética é representada pela somatória dos valores observados dividido pelo número de observações ou tamanho da amostra, equação (3.19).

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (3.19)$$

onde:  $X_i$  são os valores das observações e  $n$  o tamanho da amostra

Vale definir que amostra constitui uma quantidade limitada de observações dentro da população escolhidos aleatoriamente dentro da população.

O grau de dispersão dos dados em torno de um valor médio chama-se *variação* ou *dispersão* dos dados. São vários os tipos de medidas de dispersão sendo as mais comuns a amplitude total e o desvio padrão.

A amplitude total de um conjunto de números é a diferença entre o maior e o menor número do conjunto. A norma B89.1.12M utiliza dessa ferramenta para análise de repetibilidade das MM3Cs ( $A = X_{\text{máx}} - X_{\text{min}}$ ).

O desvio padrão amostral de um conjunto de  $N$  números  $X_1, X_2, \dots, X_i$  é representado por “S” e definido como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (3.20)$$

Em 3.20,  $\bar{X}$  é a média dos valores observados e  $N$  o número de valores observados.

A variância amostral de um conjunto de dados é definida como o quadrado do desvio padrão representada por “s<sup>2</sup>”.

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N-1} \quad (3.21)$$

Observações repetidas que diferem devido ao erro experimental, freqüentemente variam em torno de um valor central. A figura mostra a curva da distribuição normal de probabilidades, a qual possui a forma de um sino simétrico em relação à média. Esta distribuição é descrita matematicamente através da função densidade de probabilidade expressa pela equação (3.22).

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2(X-\mu)^2/\sigma^2} \quad (3.22)$$

na qual  $\mu$ = média,  $\sigma$ =desvio padrão,  $\pi=3.14159\dots$ ,  $e=2.71828\dots$

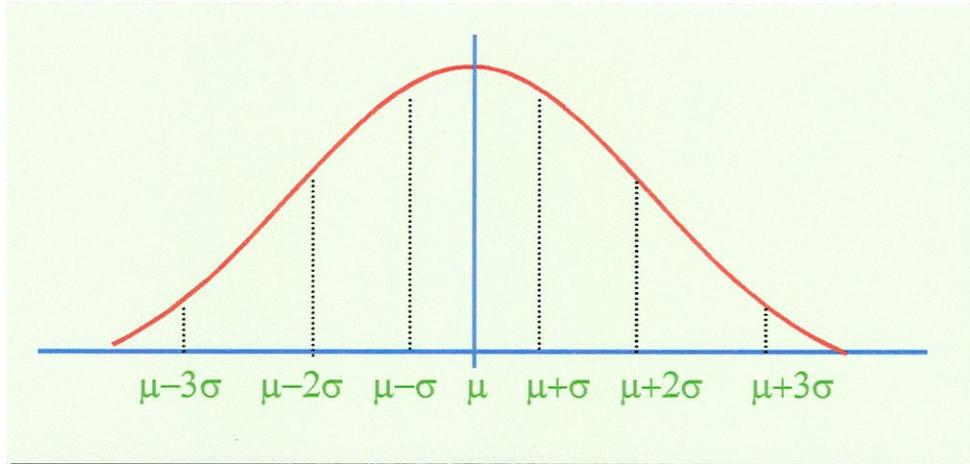


Figura 3.9: Curva Normal Reduzida.

A área sob a curva no intervalo  $\mu \pm \sigma$  equivale a uma probabilidade de 68,27% , no intervalo  $\mu \pm 2\sigma$  equivale a 95,45% e no intervalo  $\mu \pm 3\sigma$  equivale a 99,73% (Dietrich, 1973).

Algumas vezes os resultados obtidos por intermédio de amostras nem sempre concordam exatamente com os teóricos esperados, de acordo com as regras de probabilidade. Deseja-se freqüentemente saber se as freqüências observadas de determinados eventos diferem de modo significativo das freqüências esperadas ou teóricas. Este problema pode ser resolvido pelos testes de aderência que são utilizados para verificar se o modelo é adequado à distribuição a ser adotada.

*Carl Pearson* desenvolveu o Teste Qui-quadrado que é uma medida da discrepância existente entre as freqüências observadas e

esperadas. Esta medida é dada pela estatística  $\chi^2$  apresentada pela fórmula (3.23)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(n_o - n_e)^2}{n_e}, \quad (3.23)$$

onde: - $n_o$  são as frequências observadas

- $n_e$  são as frequências esperadas ou teóricas

Para calcular o valor  $n_e$  utiliza-se uma tabela de distribuição Gaussiana. Toma-se na tabela os valores de  $F(w)$ , onde,  $F(w)$  é a probabilidade desta leitura estar no intervalo  $[-\infty, w]$ .

$$w = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.24)$$

onde:

$x$  é o limite de cada grupo;

$\mu$  é a média dos dados;

$\sigma$  é o desvio padrão dos dados.

Quando  $\chi^2 = 0$ , as frequências teóricas e observadas concordam exatamente, enquanto, quando  $\chi^2 > 0$ , isso não se dá. Quanto maior for o valor de  $\chi^2$ , maior será a discrepância entre as frequências observadas e esperadas ou seja maior será a divergência entre o modelo teórico e o atual.

Por sua vez uma análise de variância tem por finalidade comparar médias amostrais provenientes de diversas populações, aplicando a comparação de diversos tratamentos. Suponhamos a existência de  $n$  amostras com  $j$  elementos cada, que devam ser comparadas.

Para a corrente análise supõem-se que um modelo qualquer seja linear. Algumas considerações de como o modelo linear geral está conectado à análise de variância devem ser examinadas.

A hipótese nula que estamos interessados em testar é que as médias de diferentes populações são as mesmas contra a hipótese alternada de que ao menos uma média da população é diferente das outras. Em notação matemática isto pode ser expresso por:

$$H_0: \mu = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (3.25)$$

$$H_a: \mu_p \neq \mu_q \text{ para qualquer } p \text{ e } q$$

Segundo isto, cada média da população  $\mu_j$ , pode ser vista como um somatório das médias teóricas  $\mu$  e  $T_j$ .

Assumimos então sem perda da generalidade que:

$$\sum_{j=1}^k T_j = 0$$

Obviamente, se  $H_0$  é verdadeiro,  $T_j \equiv 0$  para todos  $j = 1, 2 \dots k$ , utilizando a equação abaixo a hipótese da equação (3.25) pode ser rescrita como:

$$H_0: T_1 = T_2 = \dots = T_k = 0$$

$$H_a: T_p \neq 0 \text{ para qualquer } p.$$

Entretanto, o valor de cada observação pode ser observada como a realização do resultado da média teórica  $\mu$ .

A variância de cada população,  $\sigma_j^2$ , é equivalente ao valor comum da variância,  $\sigma^2$ , portanto pode-se formar 2 estimativas de  $\sigma^2$  para o set de dados. A primeira é uma estimativa de variação dentro das amostras de um nível, ou seja, a diferença entre os elementos que compõem as amostras. A Segunda é uma estimativa de variação entre as amostras de todos os níveis da população.

Sendo  $S_e^2$  e  $S_T^2$  duas estimativas da variância total, o quociente:

$$F_c = \frac{S_T^2}{S_e^2}$$

possui uma distribuição F às duas variâncias, temos que, se as médias dos tratamentos forem diferentes, as duas variâncias também serão diferentes, sendo  $S_T^2$  maior que  $S_e^2$ .

Por outro lado se as médias forem iguais não há motivo para as duas variâncias serem diferentes, pois qualquer amostra do experimento deve apresentar estimativa da variância dentro do erro da amostragem.

Adotando  $k(n-1)$  e  $(k-1)$  graus de liberdade, obtemos um valor  $F_t$  e comparamos com  $F_c$  calculado e concluimos que;

Se  $F_c > F_t$  as médias diferem significativamente;

Mas se  $F_c < F_t$  não se pode afirmar que as médias sejam diferentes.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROPOSTA PARA A CALIBRAÇÃO INDIRETA DE UMA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS**

Os erros das medições realizadas em Máquinas de Medir a Três Coordenadas podem Ter origem em dois grandes grupos de fatores que são os fatores internos e fatores externos ao sistema de medição. Dentre esses fatores, pode-se dizer que os erros geométricos são os que mais afetam a acuracidade e a repetibilidade das medições.

Os erros geométricos são erros provenientes tanto dos processos de fabricação dos componentes mecânicos que formam o conjunto do sistema de medição a três coordenadas quanto da montagem do sistema. Nas MM3Cs os erros geométricos são divididos em: erros de posição, erros de reticidade e erros angulares, os quais acrescidos dos erros de ortogonalidade somam um total de 21 erros para uma máquina de medir com três eixos supostamente ortogonais.

A identificação desses erros pode ser feita através de procedimentos de calibração os quais se utilizam dos métodos de calibração direta ou indireta. A calibração indireta faz uso de artefatos padrões para o levantamento dos erros da MM3C, enquanto a calibração direta visa calibrar os erros geométricos individuais da máquina e obter como resultado o erro volumétrico em um determinado ponto do volume de trabalho a partir das equações de sintetização.

O uso da calibração Indireta porém, pode ser mais viável que o método de calibração direta. Na calibração indireta o tempo de calibração e os custos envolvidos são consideravelmente menores se comparados com os métodos de calibração direta que envolvem técnicas matemáticas mais refinadas, tempo de calibração relativamente grande e alta tecnologia de medição.

Um dos métodos de calibração indireta utiliza a Barra de Esferas como artefato padrão. O sistema Barra de Esferas é um conjunto de duas esferas acopladas às extremidades de uma barra tubular, um suporte permite a fixação da posição e orientação da Barra de Esferas no volume de trabalho da MM3C.

O valor tido como padrão, compreende a distância entre os centros das duas esferas e o erro de medição corresponde a diferença entre o padrão e a distância entre centros da Barra de Esferas medida pela MM3C.

Visto a descrição acima, é objetivo deste trabalho calibrar uma máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo “Ponte Móvel” utilizando uma Barra de Esferas conforme descreve o procedimento da norma ANSI/ASME B89 4.1, 1995 e comparar os resultados com os obtidos através do método da Sintetização.

O resultado da calibração com a Barra de Esferas prescrito pela norma ANSI/ASME B89 4.1, 1995 é avaliado tomando-se a amplitude dos desvios medidos no teste, o qual corresponde a medição da Barra de Esferas no volume de trabalho da MM3C em 20 posições e orientações pré-determinadas pela norma.

A MM3C a ser calibrada encontra-se no Laboratório de Metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos-EESC-USP sob condições controladas de temperatura e umidade.

As fases para o desenvolvimento da proposta podem ser descritas a seguir:

- Desenvolvimento de um modelo matemático da Máquina de Medir a Três Coordenadas utilizando a teoria das

transformações homogêneas e a montagem das três equações de sintetização;

- Calibração dos erros individuais da MM3C envolvidos nas equações de sintetização;
- Calibração da Barra de Esferas feita na máquina universal (S.I.P), caracterizando a distância entre centros das esferas como padrão;
- Calibração da MM3C utilizando a Barra de Esferas previamente calibrada seguindo os critérios da norma ANSI/ASME B89 4.1.
- Determinação dos erros volumétricos dos centros das esferas através das equações de sintetização, projeção do vetor “erro volumétrico” na direção de medição da Barra de Esferas.

#### **4.1- MODELAGEM MATEMÁTICA DA MM3C UTILIZANDO O PRINCÍPIO DAS TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS**

Para se utilizar o método da sintetização de erros foi necessário a elaboração de um modelo matemático para descrever a relação entre os componentes de erros da MM3C.

A MM3C foi modelada seguindo o princípio das transformações homogêneas que possibilitou representar, através da relação entre vetores e matrizes, os movimentos de translação e rotação entre as partes móveis da máquina. Da aplicação do método, três equações de sintetização foram geradas e estão descritas abaixo. As equações evidenciam a contribuição de cada erro geométrico em um determinado eixo de medição.

$$E_x = \delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z) + [\epsilon_z0 + \epsilon_z(y)] * Y_{34} + \epsilon_y0 * (Z + Z_{45}) - \epsilon_y(x) * (-Z - Z_{45}) - \epsilon_y(z) * (-Z - Z_{45}) + \epsilon_y(y) * (Z + Z_{12} + Z_{45}) \quad (4.1)$$

$$E_y = \delta_y(y) + \delta_y(x) + \delta_y(z) + X * (\epsilon_z0 + \epsilon_{zy}) + Z * [\epsilon_x0 - \epsilon_x(x) + \epsilon_x(y) - \epsilon_x(z)] + Z_{45} * [\epsilon_x0 - \epsilon_x(x) + \epsilon_x(y) - \epsilon_x(z)] - \epsilon_{xy} * Z_{12} \quad (4.2)$$

$$Ez = \delta z(z) + \delta z(x) + \delta z(y) - \varepsilon_y(y) * X - \varepsilon_x(x) * Y_{34} - \varepsilon_x(y) * Y_{34} \quad (4.3)$$

Estas três equações permitem determinar os módulos e os sinais das componentes do erro volumétrico que pode ser escrito por  $E_v = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ , e que representa o erro em um determinado ponto do volume de trabalho da máquina.

#### **4.2- CALIBRAÇÃO DIRETA DOS ERROS DA MM3C**

Após executada a modelagem da MM3C passou-se a calibração dos erros geométricos envolvidos nas equações de sintetização.

Durante a calibração, a temperatura e umidade do ambiente foram controlados a  $20 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$  e  $45 \pm 5\%$  respectivamente.

Os instrumentos utilizados na calibração foram:

- Sistema Interferométrico Laser HP- calibração dos erros de “Posição”, “Pitch”, “Yaw” e “Retilicidade”;
- Nível eletrônico – calibração dos erros de “Roll”;
- Esquadro de granito “Mitutoyo” – Calibração dos erros de Ortogonalidade.

Todos estes instrumentos possuem incerteza adequada para a calibração dos erros. Os resultados das calibrações foram tratados e expostos em gráficos utilizando um programa computacional compatível.

#### **4.3 – CALIBRAÇÃO DA BARRA DE ESFERAS**

A Barra de Esferas utilizada nos testes foi calibrada numa máquina universal “S.I.P” (Societe Genevoise D’Instuments de Physique). A distância entre os centros das esferas foi determinada e considerada como o padrão.

Durante a calibração foi utilizado uma luva para o manuseio da mesma, impedindo a transferência de calor do operador para a Barra de Esferas.

Mediu-se primeiramente os diâmetros das duas esferas sendo que cada esfera foi medida dez vezes e logo após foram realizadas dez medições do comprimento total da barra.

Um tratamento estatístico foi efetuado sobre os resultados das medições obtendo a distância padrão entre centros das esferas.

#### **4-4 – CALIBRAÇÃO DA MM3C COM A BARRA DE ESFERAS**

A máquina de Medir a Três Coordenadas foi calibrada seguindo os procedimentos da norma ANSI/ASME B89 4.1.

A Barra de Esferas foi medida em 18 posições e orientações diferentes no volume de trabalho da MM3C. Foram feitas cinco medições em cada uma das 18 posições planejadas, sendo que sobre cada esfera foram tomados quatro pontos distintos.

Simultaneamente à obtenção dos pontos pela MM3C sobre as esferas, foram coletadas as coordenadas cartesianas “X”, “Y” e “Z” de cada ponto e arquivadas em um microcomputador.

Como resultado da calibração indireta tem-se o valor do erro de medição que é definido como a diferença entre o padrão e a distância entre os centros das esferas da Barra de Esferas medida pela MM3C. Descreve-se:

$$E_{bi} = V_{mm} - V_b \quad (4.4)$$

onde,  $E_{bi}$  é o erro de medição avaliado pelo método indireto,  $V_b$  é o valor do padrão e  $V_{mm}$  é o valor medido pela MM3C.

Os valores dos erros foram colocados em um gráfico (conforme propõe a norma ANSI/ASME B89 para critério de desempenho volumétrico). A amplitude máxima dos erros encontrados identificou a tolerância de trabalho da Máquina de Medir a Três Coordenadas.

#### 4.5 - APLICAÇÃO DO MÉTODO DA SINTETIZAÇÃO PARA CÁLCULO DE CALIBRAÇÃO DA BARRA DE ESFERAS

Após a calibração indireta, foi aplicado um programa computacional simples desenvolvido para calcular as coordenadas do centro de uma esfera a partir das coordenadas cartesianas de quatro pontos distintos. Os pontos utilizados no cálculo das coordenadas dos centros das esferas foram as coordenadas cartesianas arquivadas durante os ensaios de calibração.

De posse das coordenadas dos centros das esferas, das equações de sintetização e das curvas de calibração dos erros geométricos foi possível calcular o erro volumétrico no centro das esferas medidas.

Para o cálculo do erro de medição fez-se necessário projetar os erros volumétricos dos centros das esferas na direção de medição da Barra de Esferas, pois os erros volumétricos podem apresentar direções diferentes entre si.

O resultado da calibração por este método é dado pela equação (4.5):

$$E_{bd} = E_{b2} - E_{b1} \quad (4.5)$$

onde  $E_{bd}$  é o erro de medição avaliado pelo método direto;  $E_{b1}$  é a projeção do erro volumétrico do centro da primeira esfera na direção de medição da Barra de Esferas e  $E_{b2}$  é a projeção do erro volumétrico do centro da segunda esfera na direção de medição da Barra de Esferas.

Determinados os resultados da calibração indireta e direta os mesmos foram comparados e avaliados através de gráficos e tabelas que foram analisados e discutidos.



## **CAPÍTULO 5**

### **DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DA MM3C TIPO PONTE MÓVEL**

Neste capítulo serão descritos os itens referentes ao desenvolvimento do trabalho, cujo objetivo é calibrar indiretamente uma MM3C do tipo Ponte Móvel.

O capítulo está dividido em: aplicação da modelagem da MM3C utilizando Transformações Homogêneas, calibração dos erros geométricos e calibração indireta de MM3Cs.

A MM3C do tipo Ponte Móvel foi modelada utilizando o princípio das transformações homogêneas conforme a teoria apresentada no Cap. 3, a qual conduz a obtenção das equações que compõem o erro volumétrico. De posse dessas equações tornou-se necessário a calibração dos 20 erros geométricos (intrínsecos às equações desenvolvidas), os quais estão aqui abordados com todas as características do processo de calibração.

Feito isso passou-se a fase de calibração indireta da MM3C, isto é, utilizando uma Barra de Esferas processou-se uma calibração indireta.

Esta Barra de Esferas é composta por duas Esferas de aço de precisão e uma Barra tubular também de aço, cada esfera foi fixada em cada uma das extremidades da Barra.

A Barra de Esferas primeiramente foi calibrada numa máquina de medir universal identificando-se assim, a distância entre os centros das Esferas e tomada como padrão. Logo após, a Barra de Esferas foi levada a MM3C e medida em 18 posições e orientações recomendadas pela norma *ANSI/ASME B89 4.1, 1995*.

Durante a calibração da MM3C com a Barra de Esferas, as coordenadas dos pontos, determinados pela sonda sobre as Esferas, foram arquivadas em um micro computador através de uma interface.

A distância entre as Esferas nas posições designadas pela norma foram obtidas pela MM3C e comparadas ao comprimento padrão, determinando-se assim os erros nas 18 posições em que a Barra de Esferas foi medida. Posteriormente, as coordenadas dos centros das Esferas foram sintetizadas no volume de trabalho da MM3C utilizando as equações de sintetização. O erro volumétrico dos centros das Esferas foram obtidos e decompostos na direção de cada uma das 18 posições em que a Barra foi submetida no ensaio, determinando-se o erro que a máquina comete na medição do comprimento da Barra de Esferas por este método.

### **5.1 – MODELAGEM DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS DO TIPO PONTE MÓVEL UTILIZANDO A TÉCNICA DE TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS.**

De acordo com a teoria exposta no Cap. 3 pode-se desenvolver um modelo matemático que represente as relações entre partes móveis da MM3C tendo como objetivo final, a descrição das componentes do erro volumétrico em qualquer ponto dentro do volume de trabalho da máquina.

Para isso, é necessário ter uma visão clara do desenho da máquina para que se possa identificar os carros, a sonda, as escalas

e os braços de Abbè, pois esses elementos descrevem a posição relativa entre cada sistema de coordenada que será utilizado na modelagem.

Primeiramente foi necessário escolher a posição no volume de trabalho da máquina onde seria colocado o sistema de referência para o modelamento. Este ponto, denominado de ponto “0” (zero), Figura 5.1 ou ponto de referência, foi colocado sobre o início da escala do eixo “Y”. O sistema de coordenada do ponto “zero”, assim como todos os demais, foram colocados de forma que estejam paralelos ao sistema de coordenadas da máquina.

O próximo, sistema de coordenadas “1”, foi colocado sobre a ponte móvel a qual representa o movimento deste carro sobre o eixo “Y”. Neste ponto ocorre o vínculo entre os eixos “Y” e “X”. O sistema de coordenada “2” foi colocado sobre o eixo “X”, junto ao início da escala. A translação “Z<sub>12</sub>” é que representa o vínculo entre os sistemas “1” e “2” e é chamada de translação “fixa” pois não existe movimentos entre os dois referenciais

O sistema de coordenadas “3” foi colocado sobre o carro que se movimenta na direção do eixo “X”, o qual transporta o eixo “Z” e que vincula o sistema de coordenadas “4” que foi colocado no eixo “Z”, mais especificamente no centro desse eixo. O braço que vincula o sistema “3” e “4” representa uma distância fixa aqui chamada de “Y<sub>34</sub>”. Observa-se que os sistemas de coordenadas foram colocados de forma a possibilitar a medição das distâncias fixas que aparecem no modelo.

O sistema de coordenadas “5” foi colocado na ponta da sonda, no centro do apalpador, e a distância fixa entre o extremo inferior do eixo “Z” e a ponta da sonda designasse-a por “Z<sub>45</sub>”.

Na Figura 5.1 pode-se visualizar um esquema da MM3C do tipo Ponte Móvel que foi utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, com os referidos sistemas de coordenadas e off-sets (distâncias fixas).

Passa-se agora ao estudo da relação entre os sistemas de coordenadas que definem a contribuição dos erros de translação, os angulares e os de ortogonalidade no caminho entre o ponto de referência e a ponta da sonda.

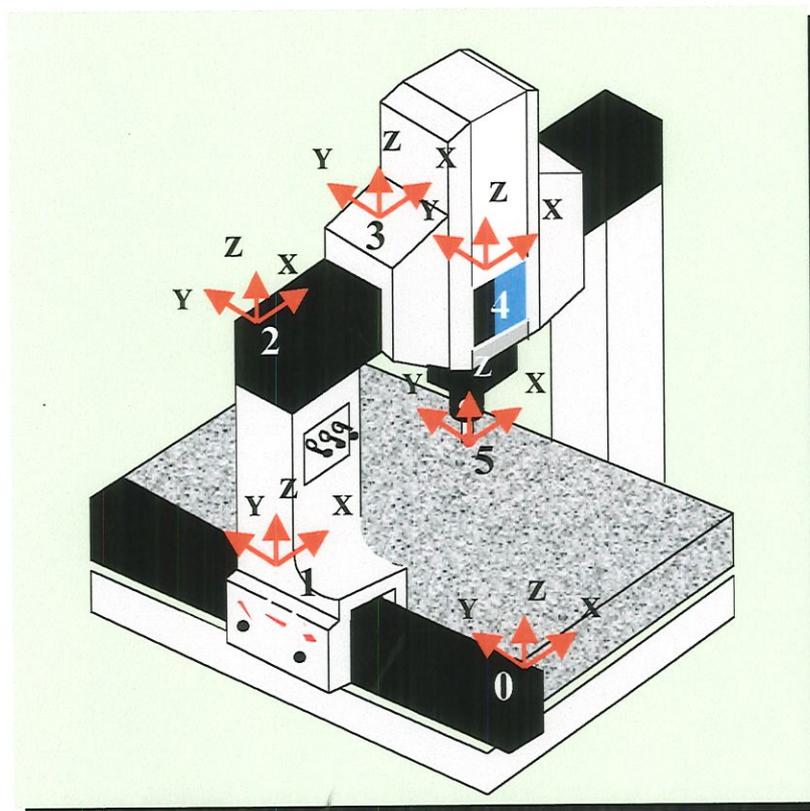


Figura 5.1: Representação da MM3C tipo Ponte Móvel com os sistemas de coordenadas

Colocados os sistemas de coordenadas no esquema da estrutura da máquina é possível representar todos os elementos móveis da mesma através de dois vetores a partir do sistema de coordenadas de referência. Um leva a origem do sistema de referência até a ponta da sonda, chamado de *caminho da sonda*, enquanto o outro a leva até o ponto de contato ideal da peça, *caminho da peça*. Os dois caminhos de movimento levariam ao mesmo ponto mas como é sabido os erros interferem em ambos os caminhos acarretando um erro de posicionamento (Vieira Sato, 1998).

Empregando corretamente a técnica de transformações homogêneas e considerando que, se subtrairmos *caminho da sonda* (caminho com erro) denominado por  $Vet_{sonda}$  do *caminho da peça* (caminho sem erro),  $Vet_{peça}$ , teremos o erro total da máquina.

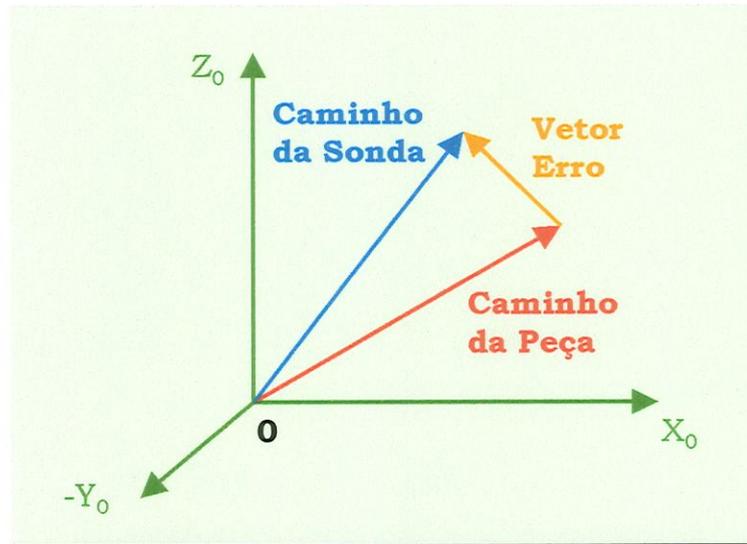


Figura 5.2: Representação Vetorial dos caminhos real e ideal.

Assim sendo o erro total da máquina, erro volumétrico, pode ser obtido através da equação (5.1)

$$[E]=[Vet_{sonda}]-[Vet_{peça}] \quad (5.1)$$

#### ▪ **Caminho da peça**

O vetor que representa o *caminho da peça*, sem erros tem como componentes as translações ideais e são observadas na matriz de transformação abaixo. Observe que nesta matriz não estão incluídos os erros de rotação e também os erros de translação.

$$[Maq] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & (X) \\ 0 & 1 & 0 & (Y - Y_{34}) \\ 0 & 0 & 1 & (Z_{12} - Z_{45} - Z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

onde:

X, Y e Z são as leituras mostradas na máquina.

$Y_{34}$ ,  $Z_{12}$  e  $Z_{45}$  são os braços de Abbè.

#### ▪ **Caminho da Sonda**

Do sistema de coordenadas “0” até o sistema “1” ocorre uma translação na direção do eixo “Y” aqui chamada de  $[M_{ovy}]$ . Como essa translação depende do posicionamento da ponte da máquina sobre esse eixo torna-se necessário definir uma outra matriz a qual carrega os erros de translação e rotação na direção preferencial do eixo “Y” a qual chamamos de  $[T_{erro01}]$ . Assim:

$$[M_{ovy}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$[T_{erro01}] = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta x(y) \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Entre os sistemas “1” e “2” observa-se que não há nenhum movimento entre eles, apenas uma translação pura do sistema de coordenadas. Essa translação já foi definida anteriormente pela distância fixa  $[Z_{12}]$ . Porém ocorreu uma mudança do eixo “Y” para o eixo “X”, o sistema “2” está na parte fixa do eixo “X”. Como se trata de um instrumento mecânico e que depende de ajustes, isso implica na introdução de possíveis erros de ortogonalidade entre os sistemas “1” e “2”.

A matriz de transformação que rege o erro de ortogonalidade entre os eixos “Y” e “X” é definida como [Orto<sub>yx</sub>], assim:

$$[T_{12}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$[\text{Orto}_{xy}] = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon z_0 & 0 & 0 \\ \varepsilon z_0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Há duas matrizes de transformação que modelam o vínculo entre os sistemas “2” e “3”. Uma matriz [Mov<sub>x</sub>] representa a translação entre estes sistemas, que depende do posicionamento do carro que se movimenta sobre o eixo “X”. A outra matriz, considera os erros de translação e rotação que ocorrem durante o deslocamento do carro, ela foi chamada de [T<sub>erro23</sub>].

$$[\text{Mov}_x] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$[\text{T}_{\text{erro23}}] = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon z(x) & \varepsilon y(x) & \delta x(x) \\ \varepsilon z(x) & 1 & -\varepsilon x(x) & \delta y(x) \\ -\varepsilon y(x) & \varepsilon x(x) & 1 & \delta z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Entre os sistemas “3” e “4” observa-se uma translação pura e possíveis erros de ortogonalidade, isto deve-se ao fato do sistema de coordenada 4 estar sobre o eixo “Z” o qual desliza sobre os mancais fixos presos no carro “X”. Portanto, torna-se necessário modelar os

erros de ortogonalidade entre os eixos “Z” e “X”, e “Z” e “Y” e ainda modelar os erros de translação e rotação que ocorrem no sistema de coordenada “4” quando o eixo “Z” se movimentar. Define-se, assim, as matrizes dadas em (5.9) a (5.11).

$$[T_{34}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$[\text{Orto}_{xyz}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon y_0 & 0 \\ 0 & 1 & -\varepsilon x_0 & 0 \\ -\varepsilon y_0 & \varepsilon x_0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$[\text{Terro}_{34}] = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon z(z) & \varepsilon y(z) & \delta x(z) \\ \varepsilon z(z) & 1 & -\varepsilon x(z) & \delta y(z) \\ -\varepsilon y(z) & \varepsilon x(z) & 1 & \delta z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Para modelar as translações entre os sistemas “4” e “5” foram utilizadas duas matrizes de transformação. A primeira, eq. (5.12), modela a translação do eixo “Z”.

$$[\text{Mov}_z] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

A outra designada por  $[T_{\text{sonda}}]$  modela o comprimento fixo do término do eixo “Z” até o centro da esfera da sonda.

$$[T_{\text{sonda}}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Para se obter a expressão [Vetsonda] que relaciona os movimentos da ponta da sonda com o sistema da coordenada de referência, deve-se executar a soma dos vetores entre os referenciais intermediários. Isso se dá através da multiplicação entre as matrizes definidas acima, respeitando sua ordem de ocorrência.

$$[Vetsonda] = [Mov_y] * [Terroy] * [T_{12}] * [Orto_{xy}] * [Mov_x] * [Terrox] * [T_{34}] * \\ * [Orto_{xyz}] * [Terroz] * [T_{sonda}] * [Mov_z] * [Origem] \quad (5.14)$$

Pode-se considerar que o ponto de contato entre a sonda e a peça é puntiforme. Deste modo as rotações então perdem sua importância podendo ser eliminadas do equacionamento, basta para isso multiplicar cada uma das matrizes Vetsonda e Vetpeça pelo vetor dado na expressão (5.15):

$$[e] = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (5.15)$$

Subtraindo os caminhos de medição “Vetsonda” e “Vetpeça” conforme a equação (5.1) definida previamente, pode-se com algumas simplificações chegar às equações das componentes do erro volumétrico, como mostram as equações (5.16), (5.17) e (5.18).

$$E_x = \delta x(x) + \delta x(y) + \delta x(z) + [\varepsilon z_0 + \varepsilon z(y)] * Y_{34} + \varepsilon y_0 * (Z + Z_{45}) - \varepsilon y(x) * (-Z - Z_{45}) \\ - \varepsilon y(z) * (-Z - Z_{45}) + \varepsilon y(y) * (Z + Z_{12} + Z_{45}) \quad (5.16)$$

$$E_y = \delta y(y) + \delta y(x) + \delta y(z) + X * (\varepsilon z_0 + \varepsilon z y) + Z * [\varepsilon x_0 - \varepsilon x(x) + \varepsilon x(y) - \varepsilon x(z)] \\ + Z_{45} * [\varepsilon x_0 - \varepsilon x(x) + \varepsilon x(y) - \varepsilon x(z)] - \varepsilon x y * Z_{12} \quad (5.17)$$

$$E_z = \delta z(z) + \delta z(x) + \delta z(y) - \varepsilon y(y) * X - \varepsilon x(x) * Y_{34} - \varepsilon x(y) * Y_{34} \quad (5.18)$$

## 5.2- CALIBRAÇÃO DIRETA DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Depois de elaborado o modelo cinemático da MM3C, torna-se necessário a calibração de cada erro individual que pertence as equações das componentes do erro volumétrico.

A descrição das características da MM3C do tipo Ponte Móvel, bem como uma abordagem sobre a instrumentação utilizada no processo de calibração estão descritos nesse item.

### 5.2.1 – Características da Máquina de Medir Utilizada

A Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo Ponte Móvel calibrada, encontra-se no Laboratório de Máquinas Ferramentas (LAMAFE) da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC – USP. As características técnicas da mesma estão dadas na Tabela 5.1.

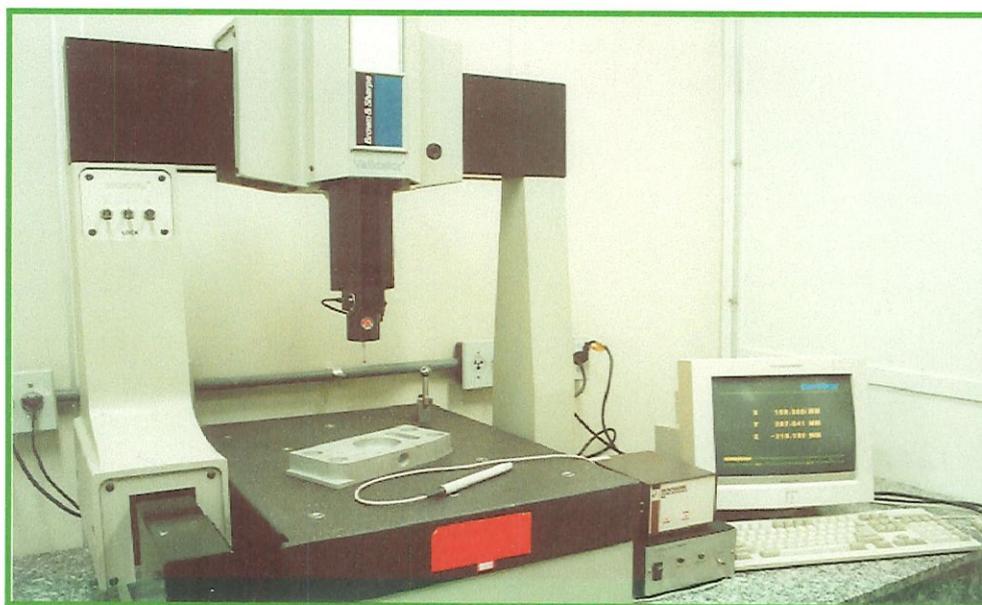


Figura 5.3: MM3C a ser Calibrada.

A máquina está numa sala com ambiente controlado (temperatura =  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa =  $40 \pm 10\%$ ), sobre uma bancada que serve de suporte, sendo ela rígida e estável. Todas essas condições se mantêm durante o processo de calibração.

Tabela 5.1: Informações Técnicas sobre a MM3C tipo “Ponte Móvel”.

<b>MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS</b>			
Fabricante/ país: Brown & Sharpe/ E. U. A.			
Tipo Ponte Móvel			
Número de série: 098066			
Ano de fabricação: 1988			
Proprietário: LAMAFE – Depto. Eng. Mecânica – EESC – USP			
<b>Desempenho a 20 ± 1 C ( 68 ± 2 F)</b>			
	Erro volumétrico (B89)		± 0,015 mm
	Erro linear (B89)		± 0,003 mm
	Repetibilidade (B89)		± 0,002 mm
	Resolução		0,002 mm
	Faixa do mostrador		± 0000,000
<b>Dimensões</b>			
	Faixa de operação	Capacidade de trabalho	Dimensões totais
X	356 mm	457 mm	Comprimento 743 mm
Y	406 mm	610 mm	Largura 730 mm
Z	305 mm	381 mm	Altura 1340 mm
<b>Pesos</b>			
	Somente a máquina:		149 kg
	Sistema completo		168 kg
	Embalada		220 kg
	Peso máximo da peça medida		68 kg
<b>Níveis operacionais exigidos</b>			
	Faixa de temperatura de operação		10 a 40°C
	Pressão mínima de ar		480 kPa
	Consumo de ar		357 m <sup>3</sup> /h
	Conjunto regulador de pressão		380 kPa
	Tensão de alimentação		110/120 V AC, 50/60 Hz
	Potência consumida		60 Watts
	Monitor		25 Watts

A MM3C possui estrutura em alumínio fundido contando com três apoios niveladores, que suportam o desempenho de granito. Possui uma capacidade volumétrica de 450 x 600 x 380 mm, com movimentos nas direções “X”, “Y” e “Z” em que a ponte se desloca na direção do eixo “Y” carregando o carro que se movimenta na direção do eixo “X”, este por conseguinte, suporta o eixo vertical “Z” que transporta a sonda. Todos os carros são suportados por mancais aerostáticos e seus movimentos são acionados manualmente.

Uma sonda da marca “Renishaw” do tipo “Touch-trigger” é utilizada no gatilhamento do sinal para aquisição dos pontos sobre a superfície da peça a ser medida. O sistema de leitura das coordenadas é feito através de escalas óticas dispostas sobre cada um dos eixos de movimento. Estas escalas possuem um sistema ópto-eletrônico como transdutor de deslocamento. Um computador com programas dedicados permite determinar as características medidas a partir dos pontos obtidos com a sonda. Uma caneta ótica agiliza a interação entre o programa computacional e o usuário.

### **5.2.2-Instrumentação para Calibração Direta da MM3C**

A escolha da instrumentação para calibração direta da MM3C depende do tipo de erro a ser medido, abaixo estão relacionados os instrumentos mais comuns utilizados na calibração das MM3C e as que serão utilizadas neste trabalho.

#### **➤ Instrumentação para medição do erro de Posição**

O interferômetro laser, o padrão passo a passo e a escala ótica são os instrumentos mais comuns na determinação do erros de posição. As características metrológicas dos instrumentos citados estão mencionadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Características dos instrumentos para calibração dos erros de Posição

<i>Características Metroológicas</i>			
<i>Instrumento</i>	<i>Faixa</i>	<i>Resolução</i>	<i>Incerteza</i>
Interferômetro Laser	100 m	0.010 $\mu\text{m}$	3 PPM
Escala ótica	1 m	0.05 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
Padrão passo a passo	0.5 – 1.5 m	10 – 25,4 mm	0.1 $\mu\text{m}$

#### ➤ Instrumentação para Medição dos Erros Angulares

Considerando que os erros angulares da MM3C em estudo são considerados pequenos pode-se utilizar quatro tipos de instrumentos, disponíveis comercialmente: interferômetro laser, nível eletrônico, nível de bolha e autocolimador cujas características estão abaixo.

Tabela 5.3: Características dos Instrumentos para Medição dos Erros Angulares.

<i>Características dos Instrumentos de Medição</i>			
<i>Instrumento</i>	<i>Faixa</i>	<i>Resolução</i>	<i>Incerteza</i>
Interferômetro Laser	$\pm 50$ min.	0.1 seg.	0,1 seg.
Autocolimador	10 min.	F.O/1000	0.1 seg.
Nível de bolha	10 min.	1 seg.	1 seg.
Nível Eletrônico	$\pm 1$ grau	0.5 – 0.2 seg.	1 seg.

➤ **Instrumentação para a Medição dos Erros de Retilidade e Ortogonalidade.**

Os instrumentos abaixo relacionados, Tabela 5.4, destacam-se como os mais utilizados comercialmente para a medição desses erros.

Tabela 5.4: Instrumentação para medição dos erros de Retilidade e Ortogonalidade.

<i>Características Metroológicas dos Instrumentos</i>			
<i>Instrumento</i>	<i>Faixa</i>	<i>Resolução</i>	<i>Incerteza</i>
Barra Padrão	1,5 m	0,03 $\mu\text{m}$	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$
Esquadro Mecânico	1,5 m	0,03 $\mu\text{m}$	5,0 $\mu\text{m}/\text{m}$
Interferômetro Laser	30,0 m	0,25 $\mu\text{m}$	0,5 $\mu\text{m}/\text{m}$
Fio Esticado	50,0 m	-	-
Alinhamento com Telescópio	100,0 m	2,0 $\mu\text{m}$	5,0 $\mu\text{m}$
Microscópio Eletrônico	-	0,1 $\mu\text{m}$	-

➤ **Escolha da Instrumentação Utilizada**

Os critérios utilizados na escolha dos instrumentos que satisfazem as necessidades do presente trabalho foram baseados nas especificações técnicas dos instrumentos, na Máquina de Medir a Três Coordenadas em questão e nas informações de trabalhos já publicados. Os instrumentos devem possuir incertezas de medição de 5 a 10 vezes menor que a da MM3C a ser calibrada, devem atender as faixas de operação dos eixos da MM3C e possuir versatilidade de uso em seu volume.

Tabela 5.5: Instrumentação Utilizada na Calibração dos Erros.

<i>Características dos instrumentos utilizados para a calibração</i>				
<b>Erro</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Faixa</b>	<b>Resolução</b>	<b>Incerteza</b>
Posição	Interferômetro Laser	40 m	0,01 $\mu\text{m}$	$\pm 0.1$ PPM
Retilineidade	Interferômetro Laser	30 m	0,01 $\mu\text{m}$	$\pm 3,5$ %
Ortogonalidade	Esquadro Mecânico	220 x 150mm	-	$(2 + L/100)\mu\text{m}$
"Roll"	Nível Eletrônico	$\pm 600$ seg	0,1 seg	$\pm 0,2$ seg
	Nível de Bolha	0-100 mm/m	0,01mm/m	$\pm 0,01$ mm/m
"Yaw"-"Pitch"	Interferômetro Laser	$\pm 10$ graus	0,1 arc seg	$\pm 0,05$ arc-seg

### 5.2.3- Procedimentos de Calibração

Nas equações de sintetização obtidas para a máquina estudada aparecem 20 erros individuais. Estes erros foram calibrados respeitando os seguintes critérios: os intervalos de medição para os eixos "X", "Y" e "Z" foram de  $25 \pm 1$ mm; foram realizados dez ciclos de medição sendo cinco tomadas de erros no sentido de ida e cinco no sentido de volta; as condições ambientais nas quais foram submetidos os ensaios permaneceram constantes dentro dos seguintes limites:

Temperatura no trilho dos eixos =  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$

Umidade Relativa =  $45 \pm 5\%$

Pressão Atmosférica =  $693 \pm 3$  mmHg

Tempo de Equilíbrio do conjunto = 12 horas

A aquisição de dados dos erros paramétricos utilizando o interferômetro laser foi feita utilizando uma interface GPIB permitindo a comunicação entre o sistema interferométrico e o microcomputador.

### a- Calibração do Erro de Posição

O instrumento utilizado na determinação dos erros de posição foi o Interferômetro Laser da Hawlett Packard modelo HP5528A. Seu princípio de funcionamento pode ser visto na Figura 5.4.

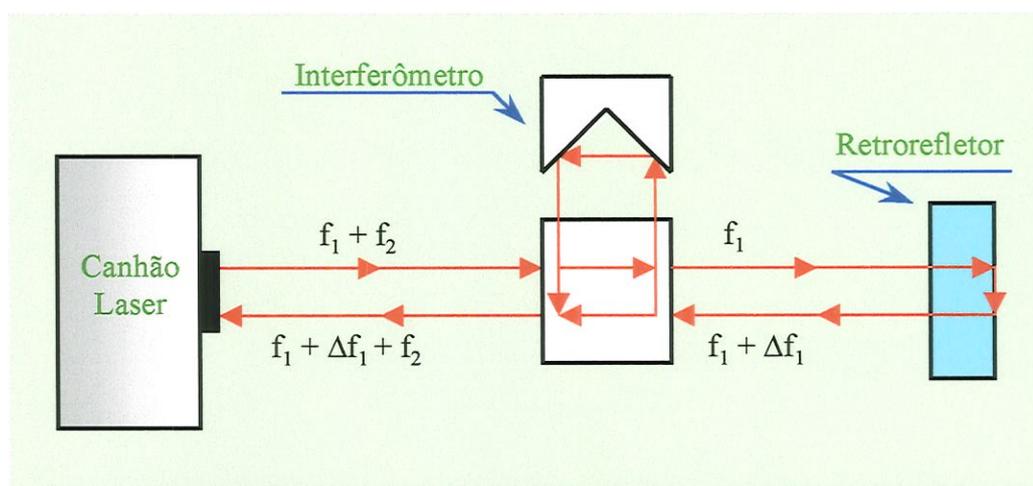


Figura 5.4: Princípio Interferométrico para medir o erro de posição.

O sistema interferométrico laser é composto por um conjunto óptico (escolhido de acordo com o tipo de erro avaliado), uma unidade laser e uma unidade de processamento eletrônico.

O canhão laser emite um feixe de luz composto pela combinação de dois feixes de frequências  $f_1$  e  $f_2$ , quando o feixe de luz atinge o interferômetro um dos feixes ( $f_1$ ) retorna ao canhão este é tido como feixe de referência, o outro ( $f_2$ ) continua seu caminho sem interrupção até atingir o refletor, quando inicia sua volta até o canhão. O feixe  $f_2$  e  $f_1$  são recombinados e captados por fotosensores. Como os dois feixes percorrem caminhos diferentes, ocorre uma variação de fase entre os feixes de referência ( $f_1$ ) e o de medição ( $f_2$ ).

Com base no comprimento de onda do laser emitido calcula-se a variação de distância.

O erro é então calculado pela equação (5.19)

$$\text{Erro} = [\text{Valor da Máquina}] - [\text{Valor do Laser}] \quad (5.19)$$

Na calibração do erro de Posição do eixo “X” foi utilizado o conjunto de espelhos do sistema interferométrico montado conforme a Figura 5.5.



Figura 5.5: Calibração do erro de Posição do Eixo “X”.

Observa-se que o feixe laser é emitido perpendicularmente ao eixo de calibração, porém uma óptica extra entre refletor e interferômetro, suportado por uma Barra fixa ao desempenho, faz a correção do feixe. Vê-se que praticamente é minimizado o braço de Abbè, pois o eixo “Z” onde esta preso o refletor, esta próximo a escala do eixo “X”. O eixo “X” responsável pelos movimentos de translação foi calibrado entre as posições de 15mm e 340mm de sua escala, enquanto a ponte e o eixo “Z” permaneceram estáticos. É interessante

ressaltar a distância entre o primeiro e último ponto de medição de cada eixo calibrado, eles foram responsáveis pela formação do volume útil utilizado na calibração com Barra de Esferas.

As calibrações dos erros de posição dos eixos “Y” e “Z” apresentam montagens semelhantes; os eixos “X” e “Y” permaneceram estacionários durante a calibração do eixo “Z” (calibrado entre 5mm e 255mm de sua escala), não houve preocupação quanto a localização do interferômetro pois a influência do braço de Abbè na calibração desse eixo é muito pequena. Já a calibração do eixo “Y” (calibrado entre 25 mm e 400 mm) tomou-se o cuidado de se fazer uma montagem onde o interferômetro estivesse bem próximo da escala do eixo “Y”, minimizando a influência do braço de Abbè, isto se conseguiu fixando o eixo “X” bem próximo do zero de sua escala e o eixo “Z” estendido quase que na sua totalidade.

Na calibração de todos os eixos, o alinhamento do laser com o eixo de movimento foi conseguido através do ajuste sistemático da posição e da inclinação do canhão.

### **b- Calibração dos erros de Retilidade**

O interferômetro laser foi utilizado para calibrar os erros de retilidade. A montagem da ótica envolvida nessa medição difere da utilizada no erro de posição.

O princípio de medição do erro de retilidade está mostrado na Figura 5.6, tal princípio tem como suporte a presença de duas frequências do feixe emitido pela unidade laser. O feixe de frequências  $f_1$  e  $f_2$  é emitido pelo canhão, ao atingir o interferômetro “prisma de Wollaston” é então dividido e cada um percorre caminhos distintos, ambos em direção ao refletor de espelhos inclinados; os feixes  $f_1$  e  $f_2$  incidem ortogonalmente nos espelhos do refletor retornando ao interferômetro e recombinando-se novamente.

Abaixo a montagem experimental para calibração do erro de retilidade.

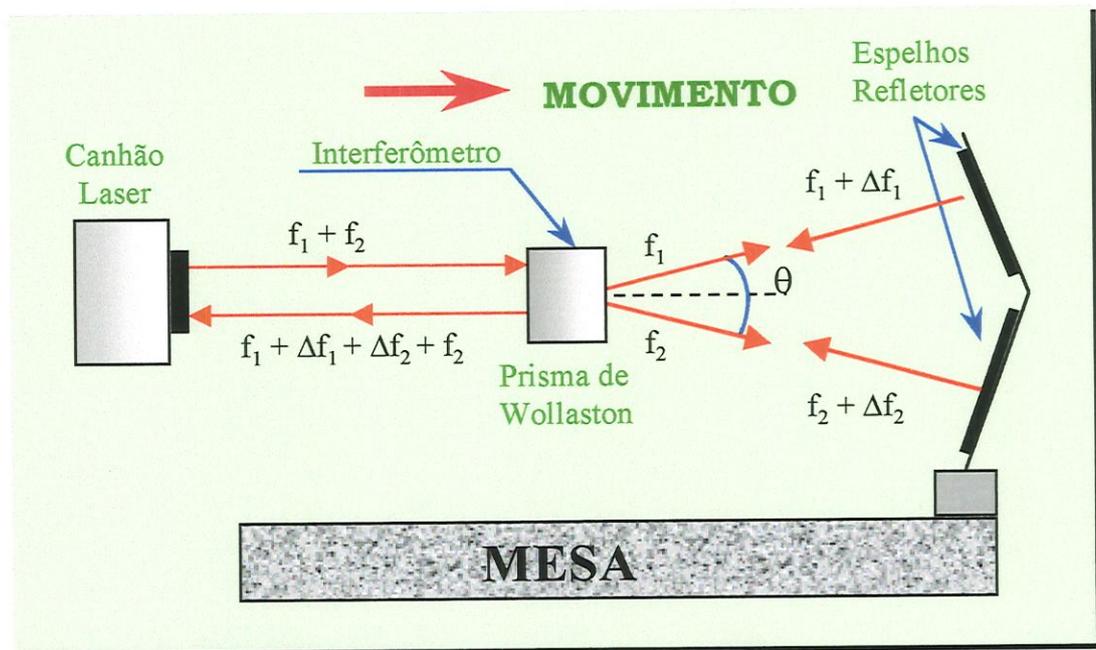


Figura 5.6: Princípio interferométrico da medição do erro de retilidade.

As variações  $\Delta f_1$  e  $\Delta f_2$  no padrão de interferência dos feixes indicam mudanças proporcionais ao movimento lateral relativo entre o prisma de Wollaston, e os espelhos.

A Hewlett-Packard 1988, destaca alguns requisitos que devem ser cumpridos na medição do erro de retilidade, entre eles estão:

- distância entre o interferômetro e o refletor deve ser no mínimo de 100mm
- alinhamento do sistema interferométrico deve ser melhor do que 50% da potência do feixe.

Ressalta-se aqui que os valores indicados pelo interferômetro não são os valores do erro de retilidade propriamente dito, neles estão incluídos deslocamentos devido ao desalinhamento entre o feixe de luz e a direção de movimento.

Este efeito deve ser corrigido antes da interpretação dos dados, para isso na obtenção do valor do erro são aplicadas técnicas matemáticas. Geralmente utiliza-se regressão linear por mínimos quadrados ou então o método dos pontos extremos. Assim:

$$Erro = V_i - V_d \quad (5.20)$$

Onde:

$V_i$  é o valor indicado no laser

$V_d$  é o valor encontrado através da equação de desalinhamento

A Figura 5.7 mostra a montagem experimental utilizada na medição do erro de retilidade do eixo "X" na direção de "Z". O canhão emite o feixe o qual é desviado por um refletor que direciona o feixe na mesma direção do eixo a ser calibrado (eixo "X"). Observa-se na Figura 5.7 que o interferômetro está preso ao eixo "Z" no lugar da sonda e o refletor montado num suporte fixo ao desempenho.



Figura 5.7: Calibração do erro de Retilidade do eixo "X" na direção de "Z".

Uma outra montagem pode ser vista na Figura 5.8, a óptica utilizada é outra. A montagem está feita para a calibração do erro de

retilidade do eixo “Z” na direção “X”. O princípio de medição é sempre o mesmo para todos os erros de retilidade ressaltando o fato que o interferômetro deve estar sempre entre o canhão e o refletor, isto é, colocado no lugar da sonda movimentando-se na direção do eixo a ser calibrado.

Os erros de retilidade calibrados diferem na sua faixa de calibração. O eixo “X” foi calibrado entre 15mm e 290mm, “Y” entre 25 e 400mm e “Z” entre 5 e 105 mm. A faixa de calibração do erro de retilidade do eixo Z é pequena se comparada com a faixa de calibração do erro de posição para o mesmo eixo. Isso atribui-se ao fato de que a montagem óptica possui dimensões diferentes, dependendo do tipo de erro a ser a calibrado, limitando assim o espaço percorrido pelo eixo.

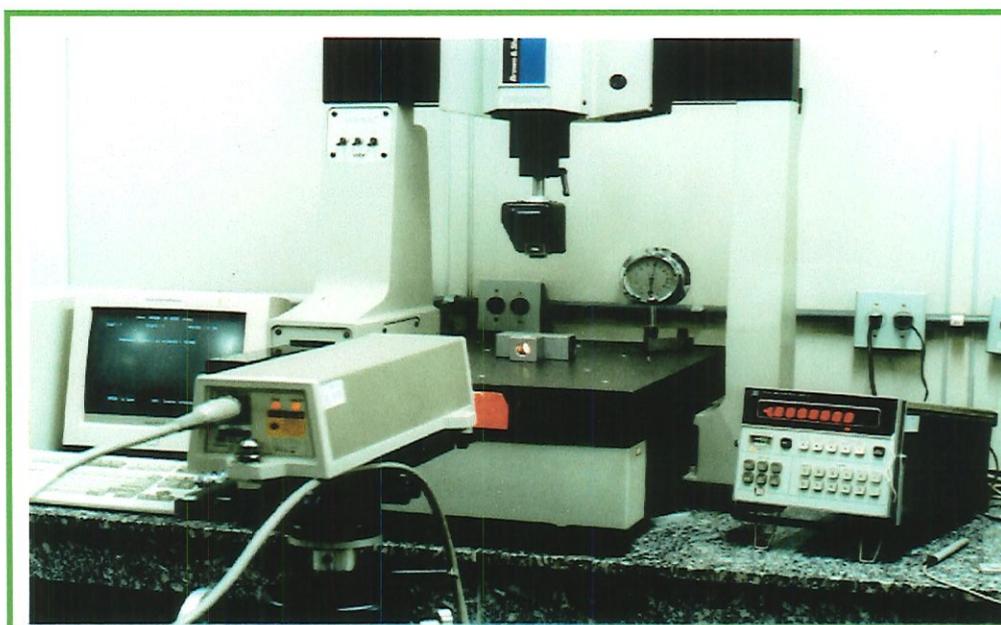


Figura 5.8: Calibração do erro de retilidade do eixo “Z” na direção de “X”

### c- Calibração dos erros angulares

#### ➤ Erros angulares “Pitch” e “Yaw”

Estes erros foram calibrados utilizando o interferômetro laser e o princípio de medição esta ilustrado na Figura 5.9. Nas montagens são utilizados um interferômetro angular que é fixo no desempenho da máquina e o conjunto de espelhos refletores é acoplado ao elemento móvel responsável pelo movimento de cada eixo durante a calibração.

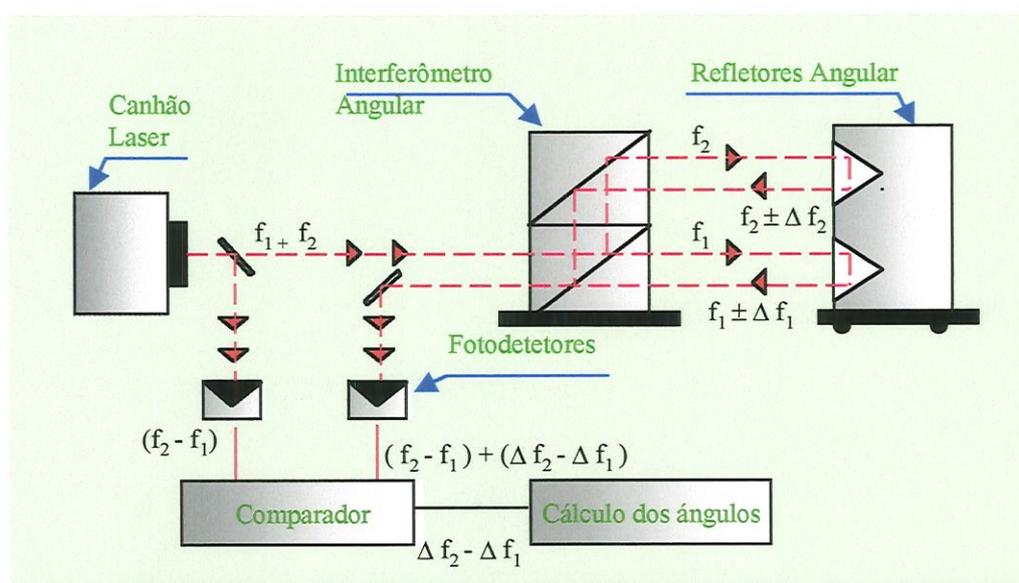


Figura 5.9: Princípio Interferométrico para medir os erros “Pitch” e “Yaw”.

A princípio, o feixe laser é dividido em dois feixes paralelos de frequências  $f_1$  e  $f_2$  ao atravessar o interferômetro angular e deslocar-se até o refletor angular. O refletor angular é formado por dois pares de espelhos refletores devidamente espaçados, que refletem de volta ao interferômetro os feixes  $f_1$  e  $f_2$ , também em trajetórias paralelas. Devido ao movimento relativo entre o interferômetro angular e os espelhos, variações de frequências  $\Delta f_1$  e  $\Delta f_2$  são observadas indicando a diferença entre os caminhos percorridos, estas

informações são processadas e convertidas em deslocamento angular, onde dependendo da orientação dos espelhos podem ser deslocamentos de “Pitch” ou “Yaw”.



Figura 5.10: Calibração do erro “Pitch” do eixo “X”.

O arranjo experimental para a calibração dos erros angulares do eixo “X”, chamado “Pitch” (rotações em torno do eixo “Y”), está mostrado na Figura 5.10 acima. Observa-se que o espelho refletor permanece solidário ao interferômetro angular e fixo ao desempenho através de um suporte, enquanto o retrorefletor angular está preso ao eixo “Z”. Durante a calibração os eixos “Y” e “Z” permaneceram fixos enquanto o eixo “X” se movimentava.

Alguns arranjos experimentais são bem semelhantes tais como; as montagens entre as calibrações dos erros “Pitch” do eixo “Y” e “Yaw” do eixo “Y”, “Pitch” do eixo “Z” e “Yaw” do eixo “Z”. Em todas as calibrações dos erros angulares “Pitch” e “Yaw” as faixas de calibração correspondem as mesmas adotadas para as calibrações dos erros de retilidade.

Abaixo na Figura 5.11 esta mostrado a montagem de um sistema de medição do erro de “Yaw”, rotações em torno do eixo “Z”.



Figura 5.11: Calibração do erro de “Yaw” do eixo “X”.

➤ Erro angular “Roll”

Para a medição do erro angular “Roll” foi utilizado o nível eletrônico e nível de bolha.

O nível eletrônico funciona segundo o princípio do pêndulo, composto por duas unidades: unidade de sensoriamento e unidade de tratamento de sinais .

Quando o nível eletrônico é inclinado o pêndulo em conjunto com o sistema eletrônico detecta um sinal proporcional a inclinação experimentada. Este sinal é tratado e apresentado no mostrador.

Alguns cuidados devem ser tomados no manuseio do nível eletrônico; a unidade de sensoriamento deve ser colocada sobre a superfície a ser avaliada e esta superfície deve estar muito bem limpa, inclinações do nível no sentido horário fornecem sinais positivos.

O uso do nível de bolha é relativamente simples, basta colocá-lo sobre a superfície a ser medida e zerar o nível através de um parafuso de ajuste e do visor indicador.

Os dois níveis são utilizados durante a medição dos erros de “Roll”, isto deve-se ao fato que durante os movimentos do eixo a ser calibrado ocorre uma distorção na estrutura da máquina e portanto o valor do erro é dado pela diferença entre os valores dos dois níveis. O arranjo experimental para medição do erro “Roll” do eixo “Y” pode ser visto na Figura 5.12.

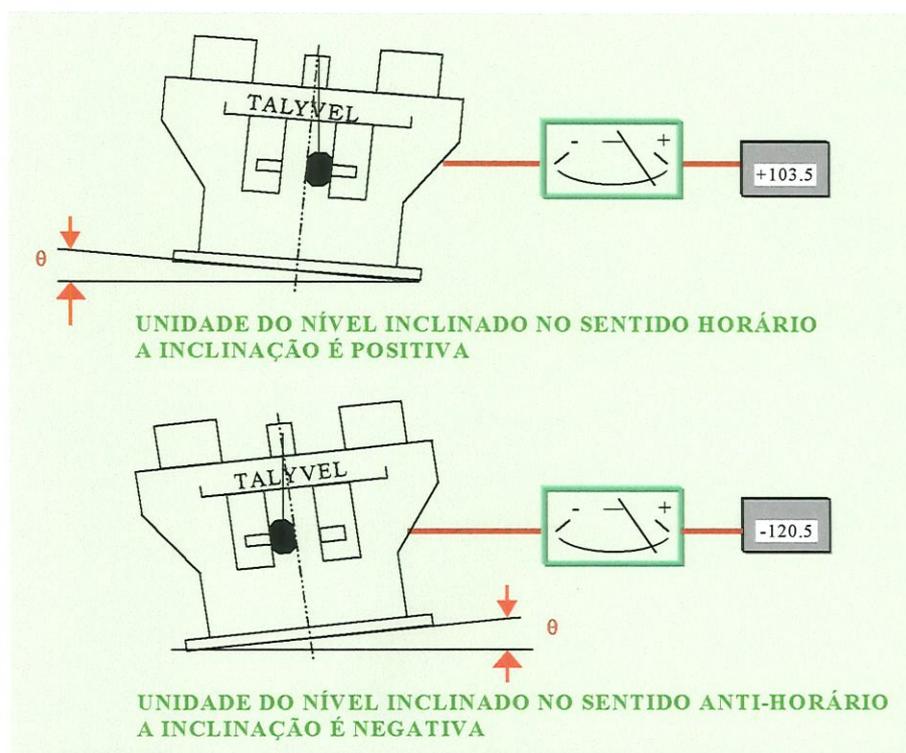


Figura 5.12: Princípio de funcionamento do Nível eletrônico.

Antes do início da calibração o nível de bolha é colocado sobre o desempenho e “zerado”, e o nível eletrônico fixado através de um suporte no eixo “Z”. Durante a calibração, os eixos “Z” e “X” permanecem estacionários enquanto o eixo “Y” se movimenta.

A montagem experimental para calibração do erro “Roll” de “X” é semelhante a calibração anterior porém os níveis são colocados paralelos ao eixo Y, e os eixos “Z” e “Y” permanecem estacionários enquanto o eixo “X” se movimenta.

A faixa de calibração dos erros “Roll” corresponde a mesma faixa de calibração dos erros de “Pitch” e “Yaw”.



Figura 5.13: Calibração do erro de “Roll” do eixo “Y”.

### **c- Calibração dos Erros de Ortogonalidade**

Os erros de ortogonalidade são erros gerados devido a impossibilidade de montagem perfeitamente ortogonal dos três eixos da MM3C, são também, responsáveis por uma grande contribuição da falta de acuracidade dessas máquinas. Esses erros são sistemáticos e podem ser tratados devidamente para posterior compensação.

A opção por se utilizar o esquadro de granito para calibração dos erros de ortogonalidade da MM3C deve-se ao fato de que o conjunto ótico do interferômetro para medição desse erro, apresentar incompatibilidades dimensionais com o volume de trabalho da máquina.

O esquadro mecânico pode apresentar erros eventualmente significativos na medição de ortogonalidade, esse problema pode ser atacado e resolvido utilizando-se a técnica de reversão a qual determina a parcela do erro do esquadro que esta interferindo na

medição do erro de ortogonalidade entre os eixos da máquina. O procedimento correto para a determinação dos erros de ortogonalidade quando se usa esquadros mecânicos esta ilustrado na figura 5.14..

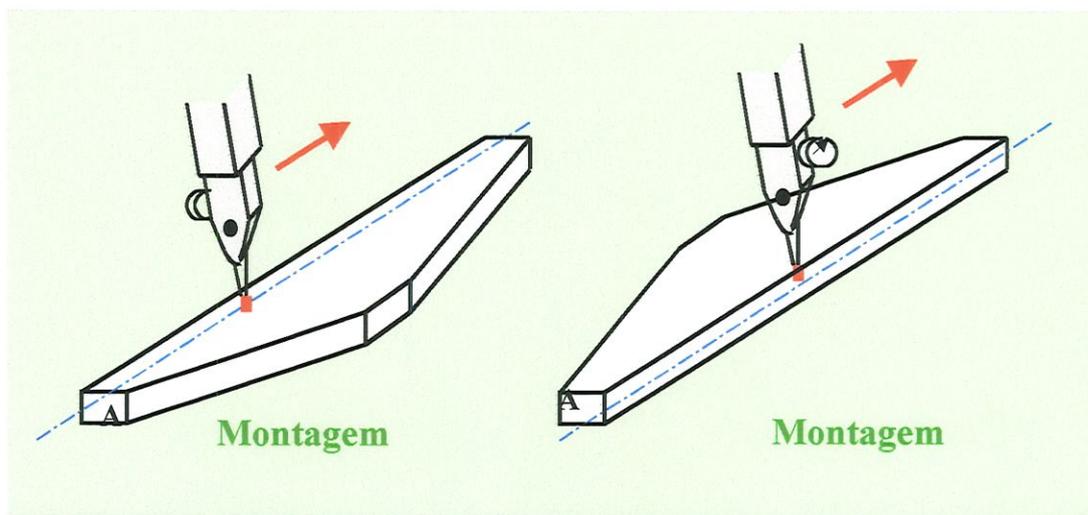


Figura 5.14: Técnica da Reversão.

A técnica consiste em se medir uma das faces do esquadro mecânico obtendo-se um ângulo  $\theta_1$ , em seguida reverte-se o esquadro em  $180^\circ$  sobre o eixo de movimentação, obtêm-se o ângulo  $\theta_2$ , utilizando o mesmo processo de leitura. Após a obtenção dos valores, o erro de ortogonalidade pode ser obtido por meios estatísticos e matemáticos.

O método da reversão será utilizado para a medição dos erros de ortogonalidade da MM3C em questão. Para isso será utilizado o esquadro mecânico em conjunto com um comparador eletrônico LVDT e um display de saída da marca Tesatrônic.

A Figura 5.15 mostra a medição do erro de ortogonalidade entre os eixos "X" e "Z", a princípio uma das faces do esquadro mecânico é colocado sobre o desempenho, um apalpador linear fixo ao eixo "Z" é zerado em um dos extremos da outra face. O apalpador linear então, percorre um comprimento determinado sobre a face do esquadro. Como a distância percorrida no esquadro é conhecida é possível

determinar o ângulo formado entre o eixo “Z” e o esquadro mecânico. O próximo passo consiste em girar o esquadro mecânico e o apalpador linear em 180º da posição anterior, isto sem movimentar qualquer um dos eixos.

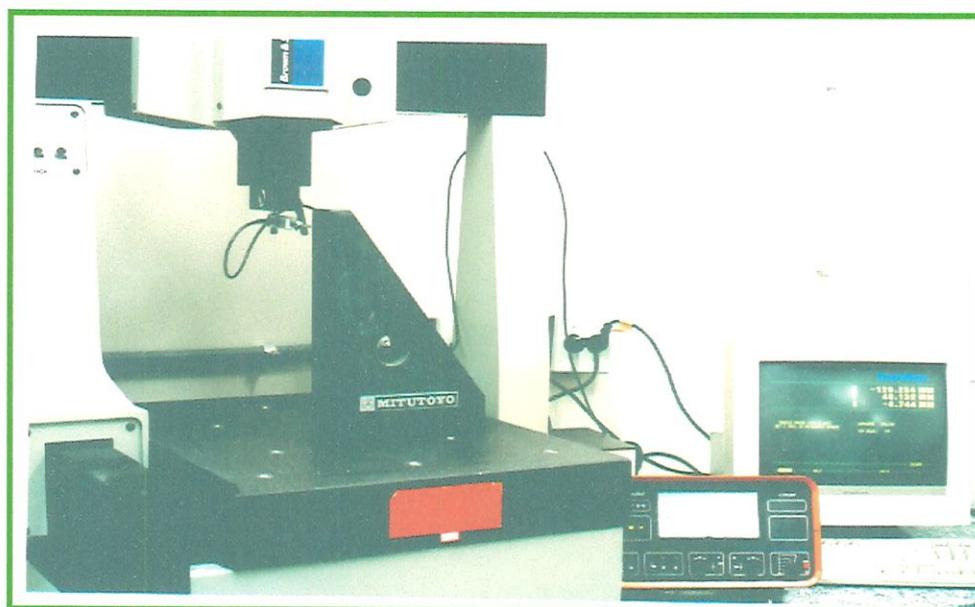


Figura 5.15: Calibração do erro de ortogonalidade entre “X” e “Z”.

A mesma descrição da medição anterior é executada novamente determinando-se um novo desvio angular entre os eixos “Z” e “X”, com um tratamento matemático obtêm-se o erro de ortogonalidade sem a parcela do erro do esquadro mecânico.

O procedimento é repetido para a determinação dos erros de ortogonalidade entre os eixos “X” e “Z” e entre os eixos “X” e “Y”.

### **5.3- CALIBRAÇÃO INDIRETA DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS**

A Calibração Indireta da MM3C, baseia-se na utilização de artefatos padrões pré-qualificados e normalizados, para avaliação do erro total das MM3Cs.

Existem diversas normas técnicas internacionais que utilizam diferentes padrões corporificados para determinar os erros das MM3Cs.

O artefato adotado para a calibração da MM3C em estudo, consistiu de uma Barra de Esferas e a norma técnica que trata da avaliação do desempenho das MM3Cs usando esse padrão. A norma americana *ANSI/ASME B89.4.11* foi utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

A filosofia da Norma *ANSI/ASME B89.4.1* é quantificar diferentes categorias de erros das MM3Cs, que são divididas em sete grandes áreas: repetibilidade, acuracidade do deslocamento linear, teste com Barra de Esferas, teste volumétrico com sondas múltiplas, teste com MM3Cs com mesa rotativa, medição de comprimento bidirecional e desempenho de sondagem ponto-a-ponto. Dentre os vários testes propostos pela norma, foram realizados o teste com Barra de Esferas pré-calibrada na análise da acuracidade da MM3C e um teste de repetibilidade, que verifica os efeitos intrínsecos da máquina, do operador e dos algoritmos computacionais, estes dois testes foram rigorosamente seguidos.

### **5.3.1- Descrição da Calibração da Barra de Esferas**

A norma americana especifica que as Máquinas de Medir a Três Coordenadas com volume de trabalho aproximadamente cúbico, devem ser calibradas com Barra de Esferas que possuam a distância entre o centro das Esferas não maior que 900 mm e que seja 100 mm menor do que o menor eixo da máquina, aproximadamente.

Uma Barra de Esferas com essas características, foi calibrada utilizando uma máquina universal de medir, fabricada pela Societe Genevoise D'Instruments de Physique (SIP), tipo 302M, cuja resolução é de 0.0001mm.

A dimensão a ser considerada é a distância entre os centros das Esferas “distância padrão” para a calibração, assim se faz necessário medir os diâmetros das duas Esferas e do comprimento total do conjunto.

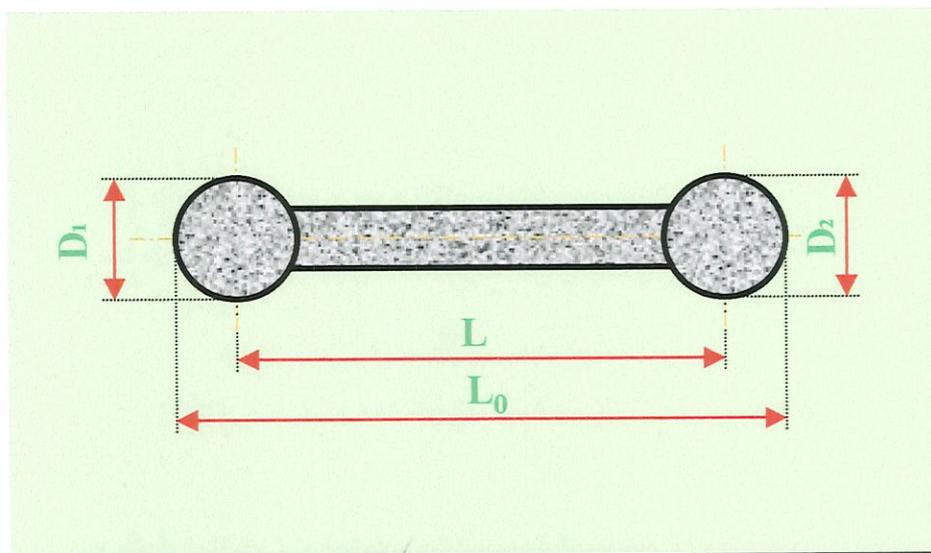


Figura 5.16: Dimensões da Barra de Esferas.

A Figura 5.16 mostra esquematicamente as dimensões medidas e as dimensões calculadas para o padrão Barra de Esferas. Na figura o valor calculado está representado pela letra  $L$  enquanto os valores medidos do diâmetro das duas Esferas e do comprimento entre as extremidades das Esferas na Barra, estão representados pelas letras  $D_1$ ,  $D_2$  e  $L_0$ , respectivamente.

A Figura 5.17 mostra o posicionamento da Barra de Esferas na S.I.P para a medição do comprimento total do conjunto, a Barra foi colocada sobre um bloco em “v” e alinhada com o eixo de medição da máquina.

Na Figura 5.18 observa-se a medição do diâmetro de uma das Esferas, o conjunto foi fixado através de um suporte, preso por um parafuso de pressão e uma base magnética fixou o sistema na estrutura da máquina durante a medição.



Figura 5.17: Medição do comprimento total da Barra de Esferas

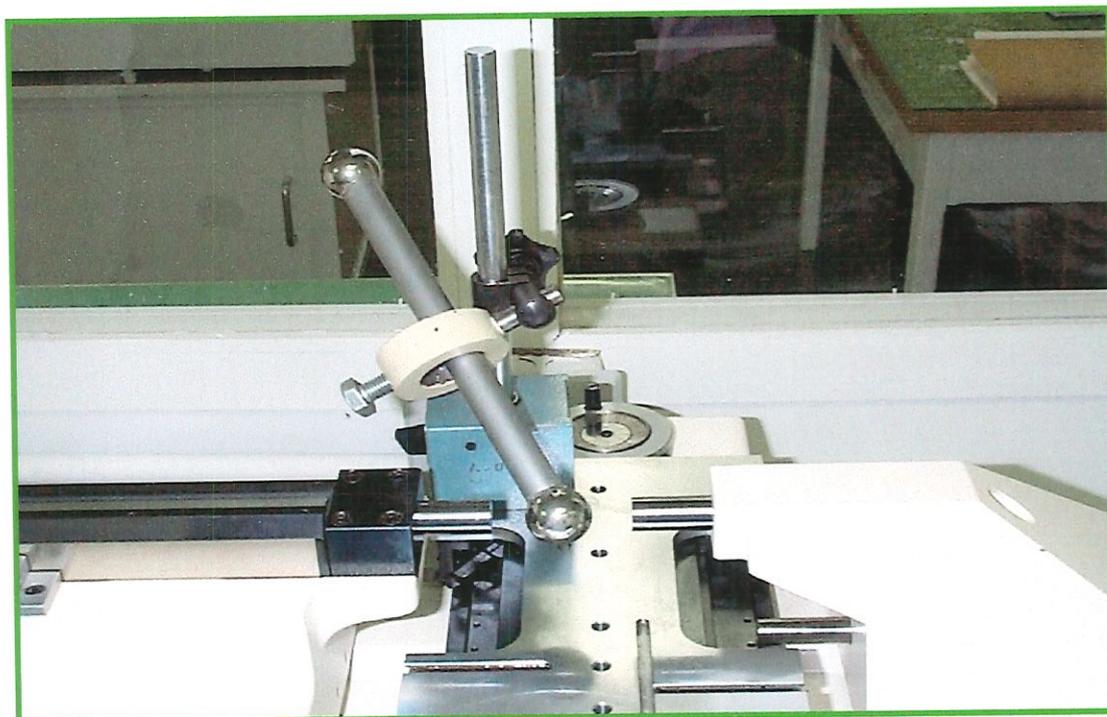


Figura 5.18: Medição de uma das Esferas na "SIP".

O diâmetro de cada esfera foi medido dez vezes cada, e a distância entre as extremidades das Esferas também foi medida dez vezes. Os valores das médias e dos desvios padrões foram calculados e usados para determinação da distância entre centros das Esferas tida como padrão.

### 5.3.2- Descrição da Calibração da MM3C com a Barra de Esferas

Após a calibração da Barra de Esferas na SIP passou-se ao processo de calibração da MM3C com o padrão já especificado. Antes da execução da calibração a MM3C foi devidamente limpa, no manuseio com a Barra utilizou-se luvas isolantes e os níveis de operação da máquina foram conferidos.

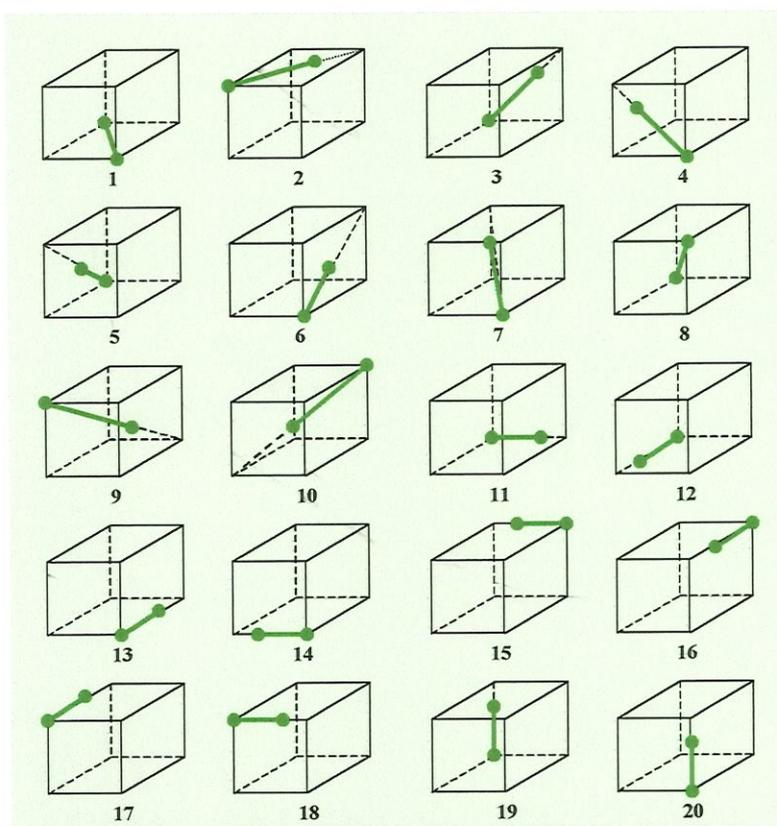


Figura 5.19: Posições de calibração segundo a norma B89

Seguindo o procedimento recomendado pela norma *ANSI/ASME B89.12M* a Barra de Esferas foi levada a 18 posições ao longo dos três eixos ortogonais e em diferentes orientações no volume de trabalho da MM3C.

Estas 20 posições são recomendadas pela norma para máquinas com volume de trabalho aproximadamente cúbico.

A Barra de Esferas porém, não foi medida nas posições 19 e 20 recomendadas pela norma, isto porque foi utilizada uma sonda com uma única haste disposta na mesma direção do eixo "Z" não permitindo acessibilidade à medição

Um suporte permitiu a ajustagem da Barra de Esferas em diferentes orientações no volume de trabalho da máquina (Figura 5.20) de modo a deixar ambas as Esferas livres para a medição. Este suporte possui uma base magnética a qual é fixada sobre uma placa de aço colocada sobre o desempenho, permitindo a fixação do conjunto Barra-Suporte em todos as posições necessárias para se alcançar o objetivo desejado.

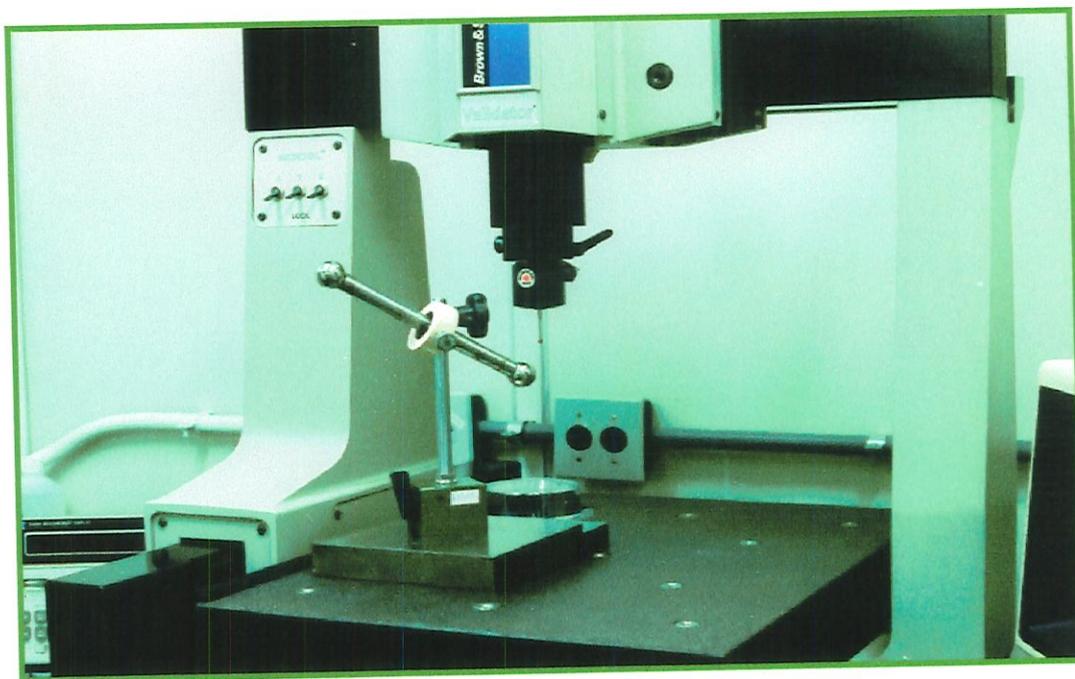


Figura 5.20: Calibração da MM3C com a Barra de Esferas.

Em algumas posições (posições 1,11,12,13,14) a Barra de Esferas foi colocada sobre um bloco em “v” e fixada por parafusos conforme mostra a Figura 5.21.

Em cada posição de calibração no volume da MM3C, a Barra de Esferas foi medida cinco vezes, sendo que sobre cada esfera foram tomados 4 pontos diferentes equi-espçados, desse modo determinou-se cinco distâncias entre centros de Esferas para cada posição no volume da máquina.

Durante a medição, a coordenada dos pontos que a máquina determinava sobre a superfície das esferas, foram arquivados em coordenadas “X”, “Y” e “Z” em um microcomputador, através de uma interface entre a MM3C e o micro. Todo esse processo se repetiu para todas as medições da Barra de Esferas na MM3C.

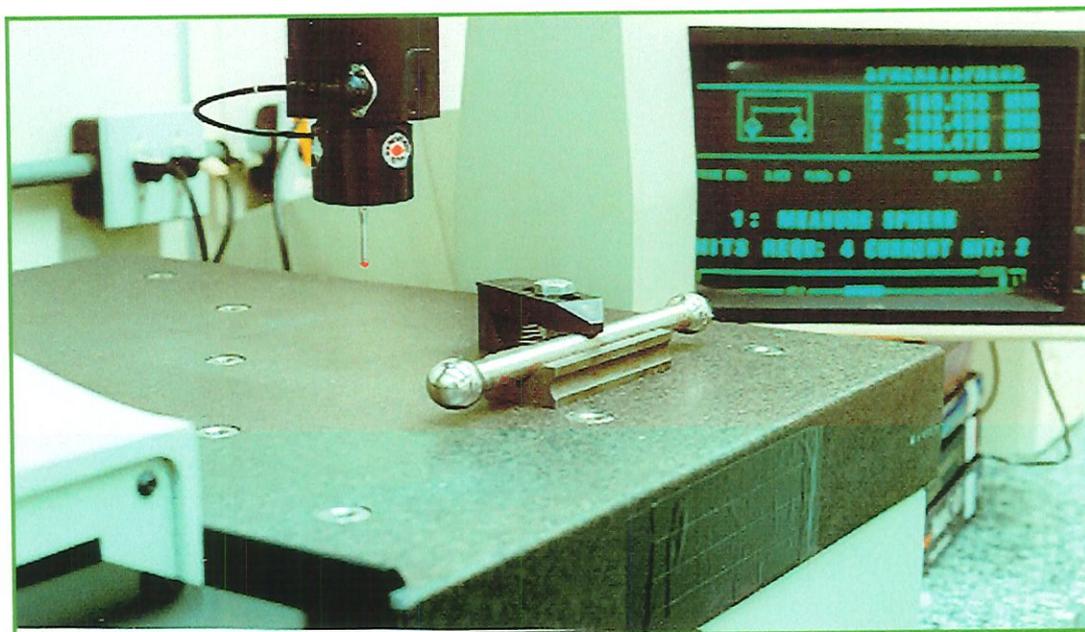


Figura 5.21: Barra de Esferas na posição “14” para calibração da MM3C.

Com as coordenadas dos pontos arquivados, e considerando que quatro pontos determinam uma única esfera, utilizou-se um programa computacional para calcular as coordenadas do centro das

Esferas e as distâncias entre centros das Esferas. Através da expressão (5.21) calculou-se a média dos erros em todas as posições da máquina sob a qual a Barra de Esferas foi medida.

$$\text{Erro}_{\text{indireto}} = [\text{Distância entre centro de Esferas calculada pela MM3C} - \text{Padrão}] \quad (5.21)$$

Este método é o mais econômico, mais rápido e por isso o mais utilizado para se avaliar o desempenho das MM3C.

#### 5.4 -Aplicação do Método de Sintetização de erros

De posse das equações de sintetização e das curvas de calibração dos erros geométricos intrínsecos às equações, passou-se ao processo de cálculo do erro volumétrico nos pontos que definem o centro de cada esfera durante os ensaios com a Barra de Esferas.

O erro volumétrico de um ponto no volume de trabalho da MM3C é definido como:

$$E_v = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (5.22)$$

onde  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$  são as componentes do erro volumétrico em cada uma das direções preferenciais dos eixos da máquina em estudo

O erro volumétrico calculado nos pontos dos centros das Esferas seguiram alguns passo descritos a seguir:

- As curvas de calibração dos erros sofreram um tratamento matemático, visando a obtenção de uma reta entre os pontos de medição. Possibilitando assim a obtenção do valor do erro em pontos não levantados durante a calibração.
- O erro individual nas coordenadas dos pontos do centro de cada esfera foi então calculado e substituídos nas equações de sintetização já definidas, calculando-se o erro volumétrico nos centros das Esferas.

Como o erro volumétrico é um vetor, houve a necessidade de projetá-lo na direção da Barra de Esferas conhecendo a contribuição do erro volumétrico nessa direção, observe a Figura 5.22.

O erro da Barra de Esferas pelo método sintetizado foi então calculado através da equação (5.23), que mostra a contribuição dos erros volumétricos na direção da Barra nos dois centros das Esferas.

$$\text{Erro}_{\text{sinte}} = [(Eb_2) - (Eb_1)] \quad (5.23)$$

A descrição do procedimento de tratamento vetorial do vetor erro volumétrico esta em Anexo.

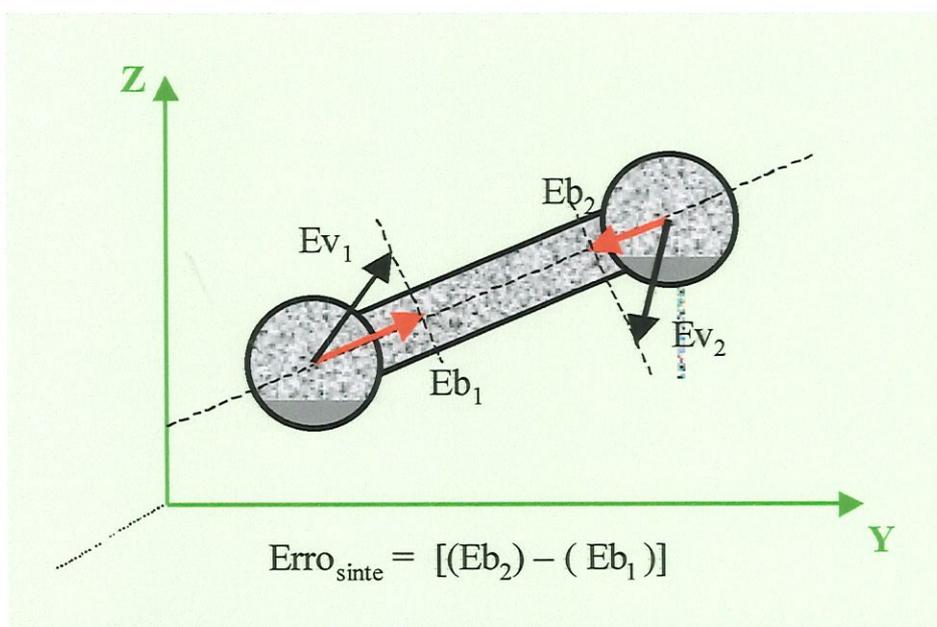


Figura 5.22: Projeção dos vetores erro volumétrico na direção da Barra de Esferas.

Em cada posição e orientação da Barra de Esferas foi feita a calibração Indireta e a calibração pelo método sintetizado. Os resultados de cada calibração e da comparação entre os métodos estão demonstrados no próximo capítulo.

## **CAPÍTULO 6**

### **TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Após apresentados os aspectos teóricos passa-se agora a expor os resultados encontrados, analisá-los e discuti-los.

Primeiramente, estão apresentados os resultados da calibração dos 20 erros geométricos da MM3C: erros de posição, erros de retilidade, erros angulares e erros de ortogonalidade.

Os resultados da calibração da Barra de Esferas feita na S.I.P estão descritos juntamente com o procedimento de cálculo da propagação de incertezas de medição da Barra. Após, descreve-se os resultados encontrados na calibração da MM3C com a Barra de Esferas, regidos pela norma *ANSI/ASME B89 4.1., 1995* e os resultados encontrados com o auxílio do método da sintetização de erros. Estes resultados foram comparados e estão em evidência em gráficos e tabelas no final do capítulo.

## **6.1- RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS DA MM3C DO TIPO PONTE MÓVEL**

Os resultados obtidos na calibração paramétrica da MM3C estão expostos em gráficos e tabelas. Nos gráficos estão representadas as curvas de erros médios no sentido de “ida” e no sentido de “volta” para uma dada direção de movimento e as curvas dos erros aleatórios no sentido de “ida”. As posições de medição estão dadas em milímetros e os erros em micrometros.

Ressalta-se que na calibração dos erros foram tomados 10 ciclos de medição sendo 5 no sentido de “ida” e 5 no sentido de “volta”, em todas as calibrações a distância entre pontos de medição foi de aproximadamente de 25mm.

Antes da calibração convencionou-se os sentidos positivos e negativos dos eixos coordenados da MM3C. Olhando-a de frente (vide Figura 6.1) assumiu-se que: o sentido positivo do eixo “Y” representa o movimento da Ponte da frente da máquina para a parte de trás. No eixo “X” o sentido positivo do eixo convencionou-se com o carro movimentando-se da esquerda para a direita enquanto que para o eixo “Z” o sentido positivo de movimento foi representado com a sonda movimentando-se de baixo para cima.

### **6.1.1 – Resultados da Calibração dos Erros de Posição**

Nas calibrações dos erros de posição (erro de posição do eixo “X”, erro de posição do eixo “Y” e erro de posição do eixo “Z”) foi utilizado o conjunto de espelhos do sistema interferométrico laser mostrado na Figura 5.4.

O erro de posição foi obtido através da diferença entre os valores lidos na máquina e no laser.

$$\text{Erro de posição} = \text{Indicação da Máquina} - \text{Indicação do Laser} \quad (6.1)$$

Os resultados obtidos a partir da equação 6.1 foram plotados num gráfico. No eixo das ordenadas estão os erros e no eixo das abcissas as posições lidas pela máquina.

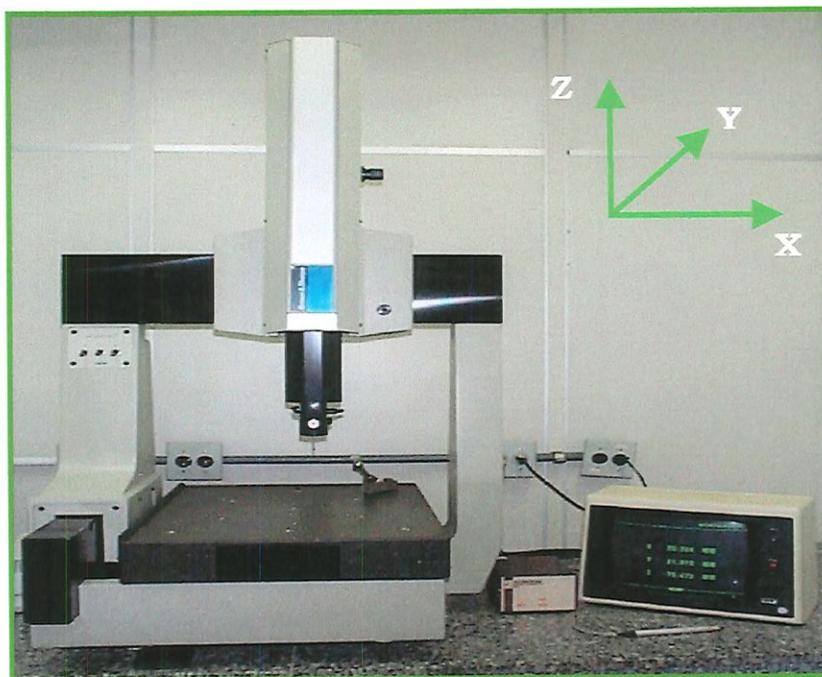


Figura 6.1: MM3C tipo "Ponte Móvel".

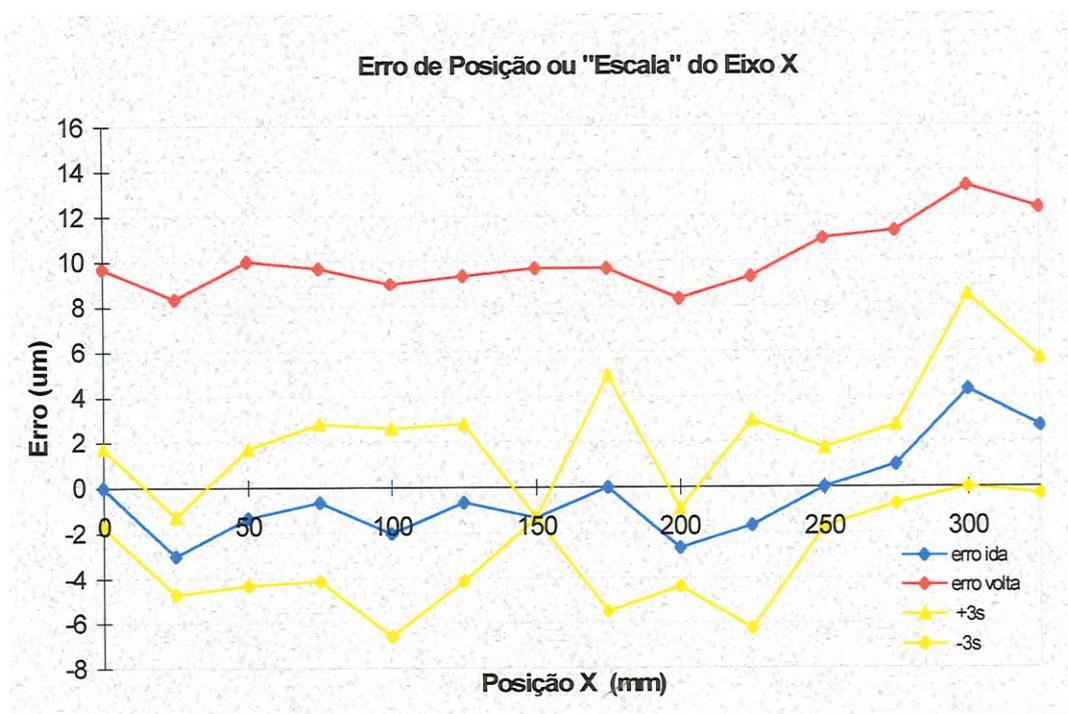


Figura 6.2: Erro de Posição do Eixo "X".

O gráfico da Figura 6.2, apresenta os resultados da calibração do erro de posição do eixo "X",  $\delta x(x)$ . Analisando-o observa-se que o erro aleatório  $\pm 3S$  chegou a um máximo de  $5.0\mu\text{m}$  para os erros no sentido de "Ida" do eixo calibrado, a parcela aleatória dos erros de "volta" tem um comportamento similar ao de "ida" por isso não foi incluída. O valor alto da aleatoriedade do erro pode comprometer uma eventual compensação dos valores. A histerese foi de aproximadamente  $10\mu\text{m}$ , valor este considerado relativamente alto, gerado por folgas nos mancais, podendo ser minimizadas com métodos de compensação de erros ou com ajustes mecânicos.

Na Figura 6.3 observa-se o comportamento do erro de posição na direção do eixo "Y",  $\delta y(y)$ . O erro sistemático apresenta uma tendência progressiva, o que possivelmente pode representar um desalinhamento entre o eixo de movimento definido pela guia "Y" e a escala de leitura. No início da escala os erros aleatórios são de  $\pm 5.0\mu\text{m}$  diminuindo gradativamente para  $4\mu\text{m}$  até a posição 100mm estabilizando nesse valor para as demais posições.

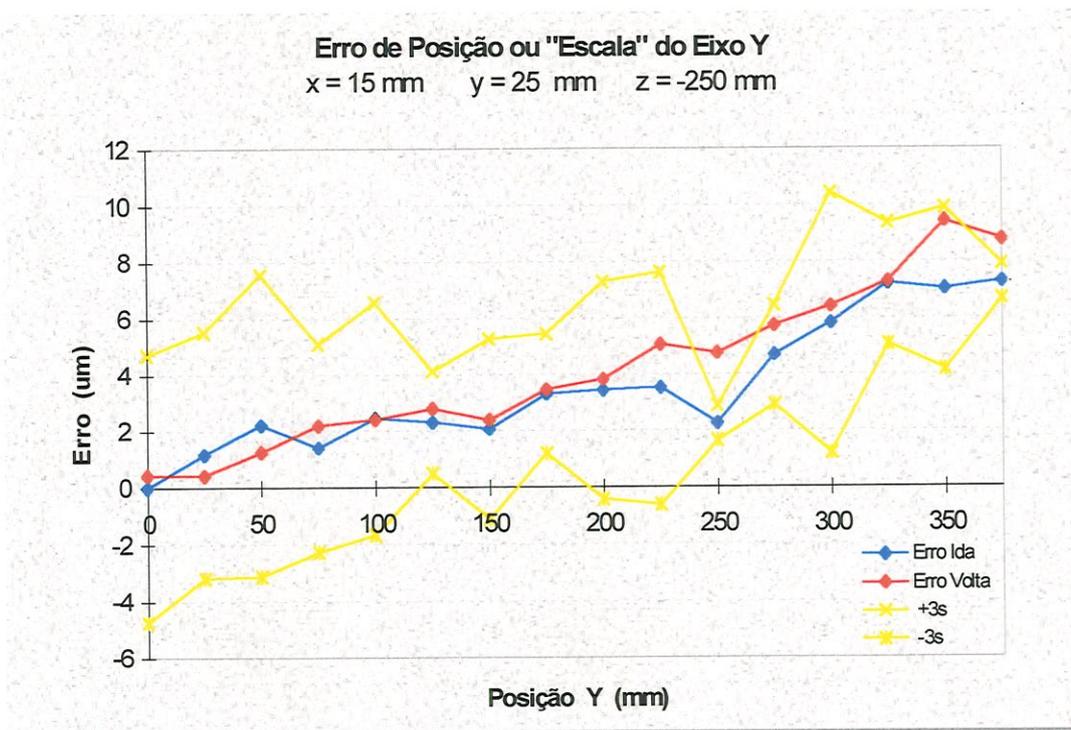


Figura 6.3: Erro de Posição do eixo "Y".

A histerese máxima atingiu um pico de  $3\mu\text{m}$  em um único ponto porém ocorrem cruzamentos dos erros sistemáticos de “ida” e de “volta” em diversos pontos do gráfico, este fato é derivado de grandes valores do erro aleatório.

O gráfico mostrando o erro de posição na direção do eixo “Z” pode ser visualizado na Figura 6.4. Observa-se nesse gráfico que há uma grande influência dos erros aleatórios no início da escala do eixo “Z” com valor inicial de  $\pm 9\mu\text{m}$ , isso possivelmente ocorreu devido a efeitos vibratórios (causados pelo ar comprimido que flui para os mancais) do eixo no início da medição (target 0). Esse valor cai para  $\pm 4\mu\text{m}$  no segundo ponto de calibração (25mm), atingindo um mínimo de  $\pm 1\mu\text{m}$  no último ponto. A histerese atingiu um máximo de  $3\mu\text{m}$  e os erros sistemáticos de “ida” e de “volta” se cruzam em alguns momentos por motivos já citados acima.

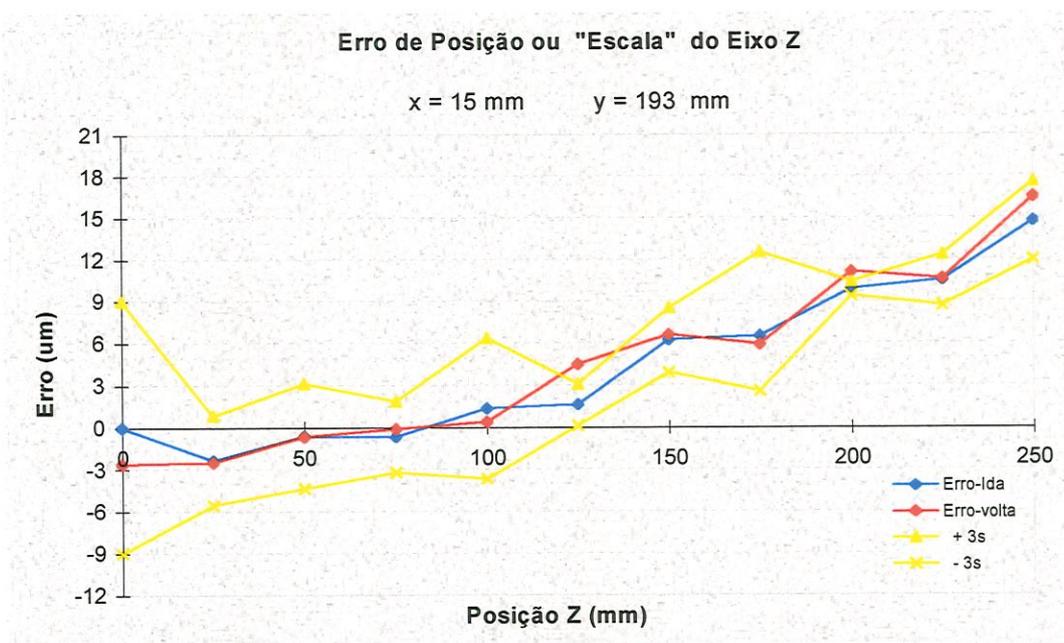


Figura 6.4: Erro de Posição do eixo “Z”.

### 6.1.2 Resultados da calibração dos erros de retlineidade

Após a calibração dos erros de retlineidade com o interferômetro laser, os dados obtidos durante a medição foram

submetidos a um tratamento matemático para retirar o desalinhamento entre o eixo de movimento e o feixe do laser.

O procedimento utilizado para determinar o desalinhamento foi o equacionamento da reta que passe pelo primeiro e último ponto do conjunto de dados, desta forma, o erro de retilidade é obtido através da diferença entre o valor indicado no laser e o valor encontrado através da reta de desalinhamento.

As Figuras 6.5 e 6.6 mostram respectivamente os gráficos dos erros de retilidade na direção dos eixos “Z” e “Y” devido ao movimento do eixo “X” designados por  $\delta x(z)$  e  $\delta x(y)$ .

O formato parabólico que pode ser visto na Figura 6.5 deve-se a deformação elástica sofrida pela guia do eixo “X”. Esta deformação é causada pelo próprio peso da guia e pelo peso do carro que translada sobre esse eixo. Observa-se que, nos primeiros 50 mm de calibração do eixo “X”, o erro aleatório possui uma grande amplitude, na ordem de  $\pm 2,5\mu\text{m}$  se comparado com os pontos de medição subsequentes de calibração.

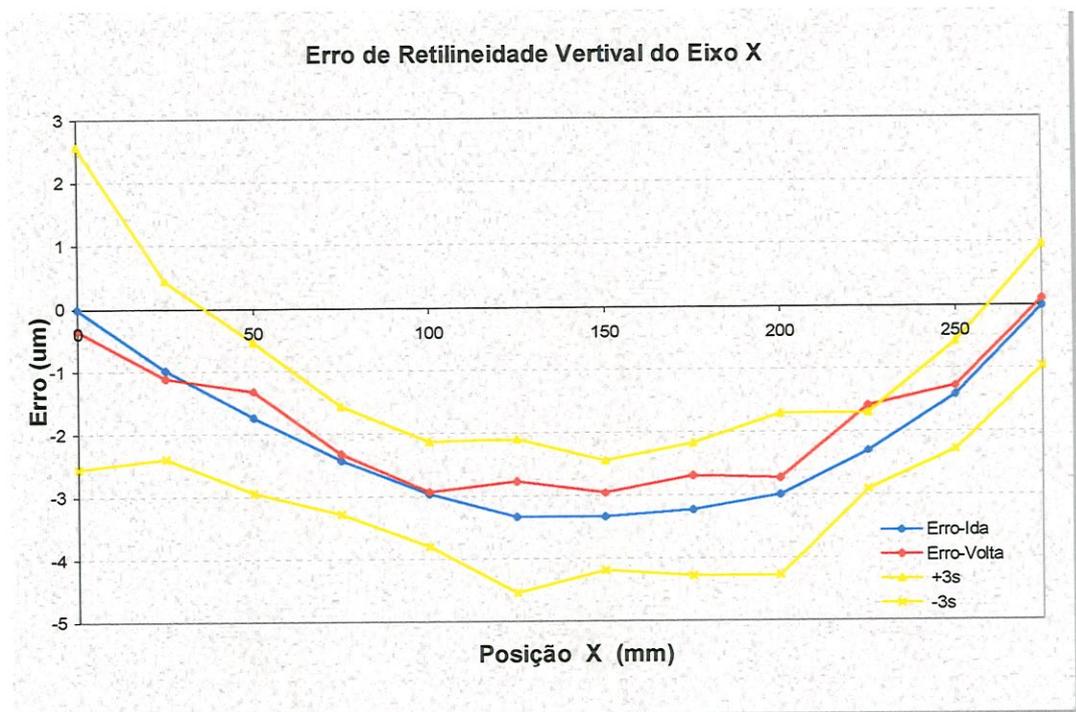


Figura 6.5: Erro de Retilidade Vertical do Eixo “X”.

A Figura 6.6 ilustra o erro de retilidade horizontal do eixo “X”. Os erros aleatórios ( $\pm 3S$ ) atingem uma amplitude máxima de  $\pm 6.0\mu\text{m}$ , com erros de histerese de  $\pm 1.0\mu\text{m}$ .

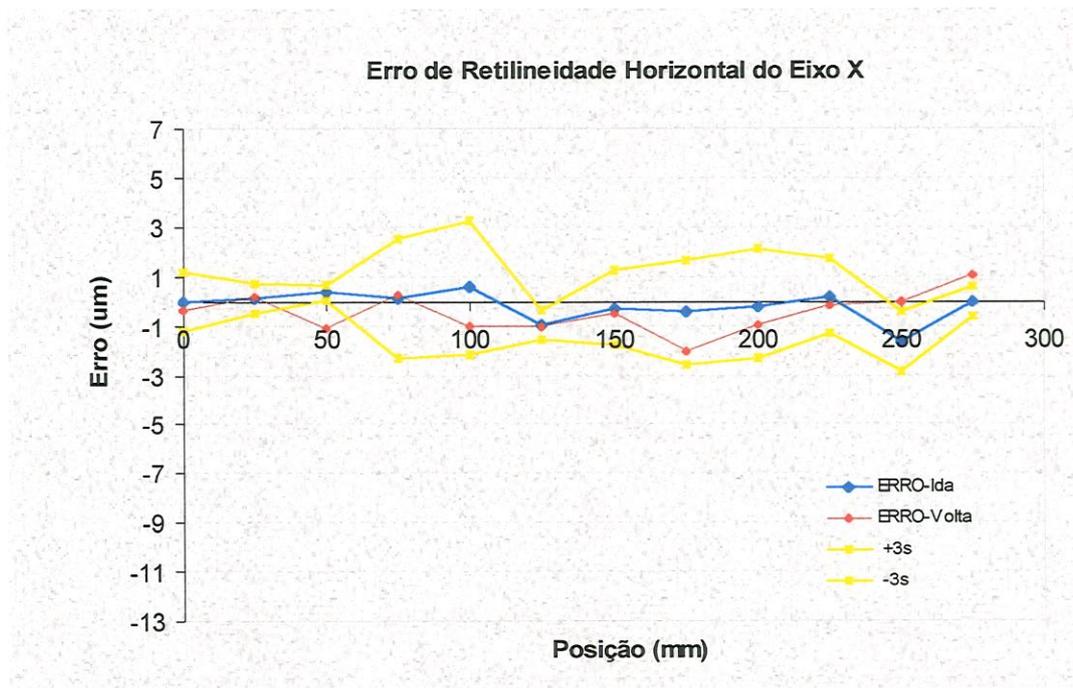


Figura 6.6: Erro de retilidade Horizontal do Eixo “X”.

Os resultados da calibração dos erros de retilidade do eixo “Y” nas direções “X” e “Z” podem ser visualizados nas Figuras 6.7 e 6.8, respectivamente

Ambas calibrações apresentam características semelhantes; os erros aleatórios são grandes ( $\pm 4\mu\text{m}$  e  $\pm 6\mu\text{m}$  respectivamente) se comparados com os erros sistemáticos que não ultrapassam  $2\mu\text{m}$ . O erro de histerese atinge  $1.3\mu\text{m}$  no máximo, havendo o cruzamento entre as curvas de erros no sentido de “ida” e “volta”.

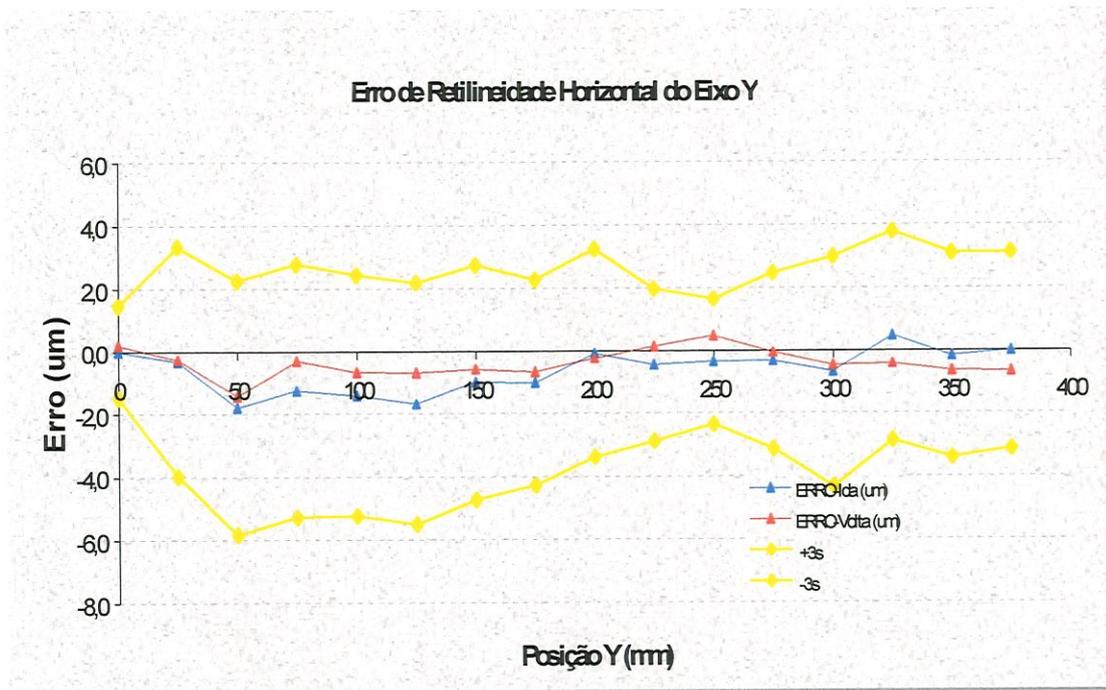


Figura 6.7: Erro de Retilidade Horizontal do eixo “Y”  
na direção de “X”.

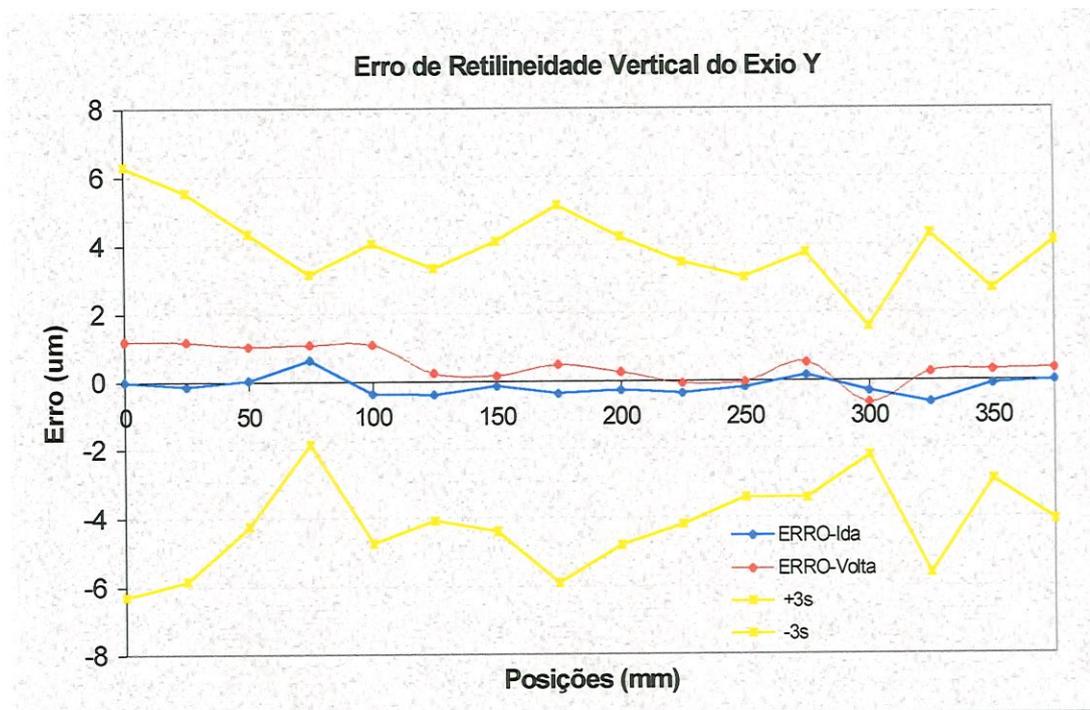


Figura 6.8: Erro de Retilidade Horizontal do Eixo “Y”  
na direção de “Z”.

Os resultados da calibração do erro de retilidade do eixo “Z” na direção “Y” estão colocados no gráfico da Figura 6.9. Pode-se observar no gráfico que os erros aleatórios, sistemáticos e de histerese são praticamente insignificantes tendendo a uma pequena contribuição no erro final obtido através do método da sintetização.

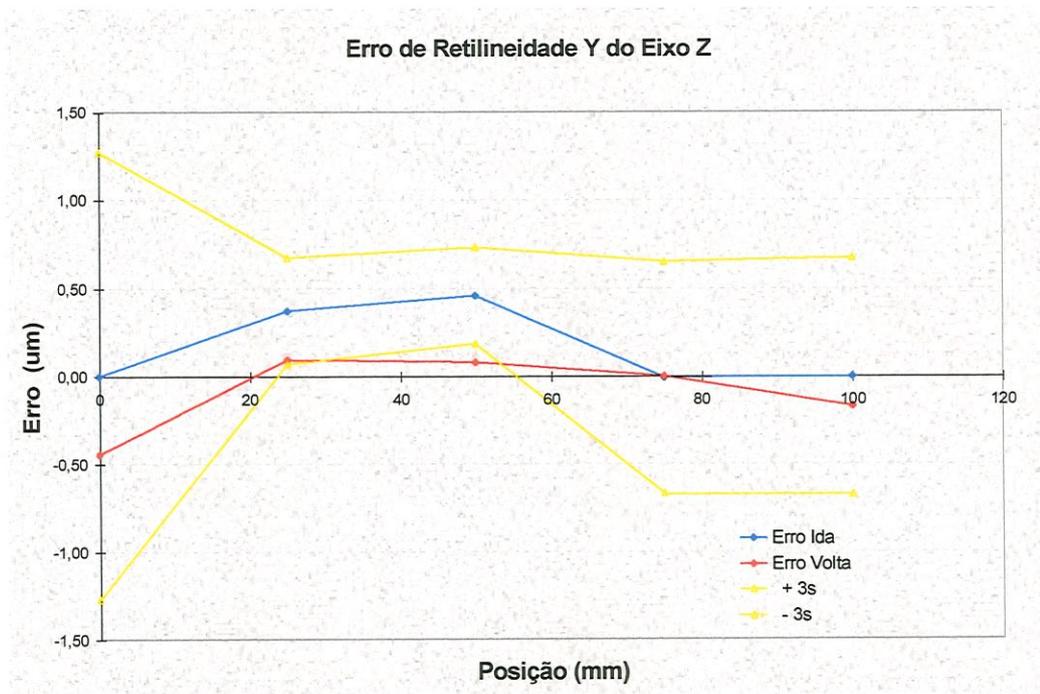


Figura 6.9: Erro de Retilidade do Eixo “Z” na direção de “Y”.

O formato senoidal dos erros aleatórios visto na Figura 6.9 pode indicar variação térmica do ambiente durante o ensaio.

A mesma avaliação pode ser feita para os erros de retilidade do eixo “Z” na direção de “X”, Figura 6.10. Porém a parcela aleatória é grande ( $\pm 1,5\mu\text{m}$ ) com relação a parcela sistemática indicando problemas de repetibilidade.

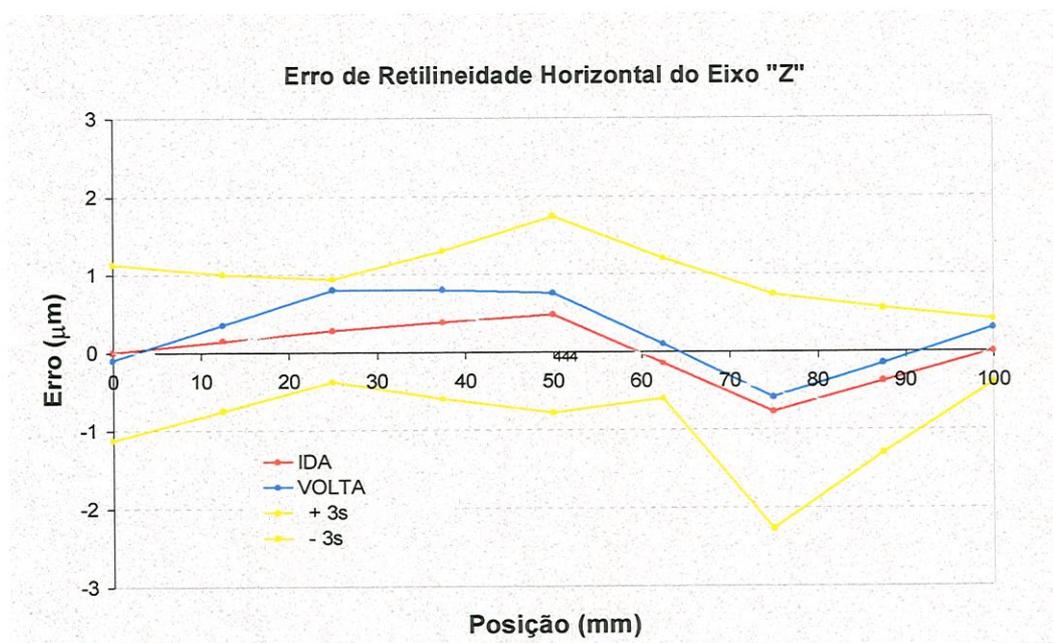


Figura 6.10: Erro de Retilidade Horizontal do eixo "Z".

### 6.1.3 – Resultados da Calibração dos Erros Angulares

"Pitch", "Yaw" e "Roll" foram os erros angulares determinados para cada eixo de movimentação. A calibração dos erros "Pitch" e "Yaw" foram realizadas utilizando o sistema interferométrico laser e na calibração do erro "Roll" utilizou-se o nível eletrônico e o nível de bolha.

#### ➤ "Pitch"

A Figura 6.11 representa o erro angular "Pitch" do eixo "X", que expressa os desvios angulares em torno do eixo "Y" quando o eixo "X" se movimenta. Analisando a figura observa-se uma progressão dos erros no sentido positivo do eixo, permitindo diagnosticar que as guias tem um erro de forma que se assemelha a um arco de circunferência. Esse fato é atribuído ao peso da guia, do carro "X" e dos mancais do eixo "Z" que durante a translação do carro provocam

uma catenária entre as duas colunas que suportam a viga do eixo “X”.

O erro sistemático total varia entre 0 e 11 arcseg, os erros aleatórios não ultrapassam  $\pm 2$  arcseg sendo que a histerese pode ser desconsiderada.

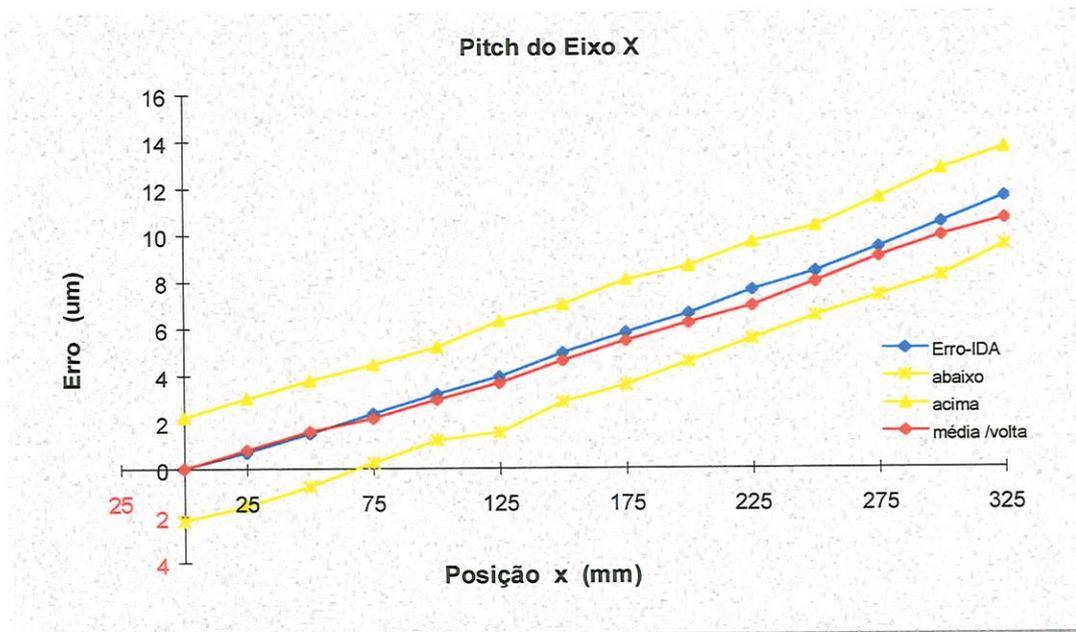


Figura 6.11: Erro angular “Pitch” do Eixo “X”.

A Figura 6.12 mostra o erro angular em torno do eixo “X”, “Pitch”, devido a movimentos no eixo “Y”. Pode-se observar que o erro aleatório permanece na faixa de  $\pm 4$  arcseg (relativamente grande). Os erros médios nas primeiras posições de medição são negativos não inferiores a  $-2$  arcseg e passam a ser positivos aumentando neste sentido até atingir um máximo de 6 arcseg. Isto indica que nos primeiros três pontos de medição a ponte que translada sobre o eixo “Y” inclina-se ligeiramente para trás, a partir daí o sentido de rotação é invertido e a ponte inclina-se para frente até o final do eixo calibrado.

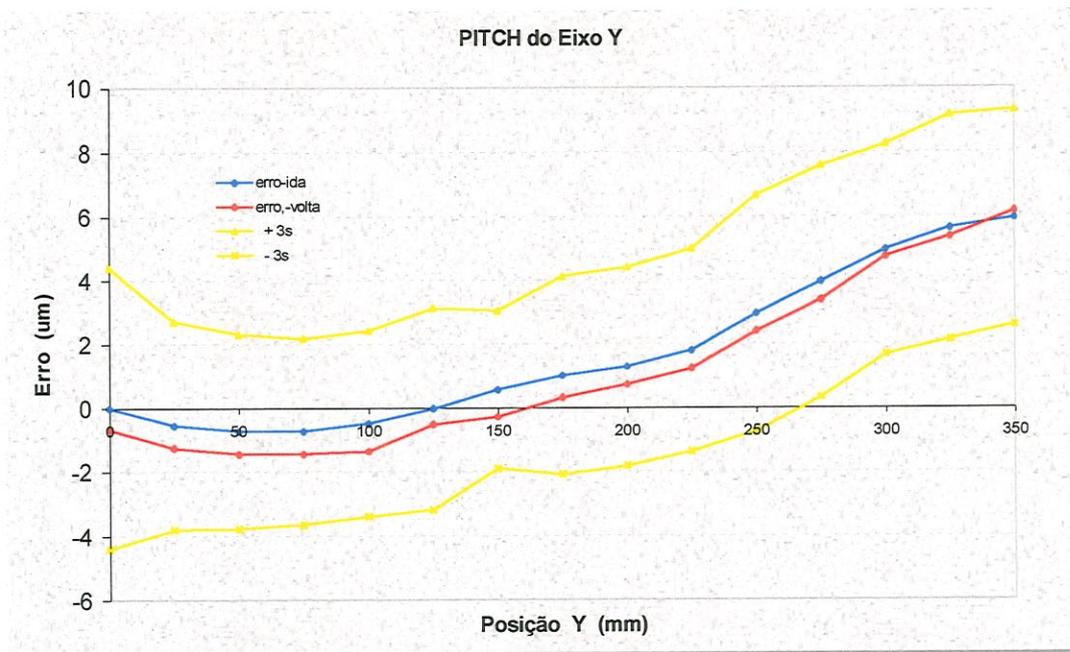


Figura 6.12: Erro Angular “Pitch” do eixo “Y”.



Figura 6.13: Erro Angular Pitch do Eixo “Z”.

O erro de rotação “Pitch” em torno do eixo “X” devido ao movimento na direção “Z” está representado no gráfico da Figura 6.13. Neste gráfico o erro aleatório máximo é de  $\pm 1$  arcseg e o erro médio total não ultrapassa 1.5 arcseg. O erro de histerese, nesse caso, também pode ser desprezado, pois é muito pequeno se comparado com os demais erros. Durante a calibração os erros permaneceram positivos demonstrando que quando o eixo “Z” desce em direção ao desempenho ele tende a rotacionar deslocando a ponta da sonda no sentido positivo do eixo “Y”. É interessante ressaltar que embora os erros sejam pequenos eles serão multiplicados por off-sets grandes (braços de Abbè) e portanto contribuem bem para o aumento do erro final.

### ➤ “Yaw”

O erro de rotação “Yaw” em torno do eixo “Z” devido ao movimento na direção de “X” está mostrado na Figura 6.14.

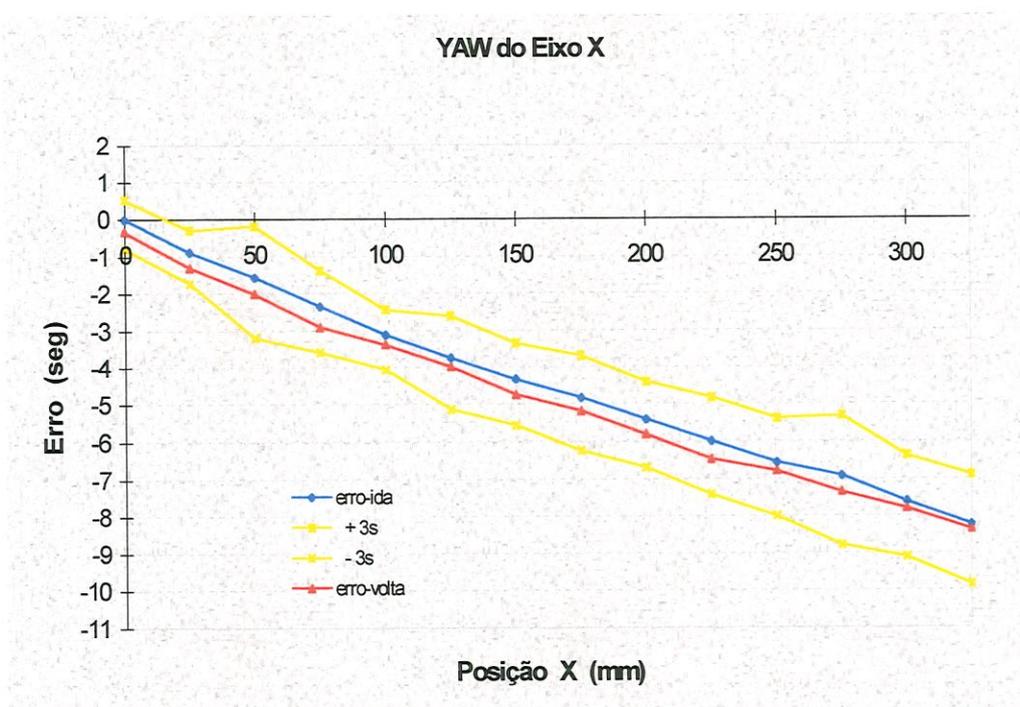


Figura 6.14: Erro de rotação “Yaw” em torno do eixo “X”.

Os erros aleatórios ficam na faixa de  $\pm 1$  arcseg e os valores médios decrescem continuamente até  $-8$  arcseg. A histerese é praticamente nula. O comportamento deste erro indica que o carro do eixo “X” gira em torno de seus mancais, se a máquina for observada em planta superior, o giro é progressivo no sentido horário.

A Figura 6.15 apresenta o erro de rotação “Yaw” em torno do eixo “Z” devido ao movimento na direção “Y”. A faixa de variação do erro aleatório é de  $\pm 1$  arcseg podendo, novamente, desprezar o erro de histerese. Os valores dos erros médios são positivos e crescentes chegando a 7 arcseg. A ponte da máquina gira em torno de seus mancais no sentido anti-horário quando observada por cima.

O comportamento do erro angular “Yaw” em torno do eixo “Y” devido ao movimento na direção de “Z” pode ser visualizado no gráfico da Figura 6.16. No gráfico observa-se que o erro aleatório atinge um máximo de  $\pm 4$  arcseg para um erro médio que varia entre 1 e  $-1$  arcseg em toda faixa de calibração. Isto demonstra problemas de repetibilidade devido, provavelmente, a falta de rigidez nos mancais.

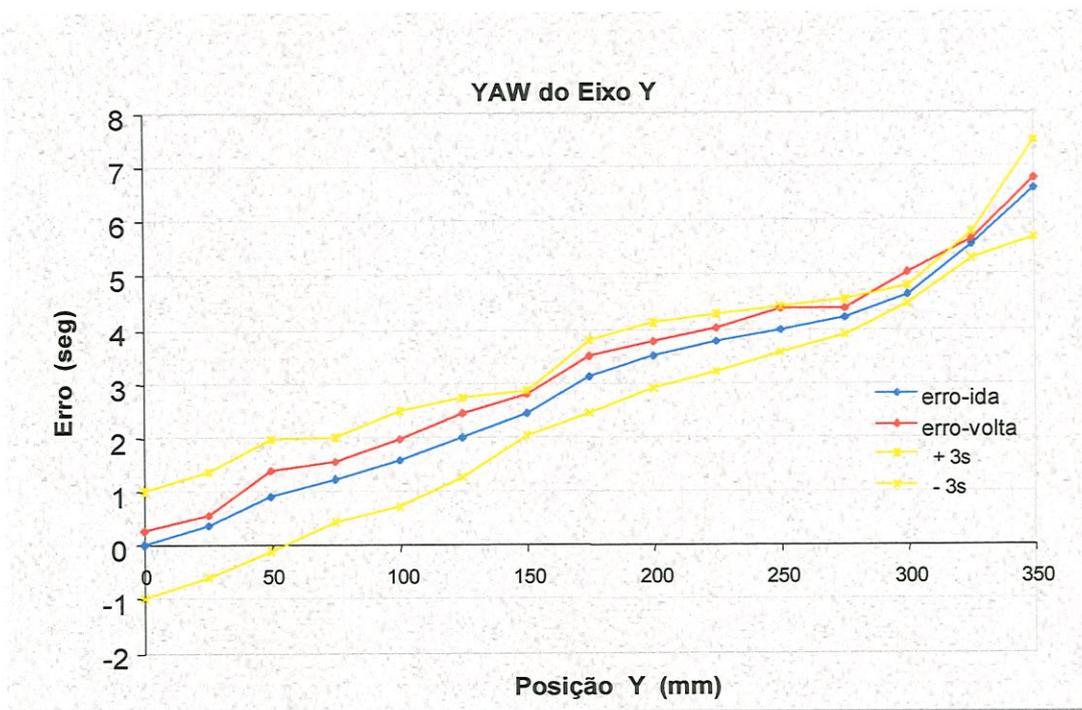


Figura 6.15: Erro de rotação “Yaw” devido ao movimento na direção “Y”

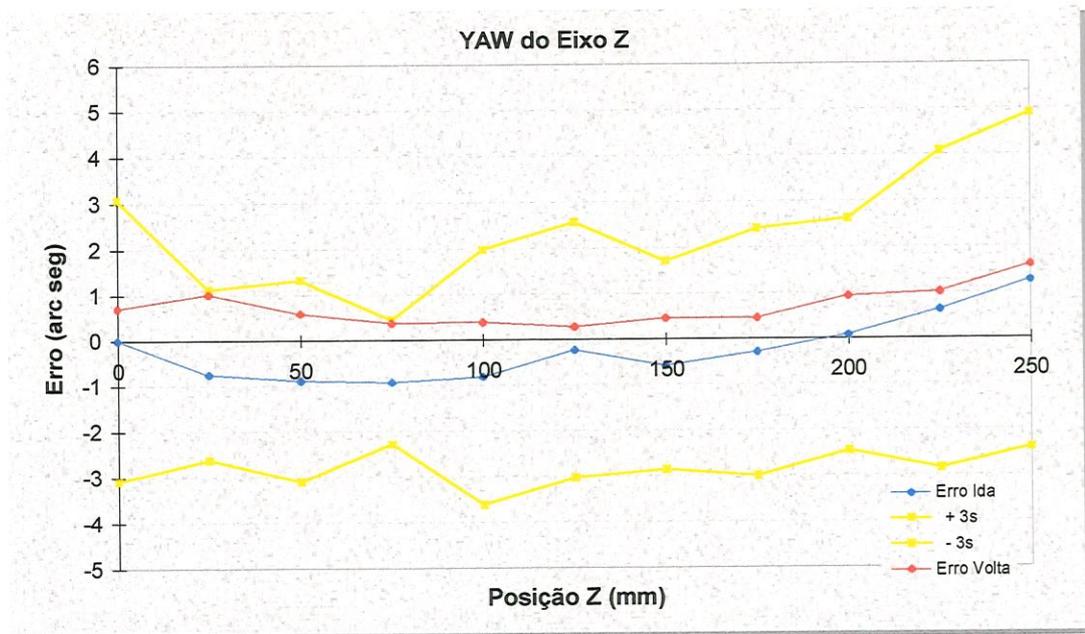


Figura 6.16: Erro de rotação “Yaw” devido ao movimento em “Z”.

### ➤ Roll

O comportamento do erro angular “Roll” em torno do eixo “X”, devido ao movimento na direção “X”, está mostrado na Figura 6.17.

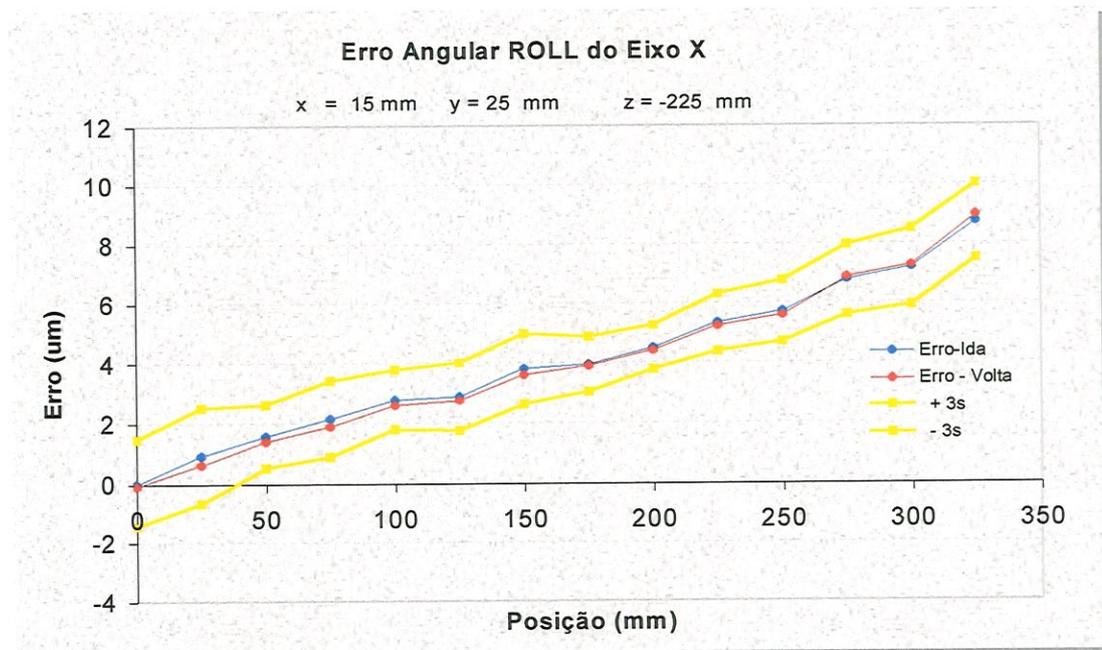


Figura 6.17: Erro Angular “Roll” do eixo “X”.

Observa-se que os erros sistemáticos são positivos e ascendentes com erro médio total de aproximadamente 9 seg. A parcela aleatória do erro é de  $\pm 1.8$  arcseg no início do trajeto de calibração, decrescendo para  $\pm 1$  arcseg já no terceiro ponto de medição permanecendo neste nível até o final da faixa de calibração. A parcela de erros que corresponde a histerese pode ser desconsiderada.

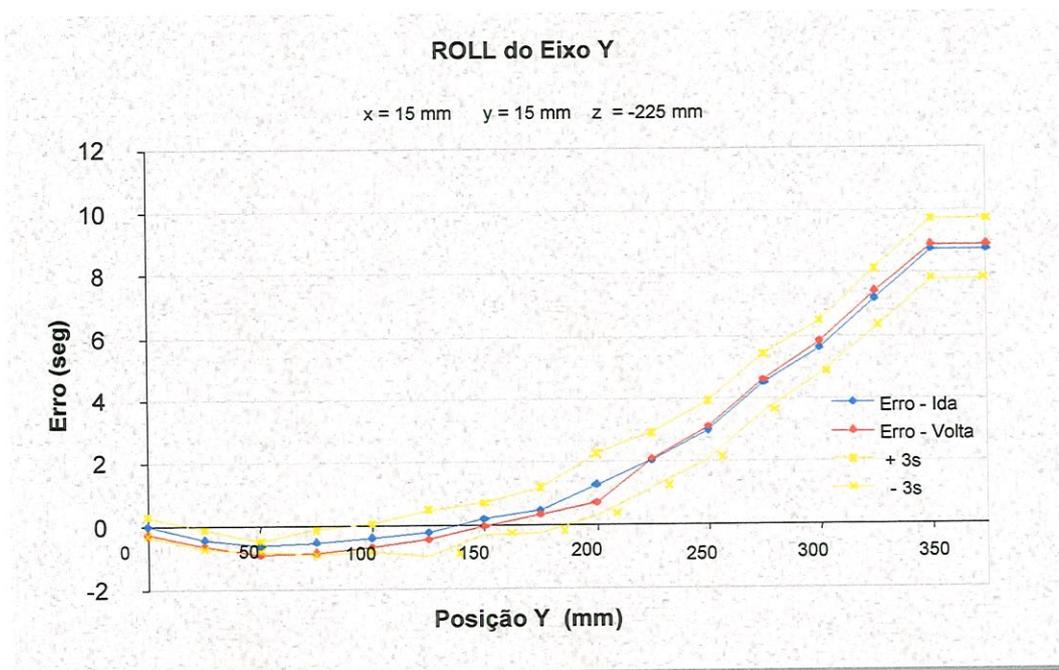


Figura 6.18: Erro Angular “Roll” do eixo “Y”.

O gráfico da Figura 6.18 representa o erro angular “Roll” em torno do eixo “Y”, devido ao movimento na direção “Y”. O erro de histerese é praticamente nulo e o erro aleatório atinge a amplitude máxima de  $\pm 2$  arcseg. Observa-se que nos primeiros pontos de medição o erro médio é negativo (mínimo de  $-0.8$  arcseg) tornando-se positivo no sexto ponto de medição e permanecendo ascendente até o final da calibração onde atinge um valor máximo de aproximadamente 9 arcseg. Isto quer dizer que a ponte gira no início do trajeto no sentido anti-horário (olhando a máquina de frente) e logo após no sentido horário.

É importante observar que nos erros de “Roll” praticamente não há erros de histerese isto possivelmente pode ser explicado pela instrumentação utilizada na calibração. A resolução do nível eletrônico (0,1 seg) e de bolha são maiores se comparado com o interferômetro laser (0,1 arcseg).

#### 6.1.4- Resultados da Calibração dos erros de Ortogonalidade

Os erros de ortogonalidade foram calibrados seguindo a metodologia exposta no capítulo 5, na Tabela 6.1 esta apresentado o resultado da calibração dos erros entre os três eixos da MM3C.

Tabela 6.1: Resultados da Calibração dos Erros de Ortogonalidade.

<b>ERROS DE ORTOGONALIDADE</b>	
Entre os eixos “X” e “Y”	$\varepsilon_{zo} = 13 \text{ seg}$
Entre os eixos “X” e “Z”	$\varepsilon_{yo} = 19 \text{ seg}$
Entre os eixos “Y” e “Z”	$\varepsilon_{xo} = -160 \text{ seg}$

#### 6.2 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA BARRA DE ESFERAS

A calibração da distância padrão da Barra de Esferas, isto é, a distância entre centros de Esferas foi feito conforme explicado no capítulo 5.

A Barra de Esferas foi levada à SIP e algumas de suas dimensões foram medidas para que se obtivesse o padrão desejado. Foram três dimensões avaliadas. Os diâmetros de cada esfera (2) e o comprimento total da Barra de Esferas.

Tanto os diâmetros das Esferas quanto a distância entre as extremidades das Esferas foram medidos dez vezes. Os valores das médias e dos desvios padrões foram calculados e usados para a

determinação da distância entre centros das Esferas. As expressões (6.2) e (6.3) mostram este procedimento de cálculo.

$$L = L_0 - \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} \quad (6.2)$$

$$\bar{L} = \bar{L}_0 - \frac{\bar{D}_1}{2} - \frac{\bar{D}_2}{2} \quad (6.3)$$

$$s_L^2 = s_{L_0}^2 + \frac{1}{4}s_{D_1}^2 + \frac{1}{4}s_{D_2}^2 \quad (6.4)$$

A incerteza expandida foi calculada para expressar a incerteza de medição. Utilizou-se o método proposto pelo NIST (*NIST, 1994*), o qual baseia-se na análise de variância das dimensões medidas e na distribuição de probabilidades t de student. Aqui utilizou-se um intervalo de confiança de 95% de confiabilidade e nove graus de liberdade. Assim:

$$\bar{L} \pm 2.s_L \quad (6.5)$$

O resultado da calibração da Barra de Esferas feita na S.I.P esta mostrado na Tabela 6.2 abaixo.

Tabela 6.2: Resultado da Calibração da Barra de Esferas.

Dimensão Padrão da Barra de Esferas
197.486 ± 0.0026 mm

### 6.3 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO INDIRETA

Na Tabela 6.3 estão apresentados os resultados da calibração indireta. A coluna da esquerda representa as 18 posições nas quais a Barra de Esferas foi calibrada no volume de trabalho da máquina seguindo o critério da norma *ANSI/ASME B89 1.4, 1995*.

A média dos valores dos erros de medição, isto é, a diferença entre a dimensão padrão e os valores lidos pela máquina em cada uma das posições designadas pela norma está exposta na coluna do meio. A direita os desvios padrões ( $\sigma$ ) dos erros de medição estão apresentados.

Tabela 6.3: Resultados da Calibração Indireta.

POSIÇÃO	ERRO ( $\mu\text{m}$ )	DESVIO PADRÃO( $\mu\text{m}$ )
1	-20.0	3
2	13.0	3
3	24.0	4
4	8.0	1
5	57.0	5
6	-83.9	5
7	-67.0	7
8	50.0	5
9	27.0	6
10	-45.0	6
11	-10.0	3.5
12	-30.0	2.5
13	-18.0	2
14	24.0	5
15	29.0	4
16	3.0	1
17	-18.0	3
18	-10.0	2

Há uma grande variação do erro de medição da Barra nas posições 5 e 6 como mostra a Tabela 6.3, onde os erros variam de 57 para  $-83.9 \mu\text{m}$ , esse fato é devido ao grande erro de ortogonalidade que existe entre os eixos “Y” e “Z”. Os sinais (+) e (-) indicam que a máquina mede dimensões maiores e menores que a real, respectivamente.

A norma *ANSI/ASME B89 1.4 M* propõe que o desempenho das MM3Cs seja analisado através da Tolerância de trabalho, definida como a amplitude total dos desvios medidos com a Barra de Esferas.

O gráfico da Figura 6.3 mostra que a tolerância da MM3C é de aproximadamente  $141 \mu\text{m}$ . Observa-se que os maiores erros derivam de posições em que a Barra de Esferas esta disposta nas diagonais das faces (posições 5 e 6) e nas diagonais principais (posições 7 e 10) que delimitam o volume de trabalho da máquina. Isso deve-se ao fato da máquina exigir o movimento dos três eixos durante a medição da Barra nestas posições, conseqüentemente há influência de uma quantidade maior de erros geométricos envolvidos, principalmente os erros de ortogonalidade.

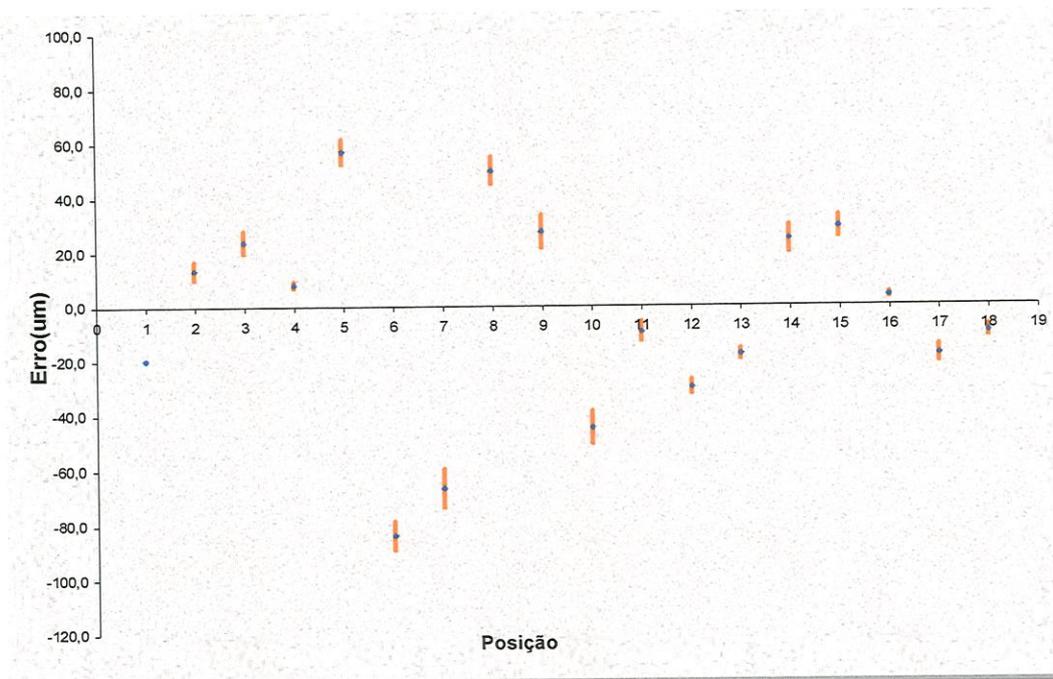


Figura 6.19: Resultado Gráfico do teste com Barra de Esferas.

## 6.4 – Comparação dos Resultados Obtidos

O conjunto dos erros de calibração da Barra de Esferas utilizando o método da sintetização de erros pode ser encontrado na Tabela 6.4. Os valores desta tabela estão dispostos como os descritos na Tabela 6.3.

Nota-se que a tolerância de trabalho da máquina por este método é semelhante ao método indireto, com uma faixa de tolerância de 132  $\mu\text{m}$ .

Tabela 6.4: Resultados da Sintetização.

POSIÇÃO	ERRO ( $\mu\text{m}$ )	DESVIO PADRÃO ( $\mu\text{m}$ )
1.0	-26.7	1
2.0	9.3	2
3.0	24.4	2
4.0	10.7	3
5.0	63.8	5
6.0	-70.3	3
7.0	-69.3	5
8.0	42.0	4
9.0	52.1	7
10.0	-20.5	2
11.0	-8.6	1
12.0	14.4	2
13.0	-6.1	1
14.0	20.7	2
15.0	17.1	2
16.0	9.9	1
17.0	-4.4	1
18.0	-2.1	1

Uma análise mais crítica pode ser feita quando os resultados dos dois métodos são comparados, a Figura 6.20 e a Tabela 6.5 atendem a esse fato.

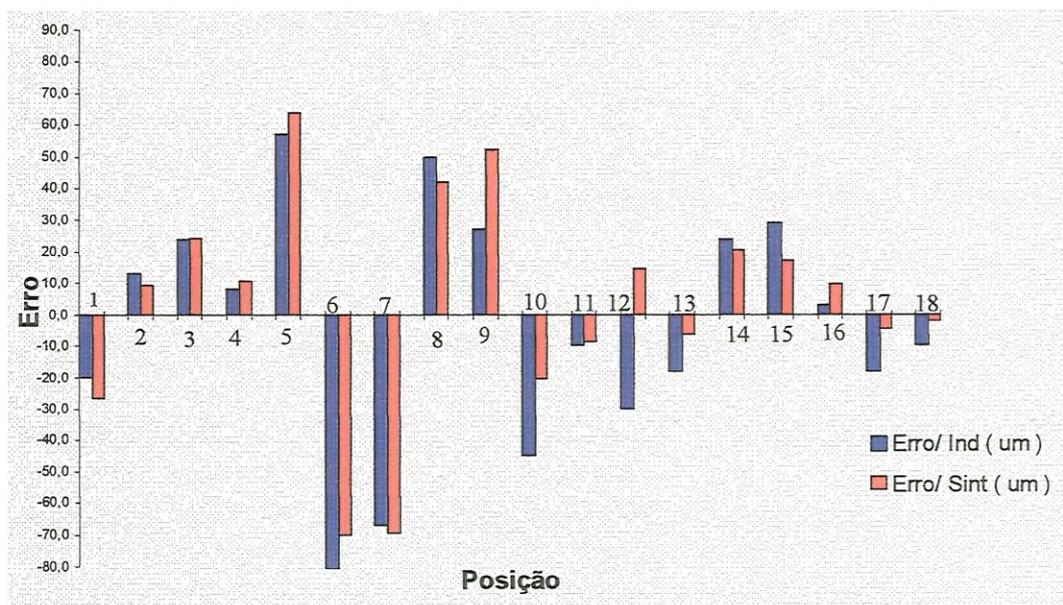


Figura 6.20 - Comparação entre métodos

Na Tabela 6.5 a quarta coluna indica a proporção do erro entre os dois métodos.

. Tabela 6.5 – Tabela de comparação entre métodos

POSIÇÃO	Método Indireto Erro ( $\mu\text{m}$ )	Sintetizado Erro ( $\mu\text{m}$ )	Erro relativo (%)
1	-20.0	-26.7	25
2	13.0	9.3	28
3	24.0	24.4	2
4	8.0	10.7	25
5	57.0	63.8	11
6	-84.0	-70.3	16
7	-67.0	-69.3	3
8	50.0	42.0	16
9	27.0	52.1	48
10	-45.0	-20.5	54
11	-10.0	-8.6	14
12	-30.0	14.4	52
13	-18.0	-6.1	80

14	24.0	20.7	14
15	29.0	17.1	41
16	3.0	9.9	70
17	-18.0	-4.4	75
18	-10.0	-2.1	79

Quando comparados os resultados obtidos por ambos os métodos observa-se que são similares, porém, o método indireto que utiliza uma Barra de Esferas é mais rápido e barato, pelo que recomenda-se sua utilização. Este método incorpora os efeitos do sistema de medição ou sonda e dos Braços de Abbè, é sabido que estes efeitos contribuem de maneira considerável para não acuracidade das medições em MM3Cs.

Comparando as amplitudes determinadas pelos dois métodos pode-se verificar que a tolerância de trabalho calculada pelo método sintetizado é de 134.1  $\mu\text{m}$  isto é, 7  $\mu\text{m}$  menor que a tolerância encontrada pelo método indireto [141  $\mu\text{m}$ ). Estes valores quando comparados com os valores fornecidos pelo fabricante da máquina Tabela 5.1, mostram que a mesma está fora das especificações, necessitando de ajustes.

A partir dos resultados obtidos pelo método indireto é possível também estimar alguns erros geométricos da máquina.

O erro de *posição do eixo "Y"* pode ser estimado com a Barra de Esferas medida na posição "12" onde o erro obtido na medição foi de -30  $\mu\text{m}$ . Este resultado seria semelhante ao apresentado pelo método direto se não estivesse incluídos outros erros, já discutidos. A mesma análise pode ser feita para o erro de *posição do eixo "X"*, este erro pode ser avaliado com a Barra de Esferas medida na posição "18" no volume da máquina.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES**

Neste trabalho, foi apresentado a calibração indireta de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas utilizando uma Barra de Esferas como padrão de medição. Os resultados obtidos foram comparados utilizando-se um outro método de calibração, o qual, o método da sintetização.

A calibração indireta permite uma avaliação geral do comportamento metrológico das Máquinas de Medir a Três Coordenadas e são propostos por normas técnicas e alguns autores.

A norma técnica americana ANSI / ASME B.89 4.1, 1995, foi utilizada neste trabalho e sugere a medição de uma Barra de Esferas em um número discreto de posições pré determinadas no volume de trabalho da máquina. O desempenho da máquina é determinado pela amplitude dos valores máximos e mínimos encontrados na calibração.

A validade dos resultados foi verificada através do uso do método da sintetização de erros. Para isto os erros volumétricos nos centros das esferas foram calculados utilizando-se dos erros individuais levantados durante a calibração. Os erros volumétricos foram posteriormente projetados na direção de medição da Barra de Esferas para que fosse possível a comparação dos resultados.

Após os desenvolvimentos teórico e experimental executados no presente trabalho, podem-se destacar as seguintes conclusões:

- O tempo de calibração com a Barra de Esferas foi significativamente menor quando comparado com o método da sintetização de erros, uma vez que este exigiu a calibração de todos os erros geométricos que contribuem para a formação do erro volumétrico.
  - A análise dos erros encontrados utilizando o método da sintetização permitiu diagnosticar as fontes dos erros da MM3C o que não foi possível com a calibração utilizando uma Barra de Esferas, onde a avaliação do desempenho da máquina é feita através da amplitude dos dados de calibração.
  - Na grande maioria dos casos não é preciso mais que a amplitude dos dados de calibração, portanto, o método se presta para quase que a totalidade dos testes industriais.
  - Para os fabricantes, a calibração com Barra de Esferas não é de grande valia, embora seja altamente comercial pois permite que os fabricantes sugiram este teste à seus fregueses.
  - A calibração com Barra de Esferas é mais viável se comparado com alguns outros artefatos. A Placa de esferas e Placa de furos são artefatos caros e necessitam de um espaço relativamente grande para a armazenagem quando não estão em uso além de apresentarem problemas de flexão e peso que inserem desta forma maiores erros nas medições. A Barra de Esferas por sua vez é um artefato relativamente barato e de baixo volume.
- No caso da Barra de Esferas múltiplas, esta necessita de maiores números de medições entre as características geométricas do padrão (esferas), exigindo um tempo maior de calibração.

- Pode-se dizer que a calibração indireta tem como característica apresentar o que de pior em desempenho a máquina pode oferecer. Sabe-se entretanto que com níveis de confiança pouco menores a amplitude de trabalho da máquina pode ser bastante reduzida. Assim uma vantagem do método é a característica de calibrar parcialmente ou em pequenos envelopes o volume de trabalho da MM3C, que é de particular interesse quando a peça possui proporções compatíveis com o padrão (Barra de Esferas) podendo ser medida dentro de um pequeno volume de trabalho da máquina que apresenta uma melhor acuracidade.
- A técnica das transformações homogêneas mostrou-se uma poderosa ferramenta para analisar as contribuições dos erros paramétricos nas componentes do erro volumétrico por todo o volume de trabalho da MM3C. Isto permite uma avaliação sobre onde deve-se atuar na máquina para melhorar seu desempenho.
- O método proposto mostrou-se eficiente na avaliação do desempenho das MM3Cs. A tolerância de trabalho da Máquina foi de 141  $\mu\text{m}$ , 5% maior que o encontrado pelo método sintetizado.
- Os maiores erros envolvidos na calibração foram aqueles onde a Barra de Esferas foi medida nas diagonais do volume de trabalho da máquina. Os erros de ortogonalidade foram os que mais contribuíram para este fato.
- Pode-se dizer que a calibração com Barra de Esferas permite uma avaliação mais realista do desempenho das MM3Cs, pois nas medições estão inseridos os efeitos do sistema de medição ou sonda o que não ocorre quando a avaliação é feita pelo método da sintetização de erros.

Durante o desenvolvimento desta dissertação outras propostas de trabalho foram sendo vislumbradas, as quais estão relacionadas a seguir:

- Calibrar os erros de posição de uma MM3C utilizando uma Barra de Esferas Múltiplas.
- Analisar as incertezas dos erros calibrados utilizando o “*Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*”.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABACKERLI, A. J. **“Sistema de Rastreamento Interferométrico para Calibração Volumétrica de Robôs Industriais”**, (Tese de Doutorado), EESC – USP, Maio, 1992.
- ANSI/ASME B 89.4.1. **“Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines”**. 1995.
- BALSAMO, A.; MARQUES, D.; SARTORI, S. **“A method for thermal deformation corrections of CMMs”**. Annals of the CIRP, 1990.
- BELFORT, G.; BONA, B.; CANUTO, E.; DONATI, F.; FERRARIS, F.; GORINI, I.; MOREI, S.; PEISINO, M. SARTORI, S. **“Coordinate measuring machines and machine tools self calibration and error correction”**, Annals of the CIRP, v. 36, 1987.
- BRYAN, J. B. **“A simple method for testing measuring machines and machine tools”**, part 1, Principles and Applications. Precision Engineering, vol. 4, No. 2, April 1982.
- BRYAN, J. B. **“The Abbé Principle Revisited: Updated Interpretation”**. Precision Engineering, vol.1, 1, Jul. 1979: 129-132.
- BRYAN, J. **“International Status of Thermal Error Research”**. Annals of the CIRP, v.39, n2, 645-656, 1990.
- BURDEKIN, M. S.; VOUTSADOPOULOS, C. **“Computer aided calibration of the geometric errors of multi-axis coordinate measuring machines”**, Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 195, p. 231-239, 1981.
- BURY, J. **“The direct measurement of volumetric errors of three dimensional coordinate machines”**, Metrology Conference, paper 8, 1976.
- BOSCH, J. A. **“Coordenate Measuring Machines and Systems”** – New York, Marcel Dekker, 1995.
- BUSCH, K.; KUNZMANN, H. AND WÄLDELE, F. **“Calibration of Coordinate Measuring Machines”**, Precision Engineering, vol. 7, No. 3, pag.139-144, 1985.

- CARDOZA, J. A. S. **“Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas”**, Tese (Doutorado), EESC-USP, Agosto 1995.
- CASKEY, G.; HARI, Y.; HOCHEN, R.; PALANVEU, D.; RAJA, J.; WILSON, R.; CHEN, K. AND YANG, J. **“Sampling techniques for coordinate measuring machines”** Proc. Of the NSF Conference, 1991.
- DENAVID, J. & HARTENBERG, R. S., **“A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices”**. Journal of Applied Mechanisms, June, 1955.
- DIETRICH, C. F. **“Uncertainty, calibration & probability”**. London, Adam Hilger, 1973.
- DI GIACOMO, B.; MARTINEZ ORREGO, R. M. & VIEIRA SATO, D. P. **“An exploratory study about the second order errors in mathematical models of coordinate measuring machines”**. Metrocal. Abril. 1997.
- DI GIACOMO, B.; MARTINEZ, R. M. & VIEIRA SATO, D. P. **“Calibração de Máquinas de Medir a Três Coordenadas”**. EESC-USP, 1997.
- DI GIACOMO, B. **“Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines”**. PhD Thesis – THE VICTORIA UNIVERSITY OF MANCHESTER. 1-418, 1986.
- DOEBELIN, E. O. **“Measurement systems - application and design”**. McGraw-Hill Kogakusha, Ltda. 1990.
- DONMEZ, M. A.; LIU, C. R.; BARASH, M. M.; **“Generalized mathematical model for machine tool errors”**. Modeling, Sensing and Control of Manufacturing Process, ASME – PED, v.23, 1988.
- HOCKEN, R. J. **“Three dimensional metrology”**. Annals of the CIRP. V. 36, p. 403-408, 1977.
- HOCKEN, R. J. **“Technology of machine tools”**. V.5, California, National Technical Information Service, 1980.
- HOCKEN, R. J. **“A new national standard for the performance of coordinate measuring machines”**. From proceedings of the 1991 NSF Design and Manufacturing Suatms Conference Austin, January 9-11, 1991.

- KNAPP, W.; TSCHUDI, U. AND BUCHER, A. **“Comparison of different artifacts for interim coordinate measuring machine checking: a report from the swiss standard committee”**, Precision Engineering, vol. 13, p. 277-281, 1991.
- KRUTH, J. P. **“Self calibration method and software error correction for three dimensional coordinate measuring machines using artifact measurements”**, Measurement, vol 14, p. 157-167, 1994.
- KUNZMANN, H. & WÄLDELE, F. **“Performance of CMMs”**, Annals of the CIRP, vol. 39/2, pag 633-640, 1988.
- LIM, S.; NAM, K. C. AND CHUNG, M. S. **“A two-dimensional test body for calibration of coordinate measuring machines”**. Precision Engineering, vol. 10, 1988.
- LINGARD, P. S.; PURSS, M. E.; SONA, C. M.; THWAITE, E. G. **“Temperature perturbation effects in high precision CMM”**. Precision Engineering, vol. 13, No. 1, p. 41-51, 1991.
- LOVE, W.J. AND SCARR A. J. **“The determination of the volumetric accuracy of multi-axis machines”**, Cranfield Inst. of technology, p. 307-315, 1973.
- MARTINEZ ORREGO, R. **“Avaliação e Qualificação de Máquinas de Medir a Três Coordenadas”**. Relatório FAPESP, n 2, 1995.
- NIST Technical Note 1297. **“Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurements results”**. National Institute of Standards and Technology, 1994.
- PHILLIPS, S. D.; BORDCHARD, B.; ESTLER, W. T.; AND HENRY, J. A. **“Properties of free standing ball bar systems”** Precision Engineering, v.5, n. 1,p. 16-24, 1993.
- PAHK, H. J.; KIM, J. **“Development of computer integrated system for error diagnosis of a CMM using calibrated mechanical artifacts”**, International Journal of Machines Tools & Manufacture, vol 33, n 6, p. 773-790, 1993.
- PAHK, H. J. & BURDEKIN, M. **“Computer aided volumetric error calibration of co-ordinate measuring machine using the base as metrological reference”**. Instn. Mech. Engrs., 205, p. 469-76, 1991.

- PEGGS, G. N. **“Creating a standard infrastructure for Coordinate Measurement Technology in the UK”**, Annals of the CIRP, vol. 38/1, pag. 521-523, 1989.
- PIRATELI, A FILHO. **“Método para avaliação do desempenho de máquinas de medir a três coordenadas através do planejamento de experimentos”**. Tese de Doutorado, EESC-USP, 1997.
- RESHETOV, D. N.; PORTMAN, V. T. **“Accuracy of machine tools”**, ASME, 1988.
- SARTORI, S. **“Geometric error measurement and compensation of machines”**. Annals of the CIRP, 1995.
- SLOCUM, A. H. **“Precision Machine design. Prentice Hall”**, p.58-107, 1992.
- SOONS, J. A. **“Modeling the errors of multi-axis machines a general methodology”**. Precision Engineering, v.14, n. 1, p. 5-19, 1992.
- TRAPET. E. & WALDELE, F. **“Asseguramiento de la calidad para máquinas de medir por coordenadas”**. PTB – Physikalish Technische Bundesanstalt. Seminário em El Centro Espanhol de Metrologia, 17 al 21 de junio 1991
- VIEIRA SATO, D. P. **“Uma contribuição ao modelo de sintetização de erros em máquinas ferramentas”**, Tese (Doutorado), EESC-USP, 1998.
- WECK, M. **“Handbook of machine tools – Metrological analysis and performance tests”**. London, John Wiley & Sons, v.4, 1984.
- WEEKERS, W. G.; SCHELLENKENS, P. H. J. **“Assessment of Dynamics errors of CMMs for fast probing”**. Annals of the CIRP, 4.44, n. 1, p.469-474, 1995.
- WECKENMANN , A.; EITZERT, H.; GARMER, M. AND WEBER, H. **“Functionality oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology”**. Precision Engineering, vol. 17, No. 3, p. 244- 253, 1985.
- YANG, Q.; BUTLER, C.; BAIRD, P. **“Error compensation of touch trigger probes”**. Measurement, vol 18, p. 47-57, 1996.

## ANEXO

### ANÁLISE E PROJEÇÃO DOS VETORES ERRO VOLUMÉTRICO NA DIREÇÃO DE MEDIÇÃO DA BARRA DE ESFERAS

Para se aplicar o Método da Sintetização de Erros na calibração com Barra de Esferas tornou-se necessário a projeção do erro volumétrico dos centros das esferas na direção de medição da Barra, isto devido ao fato do erro volumétrico apresentar diferentes direções e orientações no volume de trabalho da MM3C podendo afetar diretamente no resultado da calibração.

A Figura A1 abaixo representa uma Barra de Esferas cujas coordenadas cartesianas dos centros das duas esferas **P** e **Q** são representadas como  $(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})$  e  $(x_{q2}, y_{q2}, z_{q2})$  respectivamente.

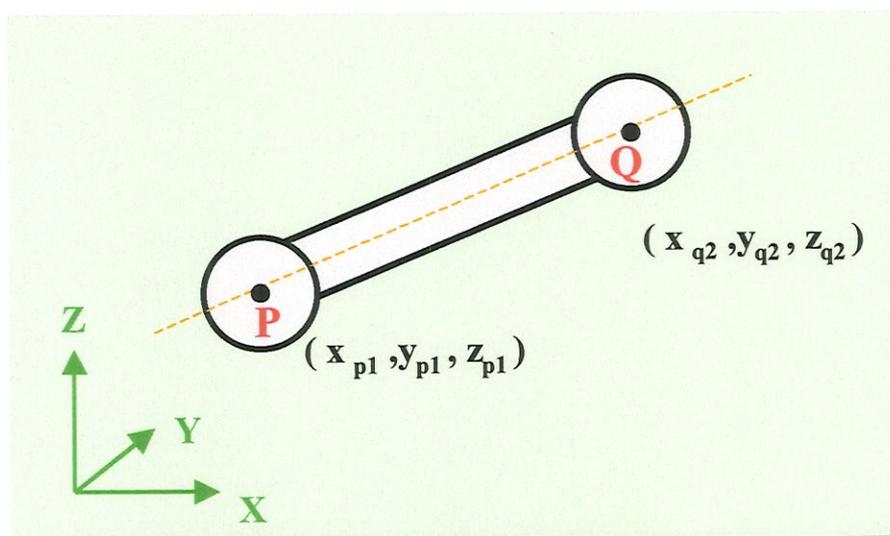


Figura A1: Representação de uma Barra de Esferas.

Das equações de sintetização determina-se as componentes do vetor erro volumétrico das coordenadas do centro das esferas designadas pelas coordenadas  $E_{x1}$ ,  $E_{y1}$ ,  $E_{z1}$  para o centro da esfera 1 e  $E_{x2}$ ,  $E_{y2}$ ,  $E_{z2}$  para o centro da esfera 2.

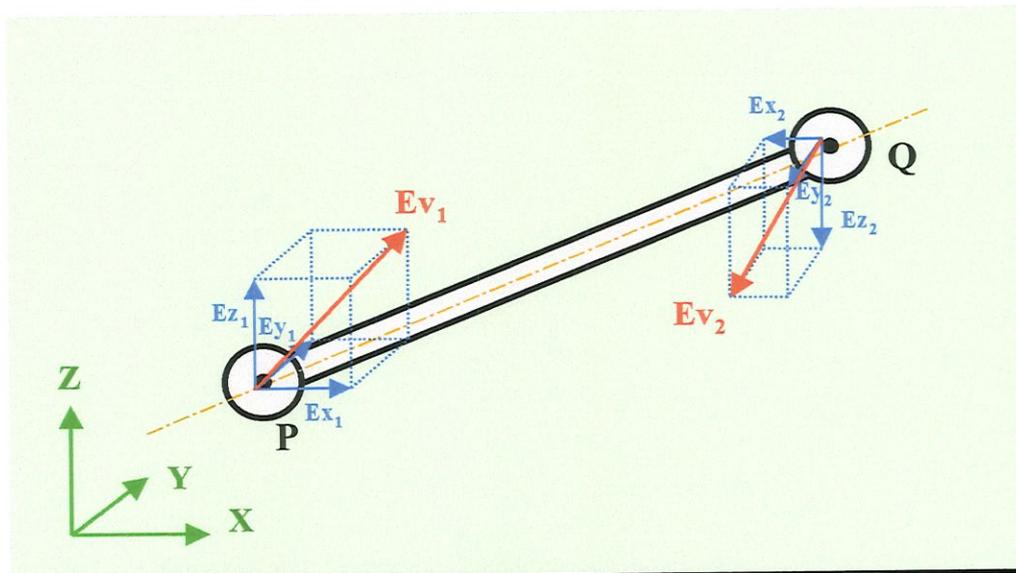


Figura A2: Representação do Erro Volumétrico e suas componentes escalares.

Durante a medição da Barra de Esferas foram determinados os ângulos diretores, isto é, aqueles que definem a posição da Barra no volume de trabalho da máquina. Estes ângulos foram determinados com relação a um sistema de coordenadas cartesianas (X, Y e Z) previamente definido. Na figura A3 podem ser observados os ângulos diretores, denotados por  $\rho$ ,  $\xi$  e  $\eta$ .

➤ Direção da Barra de Esferas

A distância entre centros das esferas pode ser representada por um vetor  $\overline{PQ}$  que liga os pontos P e Q e suas componentes escalares são representadas por  $b_x$ ,  $b_y$  e  $b_z$ .

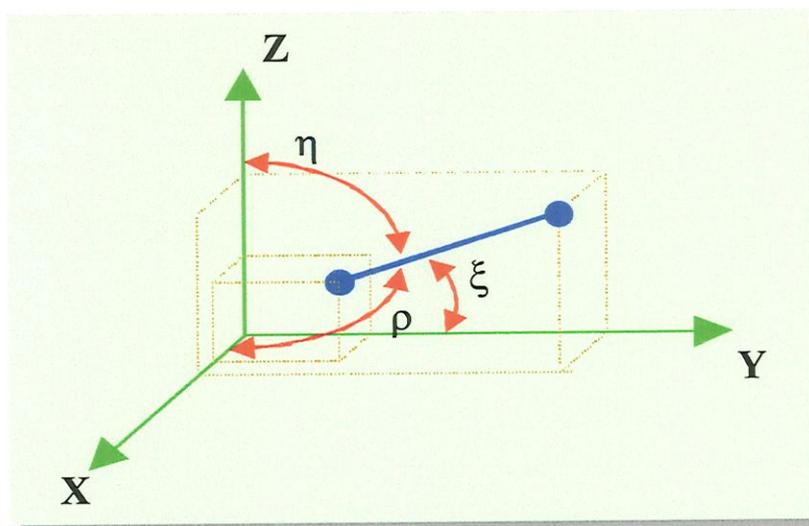


Figura A3: Ângulos diretores da Barra de Esferas

O vetor  $\overline{PQ}$  pode ser calculado pela expressão 1.

$$\overline{PQ} = b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k} \quad (1)$$

Sendo  $\vec{\lambda}$  um vetor de módulo unitário e de mesma direção e sentido do vetor de P a Q temos que as componentes do vetor unitário  $\vec{\lambda}$  são respectivamente iguais aos co-senos diretores da linha de ação **PQ**, portanto a expressão (2) é válida:

$$\vec{\lambda} = \cos \rho \vec{i} + \cos \xi \vec{j} + \cos \eta \vec{k} \quad (2)$$

O vetor unitário  $\vec{\lambda}$  ao longo da linha **PQ** é obtido dividindo-se o vetor  $\overline{PQ}$  por seu módulo PQ ( equação 3).

$$\lambda = \frac{\overline{PQ}}{PQ} \quad (3)$$



Substituindo a equação (1) em (3) e observando que PQ é igual a distância B de P a Q, escreve-se:

$$\lambda = \frac{\overline{PQ}}{PQ} = \frac{1}{B} (b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k}) \quad (4)$$

Como as coordenadas cartesianas dos centros das duas esferas (P e Q) são conhecidas fica fácil determinar as componentes do vetor  $\overline{PQ}$  e a distância B de P a Q, basta subtrair as coordenadas de P das de Q ( equações 5) e assim determinar a distância B. É interessante observar que não é importante o cálculo de B (equação 6), pois essa distância já é definida durante a calibração indireta.

$$b_x = x_{q2} - x_{p1} \quad b_y = y_{q2} - y_{p1} \quad b_z = z_{q2} - z_{p1} \quad (5)$$

$$B = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} \quad (6)$$

Finalmente pode-se exprimir a direção da Barra de Esferas no espaço da MM3C através do vetor  $\vec{\lambda}$  e também conhecer os ângulos diretores:

$$\vec{\lambda} = \frac{b_x}{B} \vec{i} + \frac{b_y}{B} \vec{j} + \frac{b_z}{B} \vec{k} \quad (7)$$

### ➤ Projeção do erro volumétrico

Conhecida a direção da Barra de esferas no volume de trabalho da MM3C, isto é, o vetor ( $\vec{\lambda}$ ), pode-se definir a contribuição do erro volumétrico na direção de medição como sendo o escalar:

$$E_b = E_v * \cos\theta \quad (8)$$

Onde  $E_b$  é o valor do erro volumétrico projetado na direção da Barra de Esferas,  $E_v$  é o valor do erro volumétrico e  $\theta$  o ângulo formado entre o vetor erro volumétrico e a direção da Barra de esferas (vide Figura 5.22).

Como o vetor  $\vec{\lambda}$  está orientado segundo PQ e de mesmo sentido que  $\vec{PQ}$ , o produto escalar de  $E_v$  e  $\lambda$  pode ser expresso na forma:

$$E_v * \lambda = E_v * \lambda * \cos\theta \quad (9)$$

No caso particular em que  $\lambda$  é um vetor unitário escolhido segundo PQ tem-se:

$$E_b = E_v * \lambda \quad (10)$$

Decompondo  $E_v$  e  $\lambda$  em coordenadas cartesianas e lembrando que:

- as coordenadas cartesianas do erro volumétrico ( $E_v$ ) são as componentes  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$ .
- as componentes de  $\lambda$  segundo os eixos coordenados são respectivamente iguais aos co-senos diretores de PQ.

Temos que a projeção do erro volumétrico do centro da primeira esfera sobre a direção de medição da Barra de esferas é:

$$E_{b1} = E_{x1} * \cos\psi \vec{i} + E_{y1} * \cos\xi \vec{j} + E_{z1} * \cos\eta \vec{k} \quad (11)$$

Os cálculos da projeção do erro volumétrico esta descrito acima apenas para o centro de uma esfera da Barra de Esferas, o procedimento de cálculo é semelhante para a segunda esfera e que por isso não será descrito.

➤ Cálculo do erro na direção de medição da Barra de esferas

Projetados os erros volumétricos de ambos os centros das esferas na direção de medição pode-se agora definir o erro da Barra por este método designado por  $E_{bd}$ . Na figura (A4) abaixo estão representados os erros volumétricos projetados de ambos os centros das esferas e o erro da barra.

Convencionou-se o sentido dos vetores projetados na direção de medição da Barra de Esferas como sendo positivos no sentido da esfera 2 para a esfera 1. O erro da Barra é dado então por:

$$E_{bd} = [E_{b2}] - [E_{b1}] \quad (12)$$

Onde:

- ◇  $E_{bd}$ : Erro de medição pelo método direto.
- ◇  $E_{b1}$ : Projeção do erro volumétrico do centro da primeira esfera na direção de medição da barra de esferas.
- ◇  $E_{b2}$ : Projeção do erro volumétrico do centro da segunda esfera na direção de medição da barra de esferas.

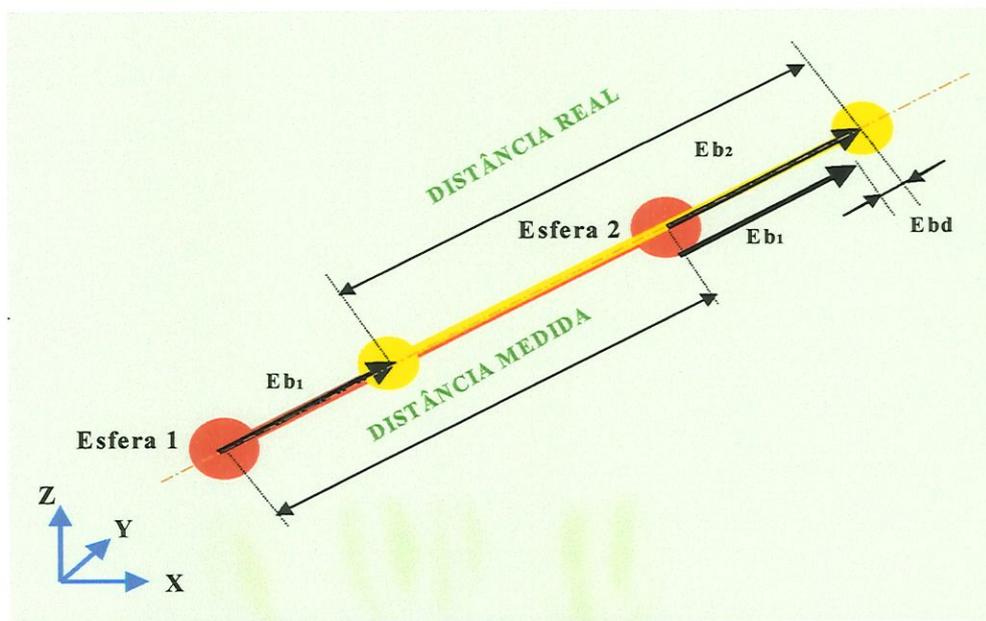


Figura A4: Projeção do Erro volumétrico na direção de medição da Barra de Esferas.

Observa-se que se ambos os vetores dos erros projetados ( $E_{b1}$  e  $E_{b2}$ ) tiverem o mesmo sentido e módulo, o valor do erro da barra por este método é zero. Com isso a distância entre centros das esferas permanece a mesma.

O procedimento acima foi executado para todas as posições em que a Barra de Esferas foi medida.