Campus de São Carlos

MODELO REDUZIDO DE SINTETIZAÇÃO DE ERROS PARA MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

RENATA BELLUZZO ZIRONDI

Orientador: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS

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

Serviço de Pós-Gradução EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 28 105 102

ss: 796

MODELO REDUZIDO DE SINTETIZAÇÃO DE ERROS PARA MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

RENATA BELLUZZO ZIRONDI

DEDALUS - Acervo - EESC

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo

São Carlos 2002



Tombo Offa

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

Z81m

Zirondi, Renata Belluzzo Modelo reduzido de sintetização de erros para máquinas de medir a três coordenadas. / Renata Belluzzo Zirondi. -- São Carlos, 2002.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002. Área: Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Benedito Di Giacomo.

- Máquinas de medir a três coordenadas.
 Calibração. 3. Modelagem matemática de erros.
- 4. Barra de furos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira RENATA BELLUZZO ZIRONDI

Tese defendida e julgada em 27-03-2002 perante a Comissão Julgadora:

The state of the s	
Prof. Dr. BENEDITO DI GIACOMO (Orientador)	APROVADA
Prof. Assoc. WALDEK WLAD MIR BOSE FILHO (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)	Aprovado.
Prof. Tit. ROSALVO TIAGO RUFFINO	Aprovada
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Prof. Dr. JOSÉ PRANCISCO FERREIRA RIBEIRO	APROVADA
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP)	Aprovedo
Prof. Dr. ANTONIO PIRATELLI FILHO (Universidade de Brasília/UnB)	111100

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

JOSÉ CARLOS A CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais Ana e Raimundo. À você Cássio.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Benedito Di Giacomo pela orientação, discussão e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação Alessandro, Vagner, Fabrício Flores, Rosenda, Roberto, Denise, Alexandre, Fabricio, Piratelli, Roxana, Márcia, Marcela, Rita, Eraldo pelo companheirismo e pelas discussões proveitosas.

Ao técnico Luiz Neves pela grande ajuda na montagem dos ensaios.

Aos funcionários da Oficina do LAMAFE Adão S. Bolsan, José C Botelho e José C. Risardi pelo auxílio no projeto e usinagem das peças.

Aos meus companheiros de viagem pelas risadas, amizade e incentivo.

A Capes pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, Comissão de Pós Graduação e corpo administrativo pela colaboração prestada sempre que necessário.

Um agradecimento muito especial a Dagoberto, Regina, Lívia, Temo, Mariana pelo carinho, amizade e por terem me recebido tão bem na sua família.

À minha família que soube entender minhas ausências em aniversários, reuniões, casamentos, etc. e que sempre me apoiou e incentivou nesta jornada.

À minha irmã Fabíola e ao meu cunhado Marcos pelo incentivo.

Aos meus pais, razão da minha alegria, pelo amor e apoio em tudo que eu faço.

A você Cássio por tudo o que vivemos e que ainda vamos viver juntos.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE GRÁFICOS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
	IX
RESUMO	
ABSTRACT	Х
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2: OS ERROS E A CALIBRAÇÃO DE MÁQUINAS DE	5
MEDIR A TRÊS COORDENADAS	
2.1 Vetores que Potencializam a Influência dos Erros sobre as	6
Componentes do Erro Volumétrico	
2.1.1. Vetores que dependem das Condições de Operação da MM3C	7
2.1.2. Vetores que Dependem dos Componentes das MM3Cs	9
2.2. Tipos de Erros em Máquinas de Medir a Três Coordenadas	13
2.2.1. Erros Geométricos em uma MM3C tipo Ponte Móvel	13
2.3. Calibração de Máquinas de Medir a Três Coordenadas	16
2.3.1. Os Artefatos e a Calibração de MM3Cs	17
2.3.2. As Técnicas de Calibração de MM3Cs	22
2.4. Modelagem de Máquinas de Medir a Três Coordenadas	23
CAPÍTULO 3: A RASTREABILIDADE DAS MEDIÇÕES A TRÊS	31
COORDENADAS	
3.1. O conceito de Rastreabilidade	32
3.1.1. Definição da Cadeia de Rastreabilidade	33
3.2. Escolha de um Método para a Calibração	36
3.2.1.A Calibração e a Incerteza das Medições a Três Coordenadas	37
3.3. Incerteza de Medição	44
3.3.1. Incerteza de Medição: conhecimentos básicos	45

	49
3.3.2. Forma de Avaliação das Incertezas de Medição	1000000
3.3.3. Incerteza Padronizada Combinada	53
3.3.4 Incerteza Expandida	56
CAPÍTULO 4: MODELO REDUZIDO DE SINTETIZAÇÃO DE ERROS	60
PARA MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS	
4.1. Modelo Reduzido de Sintetização de Erros	61
4.3. Verificação do Modelo Proposto e da Qualidade dos Erros	62
Calculados	
CAPÍTULO 5: DESENVOLVIMENTO DO MODELO REDUZIDO DE	64
SINTETIZAÇÃO DE ERROS PARA MM3Cs	
5.1. O Modelo Reduzido de Sintetização de Erros (MRSE)	65
5.1.1. Equacionamento da Componente Ey do Erro Volumétrico	66
5.1.2. Equacionamento da Componente Ex do Erro Volumétrico	72
5.1.3. Equacionamento da Componente Ez do Erro Volumétrico	77
5.2. Calibração da Máquina de Medir a Três Coordenadas	82
5.2.1. Descrição da MM3C utilizada nos Testes Experimentais	82
5.2.2. A Calibração com a Barra de Furos	85
5.2.3. A Calibração com o Esquadro Mecânico	88
5.3. Estimativa das Incertezas no Cálculo das Componentes do Erro	92
Volumétrico	
5.3.1. Estimativa da Incerteza na Determinação das Componentes	93
Y, X, Z do Erro Volumétrico	
5.3.2. Estimativa da Incerteza no Cálculo dos Deslocamentos que	95
dependem de outras grandezas medidas	
5.3.3. Estimativa da Incerteza na Medição das distâncias entre os	95
Furos da Barra na MM3C	
5.3.4. Estimativa da Incerteza na Medição de Deslocamentos	98
utilizando o Esquadro Mecânico	
CAPÍTULO 6: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	100
6.1. Verificação da Eficiência do MRSE em Prever Erros	101
6.2. Resultados do Diagnóstico das Fontes de Erros	103

6.3. O MRSE e a Rastreabilidade	109
6.4. Comparando o MRSE a outros Modelos de Sintetização Conhecidos	111
6.4.1. MRSE x Calibração Paramétrica	111
6.4.2. MRSE x Volume Dividido	112
6.5. Resultados obtidos com a aplicação do MRSE	112
6.5.1. A componente Y do Erro Volumétrico	113
6.5.2. A componente X do Erro Volumétrico	121
6.5.3. A componente Z do Erro Volumétrico	128
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
APÊNDICE 1: MODELO MATEMÁTICO DE UMA MM3C TIPO PONTE	149
MOVEL UTILIZANDO A TÉCNICA DE TRANSFORMAÇÕES	i)
HOMOGÊNEAS	×
APÊNDICE 2: CALIBRAÇÃO DA BARRA DE FUROS	160

Lista de Figuras

Figura 2.1. Vetores que potencializam os erros individuais nas	6
medições por coordenadas	
Figura 2.2. Paquímetro e Micrômetro com respectivas linhas de	10
medição e linha de referência	
Figura 2.3a. Sonda por contato	11
Figura 2.3b. Sonda sem contato	11
Figura 2.4. Máquina de Medir a Três Coordenadas tipo Ponte Móvel e	14
seus principais componentes	
Figura 2.5. Rotações devido ao movimento do carro X	15
Figura 2.6. Translações devido ao movimento do carro X	15
Figura 2.7. Artefatos utilizados na Calibração de MM3Cs	21
Figura 2.8. Técnica do Volume Dividido	22
Figura 3.1. Caminhos para rastrear peças manufaturadas até o padrão	34
internacional de comprimento.	
Figura 3.2. Cadeias Alternativas de Rastreabilidade de Dimensões de	35
Peças Manufaturadas.	
Figura 3.3. Fontes de Incerteza nas Medições a Três Coordenadas	39
Figura 3.4. Máquina Virtual de Medir a Três Coordenadas	42
Figura 3.5. Ilustração gráfica do conceito de valor, erro e incerteza	49
Figura 3.6. Distribuições de probabilidade	52
Figura 3.7. Fator de Abrangência e nível de confiança	58
Figura 3.8. Representação da Incerteza Padronizada Combinada (Ic) e	58
da Incerteza Expandida com 95%(I_{95}) e 99% (I_{99}) de Confiança	
Figura 5.1.Posicionamento do Sistema de Referência na MM3C	65
Figura 5.2. Três pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C	66
Figura 5.3. Deslocamentos Indesejáveis provocados pelos erros	68
angulares Yaw(y) e Pitch(y) devido à existência de braços nas direções	
X e Z respectivamente	

igura 5.4. Influências dos erros Roll(x), Ortogonalidade XY e	70
retilineidade Y(x) no posicionamento, em Y	
Figura 5.5. Influências dos erros Pitch(z), Ortogonalidade ZY e	71
retilineidade Y(z) no posicionamento, em Y	
Figura 5.6. Três pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C	72
Figura 5.7. Deslocamentos indesejáveis provocados pelo erro angular	74
Pitch(x) devido à existência de braço na direção Z.	
Figura 5.8. Influências dos erros Yaw(y), Ortogonalidade XY e	75
retilineidade X(y) no posicionamento, na direção X	
Figura 5.9. Influências dos erros Yaw(z), Ortogonalidade XZ e	77
retilineidade X(z) no posicionamento, na direção X	
Figura 5.10. Três pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C	78
Figura 5.11. Influências dos erros Roll(x) e Retilineidade Z(x) no	80
posicionamento, na direção Z	
Figura 5.12. Influências dos erros Roll(y), Pitch(y) e Retilineidade Z(y)	81
no posicionamento, na direção Z	
Figura 5.13. Máquina de Medir a Três Coordenadas	84
Figura 5.14. Barra de Furos	85
Figura 5.15. Desenho da Barra	86
Figura 5.16. Geratrizes Medidas utilizando a Barra de Furos	87
Figura 5.17. Montagem para Medição dos Deslocamentos Indesejáveis	88
Dy_k^3 para Braço Z máximo	
Figura 5.18. Montagem para Medição dos Deslocamentos Indesejáveis	89
Dy_k^4	
Figura 5.19. Montagem para Medição dos Deslocamentos Indesejáveis	89
Dx_k^2 com Braço Z máximo	
	00
Figura 5.20. Montagem para Medição dos Deslocamentos Indesejáveis	90
Dx_k^3	
Figura 5.21. Montagem para Medição dos Deslocamentos Indesejáveis	91
Dz_i^1	
Figura 5.22. Montagem para Medição dos Deslocamentos Indesejáveis	91
Dz_i^2 com Braço X mínimo	

Figura 6.1. Geratrizes medidas para Verificação dos Resultados	101
Figura 6.2. Erros Medidos e Sintetizados utilizando o MRSE nas	102
Direções X, Y e Z	
Figura 6.3. Demonstração da Cadeia de Rastreabilidade	
Figura 6.4. Erro Cíclico	132

Lista de Gráficos

Gráfico 6.1a. Erro Angular Yaw do Eixo Y	104
Gráfico 6.1b. Diferenças entre o erro calculado e medido	105
Gráfico 6.2a. Erro de Retilineidade Y(x)	106
Gráfico 6.2b. Diferenças entre o erro calculado e medido	107
Gráfico 6.3a. Erro angular Roll do eixo X	107
Gráfico 6.3b. Diferenças entre o erro calculado e medido	108
Gráfico 6.4. Erro de Escala do Eixo Y	113
Gráfico 6.5. Erro de Escala + Dy_i^1	114
Gráfico 6.6. Erro de Escala + $Dy_i^1 + Dy_k^2$	115
Gráfico 6.7. Erro de Escala + $Dy_i^1 + Dy_k^2 + Dy_k^3$	116
Gráfico 6.8. Ey calculado para o plano XY com Z=0mm	118
Gráfico 6.9. Erro de Escala + $Dy_i^1 + Dy_k^2$	119
Gráfico 6.10. Erro de Escala + $Dy_i^1 + Dy_k^2 + Dy_k^3$	120
Gráfico 6.11. Ey calculado para o plano XY com Z=246mm	121
Gráfico 6.12. Erro de Escala do Eixo X	122
Gráfico 6.13. Erro de Escala + Dx_k^1	122
Gráfico 6.14. Erro de Escala + $Dx_k^1 + Dx_k^2$	124
Gráfico 6.15. Ex no plano XY para Z=0mm	125
Gráfico 6.16. Erro de Escala + Dx_k^1	126
Gráfico 6.17. Erro de Escala + $Dx_k^1 + Dx_k^2$	126
Gráfico 6.18. Ex no plano XY para Z=0mm	127
Gráfico 6.19. Erro de Escala do Eixo Z	128
Gráfico 6.20. Erro de Escala + Dz_i^1	129
Gráfico 6.21. Ez para o plano XZ com Y=0mm	130
Gráfico 6.22. Ez para o plano XZ com Y=287mm	131

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Instrumentação para medir erro em MM3Cs	25
Tabela 5.1. Deslocamentos Indesejáveis nas direções X, Y e Z	66
Tabela 5.2. Características Técnicas da MM3C	84
Tabela 5.3. Parâmetros para Determinar a Incerteza dos	96
Deslocamentos Calculados	
Tabela 5.4. Parâmetros para Determinar a Incerteza da Medição das	97
Distâncias entre os Centros dos Furos	
Tabela 5.5. Parâmetros para Determinar a Incerteza da Medição de	99
Deslocamentos medidos utilizando o Esquadro como padrão de	
referência	
Tabela 6.1. Incerteza Padronizada Combinada (μm)	114
Tabela 6.2. Incerteza Padronizada Combinada (μm)	116
Tabela 6.3. Incerteza Padronizada Combinada (μm)	117
Tabela 6.4. Incerteza Padronizada Combinada (μm)	118
Tabela 6.5. Incerteza Padronizada Combinada (μm)	123
Tabela 6.6. Incerteza Padronizada Combinada (μm)	124
Tabela 6.7. Incerteza Padronizada Combinada (μm)	125
Tabela 6.8. Incerteza Padronizada Combinada (μm)	130
Tahela 6.9. Incerteza Padronizada Combinada (um)	131

Resumo

ZIRONDI, R.B..**Modelo Reduzido de Sintetização de Erros para Máquinas de Medir a Três Coordenadas.** Tese(Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.2002.

Desde a sua criação por Ferranti, cerca de 50 anos atrás, as tecnologias de projeto e de fabricação das Máquinas de Medir a Três Coordenadas evoluíram muito. Entretanto, ainda é impossível fabricar equipamentos livres de erros.

Para garantir a acuracidade das medições realizadas é necessário que se conheça tais erros e que rotinas de compensação sejam implementadas.

O levantamento dos erros de qualquer equipamento é feito através de procedimentos de calibração.

Entretanto, devido à complexidade das MM3Cs, ainda não existem procedimentos internacionalmente aceitos, por usuários e fabricantes, para avaliar o desempenho metrológico desses equipamentos. Técnicas normalizadas existentes, a exemplo, JIS B 7440 de 1987, B89.4.1. de 1997, VDI/VDE 2617 de 1986 entre outras, propõem testes de desempenho que na maioria das vezes superestimam os erros da MM3C. Além disso, dificultam a rastreabilidade para quaisquer condições de medição diferentes daquelas em que foi realizado o teste.

Assim, diante do exposto, este trabalho tem por objetivo principal apresentar um novo modelo de sintetização de erros para MM3Cs, o Modelo Reduzido de Sintetização de Erros. Este modelo possui equações de sintetização, para Ex, Ey e Ez, reduzidas, em comparação à outros modelos conhecidos, necessita de pequeno tempo na calibração o que reduz o custo desta atividade, possibilita o diagnóstico das fontes de erros e garante a rastreabilidade dos erros calculados.

Palavras Chaves: Máquinas de Medir a Três Coordenadas, calibração, modelagem matemática de erros, barra de furos.

Abstract

Since the introduction of coordinate measuring machines by Ferranti in late fifties, the CMM design and manufacturing technology have enormously developed. Nevertheless, it is stile impossible to produce mechanical devices that are exempted from errors.

In order to ensure measurements accuracy, it becomes necessary to understand such errors and establish compensation routines.

The errors survey of any piece of equipment is performed by means of calibration procedures.

However, due to the complexity of CMMs, there are not, until the present time, procedures that are internationally accepted by uses and manufactures to evaluate the metrological performance of this sort of equipment. Current standardized techniques, for instance, JIS B 7440 from 1987, B89.4.1. from 1997, VDI/VDE 2617 from 1986, among others, propose performance tests that usually overestimate CMM errors. Furthermore, they obstruct traceability to whatever measurement condition that is different from the ones used to perform the test.

This being the case, the aim of this work comprises the presentation of the new error sinthetization model. This model deals with sinthetization equations for Ex, Ey and Ez that are reduced if compared to other known models, requires short calibration periods, reducing its expenses, allow the determination of the sources of errors and ensures traceability of calculated errors.

Keywords: Three Coordinate Measuring Machines; calibration; Error mathematical modelling; hole bar.

Capítulo 1

Introdução

Os processos produtivos evoluíram muito chegando a realidade do ano 2001 com uma economia de escala cada vez mais globalizada. Este ambiente, onde os processos de fabricação mais curtos, rápidos e de melhor qualidade, obriga as empresas a serem cada vez mais competitivas sob pena de sucumbir à concorrência.

Diante desta perspectiva, o controle de qualidade dimensional é uma das atividades que devem ser integradas ao processo produtivo para garantir o sucesso da implementação de sistemas avançados de manufatura. Entretanto, devido à necessidade cada vez maior de alta produtividade, o controle dimensional que utiliza diferentes instrumentos, cada qual destinado a aplicações específicas, torna-se muitas vezes caro e demorado. Surge, então, a necessidade de sistemas de medição flexíveis, rápidos e confiáveis para a execução do controle dimensional não onerando por demais o produto e o processo produtivo. Assim, as Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) aparecem como candidatas em potencial para as operações integradas aos sistemas de manufatura.

Desde a sua criação por Ferranti, cerca de 50 anos atrás, as tecnologias de projeto e de fabricação evoluíram muito. Entretanto, ainda é impossível fabricar equipamentos livres de erros. Para garantir a acuracidade das

medições realizadas é necessário que se conheça tais erros e que rotinas de compensação sejam implementadas.

O levantamento dos erros de qualquer equipamento é feito através de procedimentos de calibração. É importante que, o procedimento de calibração simule de forma fidedigna as condições normais de trabalho deste equipamento. Entretanto, devido à complexidade das MM3Cs, ainda não existem procedimentos internacionalmente aceitos, por usuários e fabricantes, para avaliar o desempenho metrológico desses equipamentos. Técnicas normalizadas existentes, a exemplo, JIS B 7440 de 1987, B89.4.1. de 1997, VDI/VDE 2617 de 1986 entre outras, propõem testes de desempenho que na maioria das vezes superestimam os erros da MM3C. Além disso, dificultam a rastreabilidade para quaisquer condições de medição diferentes daquelas em que foi realizado o teste.

Outra forma, muito interessante, de prever os erros em MM3Cs é a utilização de modelos matemáticos denominados Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas que simulam o comportamento metrológico das máquinas reais. Entretanto, mesmo dentro dessa proposta há divergências quanto ao modelo matemático utilizado na sintetização dos erros bem como a forma de levantamento desses últimos.

Muito se têm discutido, nos últimos tempos, a respeito da elaboração de modelos matemáticos que permitam a obtenção do mapa de erros de MM3Cs através de um número menor de medições com a finalidade de diminuir o tempo necessário para esta atividade, sem que haja aumento na incerteza dos erros calculados. Entretanto, ainda, existem lacunas que devem ser preenchidas, quando o assunto é calibração de máquinas de medir a três coordenadas.

Assim, diante do exposto, este trabalho tem por objetivo principal apresentar um novo modelo de sintetização de erros para MM3Cs, o Modelo Reduzido de Sintetização de Erros. Este modelo permite calcular o erro de posicionamento, em qualquer direção X, Y ou Z, de qualquer ponto coordenado a partir de erros observados em 15 geratrizes convenientemente escolhidas. Além disso, possui equações de sintetização, para Ex, Ey e Ez, reduzidas, em comparação à outros modelos conhecidos, necessita de pequeno tempo na calibração o que reduz o custo desta atividade, possibilita o

diagnóstico das fontes de erros e garante a rastreabilidade dos erros calculados.

Além do modelo de sintetização, é objetivo secundário do trabalho levantar os erros utilizando um padrão que permita considerar o sistema de sondagem e a estratégia de medição. Assim, é apresentado um novo artefato, a barra de furos que tem por característica principal ser de baixo custo, facilidade na fabricação e calibração.

A medição de distâncias, pré calibradas, entre os centros dos furos da barra, juntamente com a medição de um esquadro mecânico, possibilita calcular as componentes do erro volumétrico E_x , E_Y e E_Z .

Os erros levantados, utilizando a barra de furos e o esquadro mecânico, combinados, através do novo modelo matemático, permitem que inferências a respeito das principais fontes de erros sejam possíveis, associando, assim, vantagens da calibração direta e da indireta .

O modelo matemático, bem como a técnica de calibração, foi aplicado a uma Máquina de Medir a Três Coordenadas, tipo Ponte Móvel, instalada no Laboratório de Metrologia, da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

Para um melhor entendimento, uma breve descrição dos capítulos do trabalho encontra-se na seqüência.

No capítulo 2, uma revisão bibliográfica sobre os erros em MM3Cs, os vetores que acentuam sua influência sobre as componentes nas direções X, Y e Z e os métodos para a calibração e técnicas de modelagem desses equipamentos, é apresentada.

No capítulo 3 são apresentados, o conceito de rastreabilidade e os critérios para a determinação da incerteza de medição. Estes últimos, estão de acordo com os requisitos propostos pelo "Guia para a Expressão das Incertezas de Medição (1999)".

No capítulo 4, é discutida a proposta do trabalho para a calibração da MM3C, bem como a metodologia para a análise dos resultados.

No capítulo 5, os experimentos são descritos detalhadamente, iniciando pela construção de um modelo de sintetização de erros seguida da descrição dos procedimentos experimental e de cálculo.

No capítulo 6 os resultados obtidos nos testes experimentais e a discussão a respeito deles serão apresentados.

As conclusões e as sugestões para trabalhos futuros estão apresentadas no capítulo 7.

Capítulo 2

Os Erros e a Calibração de Máquinas de Medir a Três Coordenadas

Apesar da evolução tecnológica que as áreas de projeto e de fabricação vêm experimentando nos últimos anos, não foi possível fabricar instrumentos de medição livres de erros. No caso de Máquinas de Medir a Três Coordenadas, o erro encontrado é influenciado por muitos fatores e pela interação entre seus efeitos. Tal erro altera a trajetória ideal da sonda de medição provocando o que se denomina de erro geométrico.

Através da calibração e do modelamento matemático das máquinas de medir a três coordenadas é possível representar o erro entre a ponta da sonda e o ponto de contato ideal na peça e, assim prever o comportamento final da MM3C.

Neste capítulo serão apresentados os principais erros que afetam as medições a três coordenadas bem como os vetores que potencializam sua influência sobre as componentes do erro volumétrico. Além disso, métodos de calibração e técnicas de modelagem matemática são discutidos.

2.1. Vetores que Potencializam a Influência dos Erros sobre as Componentes do Erro Volumétrico

Segundo a norma VDI/VDE 2617 (1986), os vetores que potencializam as influências dos erros, sobre as componentes do erro volumétrico, nas Máquinas de Medir por Coordenadas podem ser divididos em dois grupos: aqueles que dependem das condições de operação da máquina e os que não. A figura 2.1. resume esses vetores que são discutidos a seguir.

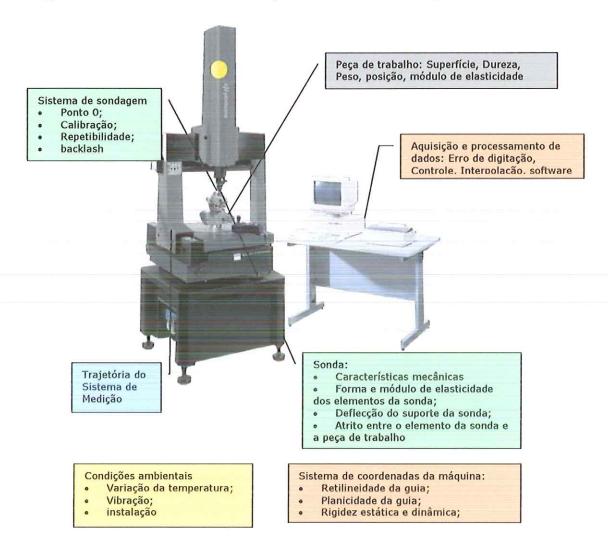


Figura 2.1.: Vetores que potencializam os erros individuais nas medições por coordenadas Fonte: VDI/VDE 2617 p.7 (1986)

2.1.1. VETORES QUE DEPENDEM DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA MM3Cs

Segundo a VDI/VDE 2617 parte I (1986), os fatores externos que mais potencializam o efeito dos erros individuais sobre o erro de posicionamento da ponta do apalpador são as condições ambientais e, em particular, a temperatura ambiente.

As normas BS 6808-Part 3 de 1989, VDI/VDE 2617 - Parte 1 de 1986 e a ASME B89.1.12M de 1990 mostram os efeitos das condições ambientais sobre o desempenho de MM3C e sugerem alguns testes para a sua verificação.

Entretanto, outros fatores como vibrações mecânicas, características da peça a ser medida, etc. também são abordados neste item.

Variação da temperatura

Como todo sistema de medição as MM3Cs são sensíveis às mudanças das condições ambientais do local onde estão.

De todos os fatores que afetam a repetibilidade das MM3Cs a temperatura tem um efeito mais dramático, isto porque a configuração do sistema de coordenadas muda como uma função da temperatura ambiente. Em particular, a orientação e a forma dos elementos da guia e das escalas podem mudar. A razão disto é que diferentes materiais respondem diferentemente às variações de temperatura.

A variação da temperatura é resultante de radiações térmicas causadas, dentre outros fatores, pela luz do sol, equipamentos vizinhos, etc, além das causadas pelo próprio operador. [VDI/VDE 2617(1986)].

Assim devido a grande influência da temperatura no resultado das medições, em 1931, foi estabelecida uma temperatura padrão para utilização de instrumentos de medição, 20º C.

Vibrações Mecânicas

Segundo a norma VDI/VDE 2617 (1986), a vibração é outro fator que influencia a acuracidade e a repetibilidade das MM3Cs e são transmitidas para a máquina pela fundação, pelo operador e pelo ambiente. Portanto, uma determinação precisa da intensidade das vibrações externas é uma parte

muito importante antes da instalação desses equipamentos quer sejam instalados no "chão de fábrica" quer sejam instalados em um laboratório com ambiente controlado.[MEREDITH(1997)]

Todos os fabricantes quantificam o valor máximo para a vibração a fim de que não afete a acuracidade e a repetibilidade desses equipamentos.

Suprimento de Energia Elétrica e Ar Comprimido

A alimentação de energia elétrica da MM3C deve ser realizada de forma contínua e uniforme. Desvios nos resultados das medições podem ser obtidos e a operacionalidade da MM3C pode ser prejudicada devido a quedas e picos de tensão e ruídos na rede elétrica. Assim a Norma ASME B89.1.12M (1990) prevê que o aterramento deve ser feito para aliviar as sobrecargas no sistema.

Quanto ao suprimento de ar comprimido, este deve ser feito a pressão constante. O ar que alimenta os mancais aerostáticos da máquina deve estar livre de partículas sólidas e de óleo além de, possuir temperatura constante e próxima a do local de operação. A finalidade é evitar o desgaste dos mancais e a indução de gradientes térmicos na máquina. [ASME B89.1.12M, 1990)

Acabamento da Peça de Trabalho

A forma e o acabamento superficial da peça a ser medida pode provocar desvios nas medições realizadas. Portanto, deve-se realizar uma inspeção visual da peça antes da realização da medição e, assim, o diâmetro da ponta da sonda pode ser definido de forma a minimizar a influência da aspereza. Outras fontes de erros são rebarbas, cantos danificados e o empenamento da peça devido a tensões originadas na fixação inconveniente e suporte impróprio durante o procedimento de medição.[CARDOZA (1995)].

Posição e Peso Próprio da Peça de Trabalho

Segundo BREYER (1989), a forma e a posição de uma peça a ser medida sobre o desempeno da MM3C provocam deformações, na estrutura da máquina, que dependem do tipo e do tamanho da máquina. Estas deformações alteram as coordenadas medidas.

A posição da peça deve ser tal que seu peso seja uniformemente distribuído evitando concentração de esforços e consequente distorção elástica da estrutura.

Em MM3Cs mais modernas desvincula-se à parte da máquina responsável pelo carregamento da parte utilizada na geração de coordenadas. Este sistema convencionou-se chamar de "Metrological Frame".

Outros

Outros vetores que podem ser citados que influenciam o resultado das medições por coordenadas são umidade do ar e pressão atmosférica. O primeiro deve ser controlado em nível baixos em função, principalmente, dos componentes eletrônicos das MM3C pois, provocam mal funcionamento da máquina. O segundo pode influenciar máquinas que utilizam sistemas interferométricos.

2.1.2. VETORES QUE DEPENDEM DOS COMPONENTES DAS MM3Cs

Existem vetores de erros que dependem dos componentes das MM3Cs e que o seu conhecimento pode propiciar a correção e a melhoria no projeto desses equipamentos.

Princípio de Abbè

O Princípio de Abbè foi publicado pela primeira vez no Journal for Instrumental Information Vol. X em 1890. Também conhecido como o primeiro princípio de projeto de máquinas ferramentas e metrologia dimensional, afirma que a linha de referência de um sistema de medição deve ser coincidente com a linha de medição da peça. A figura 2.2 mostra dois instrumentos de medição simples utilizados freqüentemente, o paquímetro e o micrômetro. [BRYAN (1979)]

Pode-se observar que no micrômetro o eixo do instrumento é coincidente com o eixo de medição, seguindo o Princípio de Abbè. Entretanto, no caso do paquímetro existe uma distância, chamada de braço de Abbè entre o eixo do instrumento e o eixo de medição.

Segundo ANTHONY (1986), o erro provocado pelo braço de Abbè devese ao fato de que as partes não se movem paralelamente uma em relação à outra formando um ângulo entre elas. Esse ângulo multiplicado pelo braço de Abbè fornece o valor do erro no resultado da medição. Portanto, quanto menor for o braço de Abbè maior a acuracidade das medições realizadas pelo instrumento.

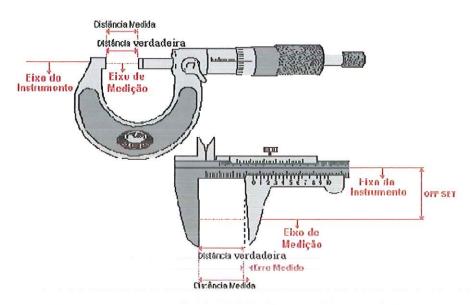


Figura 2.2.: Ilustração do Princípio de Abbè.

Como em muitas situações não é possível o projeto de máquinas ferramentas e instrumentos de medição seguindo o Princípio de Abbè, BRYAN (1979), reavaliou o Princípio de Abbè para essas situações.

Segundo o autor, caso a colinearidade não seja possível, as guias transferirão aos pontos de medição deslocamentos devido a possíveis movimentos angulares. E, a eliminação dos deslocamentos deve ser realizada através de duas ações distintas:

- a primeira pode ser realizada através da utilização de guias sem movimento angular, eliminando as causas dos deslocamentos. Como não é possível o projeto de guias livres de movimento angular dois sistemas de medição em paralelo podem ser utilizados;
- a segunda, faz-se pelo levantamento dos erros e correção das leituras.

Sistema de Sondagem

Segundo ANANDA (1992), as sondas de medição são os elementos responsáveis pela definição do ponto a ser medido e podem ser classificadas, dependendo do tipo de obtenção dos pontos, em sondas de contado (exemplo, " Sonda Rígida " e " Sonda de Gatilhamento ") e sondas sem contato (exemplo, sonda tipo " Laser " e sonda tipo " Sistema de Visão"). A figura 2.3a. mostra uma sonda por contato e a figura 2.3.b. uma sonda sem contato.

Estes sensores têm como função produzir um circuito elétrico sempre que os pontos de medição sejam atingidos. Este sinal "congela" as coordenadas do ponto para que o microcomputador tenha acesso aos dados. [(CARDOZA (1995)].

Para HARVIE (1986), problemas eletrônicos, deformações elásticas, desgaste dos apoios cinemáticos, variação da força devido a direções de contato, entre outros fatores podem alterar as coordenadas do ponto medido influenciando a acuracidade e a repetibilidade do sistema como um todo.



Figura 2.3a: Sonda por contato



Figura 2.3b: Sonda sem contato

Desempeno de Referência

Segundo PAHK & BURDEKIN (1991), todas as MM3Cs são equipadas de um desempeno para o posicionamento das peças a serem medidas. Tal desempeno serve como referência para as medições e é feito de granito natural, sintético ou ferro fundido, devendo apresentar elevada rigidez de modo a minimizar a deformação elástica devido ao peso das peças.

O desempeno, para servir como referência para as medições, deve possuir erros de planicidade insignificantes. Entretanto, a contribuição do erro de planicidade para o erro de medição é função, também, da forma geométrica, da área de contato entre a peça e o desempeno, além da posição que a mesma ocupa durante a medição sobre o desempeno.

Forma das Guias

Os erros de forma das guias (retilineidade, planicidade, circularidade, cilindricidade, concentricidade, paralelismo, perpendicularidade, etc) ocorrem durante o seu processo de fabricação. Estes erros transferem movimentos indesejáveis aos carros quando se movimentam nas direções X, Y e Z.

Peso Próprio da MM3C

Este tipo de erro ocorre em todas as máquinas, porém a sua grandeza depende essencialmente do projeto da estrutura e sua rigidez.

A configuração das MM3Cs permite que os eixos possuam movimento. Esse movimento provoca variação dos esforços, provocados pelo peso da máquina, provocando deformações na estrutura da MM3C. Tais deformações são bastante significativas.

Integridade dos Programas Computacionais

Muito se tem estudado sobre a integridade dos programas computacionais das MM3Cs devido a sua importância na obtenção e armazenamento dos valores obtidos nas medições.

Segundo WECKENMANN & HEINRICHOWSKI (1985), desvios causados pelo método de cálculo dos programas computacionais podem ser resultado de aproximações, pelos resíduos de um procedimento interativo ou ainda devido à execução de somente uma parte das tarefas.

Esses vetores, individualmente ou combinados, potencializam o efeito dos erros individuais sobre o posicionamento, nas direções X, Y e Z, da ponta do sensor.

2.2. Tipos de Erros em Máquinas de Medir a Três Coordenadas

Os movimentos indesejáveis nas direções preferenciais, X, Y, Z são denominados de erros geométricos. Os erros geométricos podem ser classificados em dois grupos, os paramétricos e os não paramétricos. Do total de 21 erros geométricos de uma MM3C, 18 paramétricos e 3 não paramétricos.

Os erros paramétricos abrangem todos os erros individuais a cada componente móvel da MM3C. Para cada movimento de translação podem ser associados seis erros geométricos devido aos seis graus de liberdade. Como a MM3C possui 3 eixos de translação um total de 18 erros pode ser esperado, seis erros para cada eixo;

O grupo dos erros não paramétricos abrange todos os erros que se dão pela relação entre os componentes.

A combinação destes erros no volume de trabalho das máquinas gera o chamado erro volumétrico ($\dot{E_t}$):

$$E_t = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \tag{2.1}$$

onde Ex, Ey e Ez são as componentes do erro volumétrico

2.2.1. ERROS GEOMÉTRICOS EM UMA MM3C TIPO PONTE MÓVEL

A figura 2.4. mostra uma MM3C tipo ponte móvel e seus componentes principais.

Tomando-se um elemento do eixo X quando este se desloca na direção preferencial X tem-se que:

A. Erros de Rotação ou angulares

Os erros angulares ou erros de rotação, "yaw", "pitch" e "roll", são denominados conforme a direção do movimento do elemento,

independentemente dos eixos adotados. [DONMEZ et alli (1986), HOCKEN (1980)].

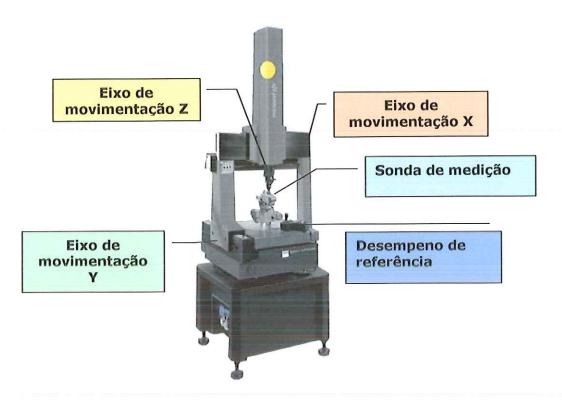


Figura 2.4. Máquina de Medir a Três Coordenadas tipo Ponte Móvel e seus principais componentes

Adotando um sistema de referência, a direção positiva dos vetores unitários \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} , associados às direções X, Y e Z, respectivamente, é dada pela Regra da Mão Direita. Posicionando o vetor unitário \vec{i} na direção de movimento pode-se dizer que:

- Rotação em torno de i é denominada de Roll;
- Rotação em torno de j é denominada de Pitch;
- Rotação em torno de k é denominada de Yaw;

A figura 2.5. ilustra as rotações que ocorrem no elemento durante o movimento.

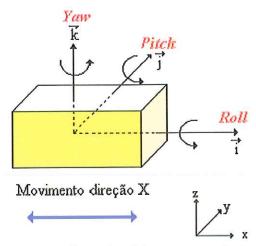


Figura 2.5. Rotações devido ao movimento do carro "X"

B. Erros de Translação

Além dos três movimentos de rotação o carro executa dois movimentos de translação nas direções que não a preferencial denominados erros de retilineidade. Além deles, o carro executa um movimento na direção preferencial denominado erro de posição propriamente dito ou erro de escala.

A figura 2.6 ilustra os movimentos de translação.

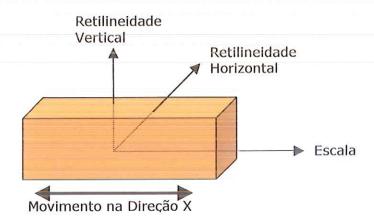


Figura 2.6. Translações devido ao movimento do carro em X

Os erros das máquinas de medir a três coordenadas também podem ser classificados em aleatórios, sistemáticos e histeréticos dependendo do seu comportamento. As definições de cada um podem ser observadas a seguir.

A parcela do erro aleatório, considerando uma distribuição normal, é o valor igual a seis vezes o desvio padrão e, é obtido através de dados de erros

medidos para cada posição de calibração. Este tipo de erro tem origem em fontes como: operador, variações de temperatura, estratégia de medição, etc...

O erro sistemático é o valor da média dos erros medidos em cada posição. Esta parcela é, dependendo da máquina, diferente para os dois sentidos de deslocamento. A parcela sistemática dos erros é a única previsível e assim a mais fácil para ser minimizada por quaisquer meios disponíveis.

Já a parcela histerética é a diferença entre os valores médios do erro nos sentidos de ida e volta para cada posição de medição.

2.3. Calibração de Máquinas de Medir a Três Coordenadas

Segundo CARDOZA (1995), a calibração de Máquinas de Medir a Três Coordenadas torna-se importante à medida que é através dela que o comportamento metrológico da máquina é levantado, garantindo, assim, a confiabilidade das medidas realizadas. É através dos testes de calibração que a expedição ou aceitação da máquina deve ser feita e que os erros são levantados. Os procedimentos de calibração podem ser classificados em: diretos e indiretos.

A calibração indireta tem como característica principal a avaliação dos erros da máquina utilizando-se peças padrões pré-qualificadas e normalizadas. Tais métodos são de especial interesse para os usuários, uma vez que, oferecem como resultado direto, a capacidade da máquina na execução de determinados serviços.

Segundo KNAPP ET ALLI (1991), nos últimos anos diversas organizações internacionais de normalização, institutos de pesquisa, universidades e empresas particulares têm desenvolvido diferentes técnicas de calibração, baseadas em padrões corporificados tais como blocos padrões, anéis padrões, etc, a fim de utilizá-las em testes de aceitação e verificação periódica da incerteza das MM3Cs.

Já os métodos de calibração direta são aqueles onde os erros de translação e de rotação são observados diretamente na máquina avaliada, sem a utilização de artefatos mecânicos. Tais métodos são os mais comuns no meio científico e junto aos fabricantes. É muito importante para os pesquisadores que trabalham com compensação de erros, e fundamental para os fabricantes de MM3Cs que, a partir do conhecimento das fontes de erros, podem propor melhorias ao projeto, aos processos de fabricação e às montagens dessas máquinas.

2.3.1. OS ARTEFATOS E A CALIBRAÇÃO DE MM3Cs

Através dos anos diferentes padrões para calibração de MM3Cs foram sugeridos e colocados em uso, podendo ser classificados em função do número de coordenadas espaciais associadas às suas características calibradas como uni, bi e tridimensionais. [PIRATELLI FILHO (1998)].

Durante muito tempo a medição de artefatos unidimensionais, como blocos padrões, foi utilizada como método prático para verificar o desempenho de MM3Cs. Entretanto, já nos anos oitenta houve a expansão do uso de padrões Passo-a-Passo e das Barras de Esferas, sendo que estas últimas tornaram-se um dos artefatos mais populares quando se trata de verificação de erros em Máquinas de Medir a Três Coordenadas. Tanto que, em 1982 outras variantes de Barras de Esferas foram propostas utilizando suportes magnéticos: a Barra de Esferas Magnética Fixa e Barra de Esferas Magnética Telescópica. Estas versões diminuem o tempo de verificação das máquinas. (BRYAN, 1982)

Apesar do sucesso inicial das Barras de Esferas Magnéticas, hoje são menos utilizadas devido à limitações impostas por algumas de suas características. O desenho de barras de esferas mais difundido e usado atualmente é o sistema de Barras de Esferas "Livres" que pode ser utilizado com qualquer tipo de sistema de sondagem (PHILLIPS et alli, 1993).

Uma outra variante de Barras de Esferas possui um Interferômetro Laser que monitora a distância entre os centros das esferas. Seus criadores afirmam que com ajuda do artefato podem-se obter os erros de posição para todo o volume de trabalho de forma muito rápida. Além disso, estas barras permitem a determinação dos erros geométricos.(ZIEGERTH & MIZE, 1994).

Atualmente, uma grande tendência na avaliação do desempenho e determinação dos erros geométricos de MM3Cs é o uso de padrões bidimensionais como o padrão placa de esferas e placa de furos. Porém, o elevado custo de construção e calibração e a duração dos ensaios são aspectos negativos do uso desses artefatos e, que estimulam usuários de MM3Cs a continuar utilizando barras de esferas e padrões passo-a-passo. As mesmas restrições ao uso podem ser atribuídas aos padrões tridimensionais como os padrões volumétricos tetraédricos. (PEGGS,1990)

Resumindo, os artefatos utilizados na avaliação do desempenho de MM3Cs possuem as mais diversas formas, desde as mais simples como, blocos e barras padrões, até estruturas volumétricas complicadas construídas a base de múltiplas barras e esferas. Todos esses artefatos foram criados devido ao interesse de pesquisadores e fabricantes em desenvolver um sistema eficaz e de baixo custo para a calibração de MM3Cs.

Os artefatos propostos, utilizados na calibração de MM3C, são totalmente diferentes com respeito a:

- Capacidade de detectar erros da geometria e do sistema de medição da MM3C;
- Capacidade de detectar o erro da sonda de medição;
- método e a facilidade da calibração, a acuracidade e a determinação da incerteza do artefato;
- Dimensões e graduações disponíveis;
- Manuseio e aspectos práticos;
- Disponibilidade e preço;
- Tempo experimental;
- Influência às mudanças das condições experimentais, especialmente temperatura.

Assim, pode-se dizer que ainda existe a necessidade de pesquisas que envolvam o desenvolvimento de artefatos para calibração de MM3Cs e que permitam a realização desta atividade com baixo custo, em curto espaço de tempo, facilidade de obtenção dos erros geométricos além de considerar aspectos fundamentais como influência dos sistemas de sondagem e

compensação e a estratégia de medição, a fim de que esta atividade seja cada vez mais acessível para os usuários desses equipamentos.

A seguir são apresentados os padrões mais utilizados:

BARRA DE ESFERAS

A barra de esferas é um dispositivo que consiste em uma barra rígida com esferas de precisão em cada uma de suas extremidades. O procedimento de calibração consiste em posicionar e orientar as barras, previamente calibradas, em posições do volume de trabalho e em seguida determinar a distância entre os centros das esferas. O teste é executado medindo-se repetidas vezes as barras em várias posições do volume de trabalho, permitindo o cálculo da repetibilidade e da acuracidade da máquina nas diversas posições do volume de trabalho.

Variações deste artefato podem ser encontradas na literatura como:

- A barra de esferas laser, proposta por ZIEGERT & MIZE (1994), que consiste de um interferômetro laser alinhado com uma barra de bolas telescópica.
- Barras de esferas com fixação magnética construídas pelo Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) e descrito por KUNZMANN & WALDELE (1983), onde as esferas permanecem fixas em soquetes magnéticos, sendo que uma das esferas deve ser posicionada sobre o desempeno e a outra deve ser fixada ao lado da sonda;

CÍRCULO PADRÃO

Este padrão é a corporificação da forma geométrica circular, que pode ser um disco circular, um padrão de esferas, um anel padrão ou um padrão de círculos [KNAPP et alli (1991)].

A determinação dos erros geométricos é feita a partir da verificação da distribuição dos pontos medidos, comparados com a geometria ideal do padrão. Desvios em relação ao perfil de um círculo ideal indicam os valores dos erros.[KNAPP et alli (1991) apud PIRATELLI FILHO (1998)].

PADRÃO PASSO A PASSO

Este padrão consiste em um conjunto de blocos padrões dispostos linearmente sobre uma guia que os mantém alinhados numa dada direção. A posição de cada um deles determina uma distância padrão.

A calibração de MM3Cs utilizando padrões passo a passo possibilita estimar os erros de posicionamento e os erros angulares de cada eixo quando alinhados com os eixos X, Y e Z. Já, quando alinhado às diagonais dos planos formados pelos eixos XY, XZ e YZ possibilita estimar os erros de retilineidade e perpendicularismo. [KNAPP et allili (1991)].

PADRÃO TETRAÉDRICO

O padrão é uma montagem tridimencional de barras de esferas de grande estabilidade dimensional e que permitem ser calibrados com instrumentação de medição linear. Este fato proporciona o conhecimento das distâncias entre os centros das esferas com grande precisão, tornando o tetraedro perfeitamente conhecido dimensionalmente.

PLACA DE ESFERAS

A placa de esferas é uma montagem de um conjunto de esferas em uma placa metálica. O grande limitante ao uso das placas de esferas é o custo elevado de construção e de calibração. [PIRATELLI FILHO (1998)].

Este método baseia-se na medida das distâncias entre os centros de esferas pré-calibradas, fixas em uma placa em posições arranjadas simetricamente. O padrão é posicionado no volume de trabalho da MM3C é a medição entre os centros das esferas é realizada. Em seguida reposiciona-se o padrão e uma nova seqüência de medidas é realizada.

A placa quando alinhada na direção dos eixos permite a obtenção dos erros de posicionamento. Os erros de retilineidade e perpendicularismo são obtidos realizando medições com a placa inclinada de 45 graus com relação aos eixos. Os erros angulares Yaw e Pitch podem ser obtidos medindo-se a placa em diferentes braços de Abbè. O erro angular Roll é obtido a partir da

medição para retilineidade em diferentes braços de Abbè.

PLACA DE FUROS

Este método, análogo ao anterior, consiste em um conjunto de círculos padrões arranjados simetricamente sobre uma base. As distâncias entre os centros dos círculos são pré-calibradas e, posiciona-se o padrão no volume de trabalho da MM3C medindo-se as posições relativas dos centros dos círculos. Em seguida, reposiciona-se o padrão e outras medidas são realizadas. As variações observadas nas medições dessas distâncias são tomadas como erro.

LIM et alli (1989) propôs uma variante para este padrão utilizando um padrão bidimencional além de uma esfera. A placa possui furos cônicos alinhados a dois eixos perpendiculares entre si. Uma esfera padrão deve ser perfeitamente encaixada nos furos cônicos. Através deste artefato pode-se determinar erros de posição, retilineidade e perpendicularismo com relativa facilidade. A figura 2.7 apresenta os artefatos mencionados anteriormente.

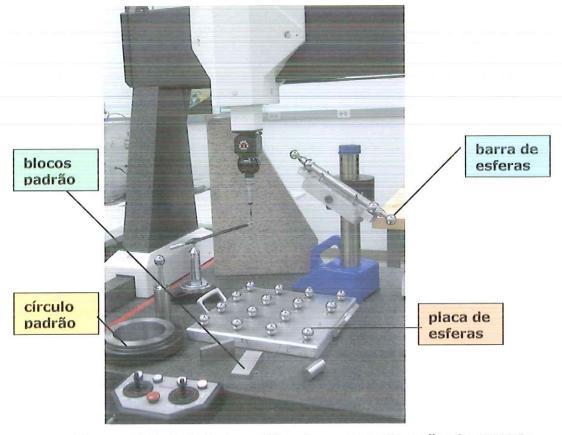


Figura 2.7. Artefatos utilizados na Calibração de MM3Cs

2.3.2. AS TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO DE MM3Cs

Quando da calibração de uma MM3C pode-se, então, optar entre o método direto ou o indireto. Em ambos os métodos, é possível optar por medir as componentes do erro volumétrico ou os erros geométricos individuais dependendo da técnica escolhida. Estas técnicas podem ser separadas, basicamente, em dois tipos: a técnica do volume dividido e a paramétrica .

TÉCNICA DO VOLUME DIVIDIDO

Nesta técnica, geratrizes de planos paralelos dentro do volume de trabalho são identificadas e os erros de posição do eixo de interesse são levantados. O procedimento de calibração é repetido para todas as geratrizes formando uma grade de erros.

O maior problema dessa técnica é o tempo gasto para completar os ensaios o que aumenta os seus custos e a torna sensível a incertezas devido a variações nas condições ambientais que ocorrem durante o período dos ensaios.(figura 2.8).

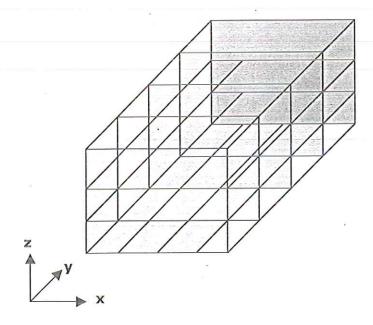


Figura 2.8.: Técnica do Volume Dividido

A instrumentação para a técnica do volume divido é a utilizada para a medição de erros de posição como, por exemplo, a citada na tabela 2.1.

TÉCNICAS DE SINTETIZAÇÃO

Nesta técnica cada erro geométrico deve ser obtido separadamente, em cada uma das direções e posteriormente combinados a partir de equações de sintetização devidamente desenvolvidas para cada máquina. Para isso instrumentação adequada deve ser escolhida para a calibração.

A tabela 2.1. apresenta os principais equipamentos utilizados na calibração dos 21 erros paramétricos e não paramétricos.

Erros	Equipamentos e Metodologia de Medição
Posição	Interferômetro laser, barra padrão de passo, bloco padrão, etc
	Interferômetro de retilineidade, régua, telescópio de alinhamento,
Retilineidade	laser de alinhamento
	Interferômetro diferencial, nível eletrônico, autocolimador, medidas
Pitch e yaw	de erros de posição ao longo de retas com diferentes Abbé offset
B at the proper	Níveis eletrônicos (somente para eixos horizontais), plano de
Roll	referência, medidas de erros de retilineidade de duas linhas paralelas
	Instrumento óptico de medida de retilineidade e penta prisma,
Perpendicularismo	padrões mecânicos de ortogonalidade, padrões de comprimento
	inclinados sobre ângulos definidos
Sonda	Esfera de referência, anel de referência, bloco padrão

Tabela 2.1.: Instrumentação para medir erros em MM3Cs

2.4. Modelagem de Máquinas de Medir a Três Coordenadas

Muito se tem estudado a respeito da modelagem de Máquinas de Medir a Três Coordenadas como forma de melhorar a acuracidade desses equipamentos.

Vários pesquisadores têm desenvolvido modelos para representar erros em equipamentos utilizando diversas técnicas como: transformações homogêneas, redes neurais, análise estatística, análise vetorial e geométrica.

Os trabalhos de FRENCH & HUMPHRIES (1967) e LOVE & SCARR (1973), utilizaram relações trigonométricas para obter as expressões dos erros geométricos.

HOCKEN et alli (1977), utilizaram matrizes de transformação para modelar erros angulares das máquinas de medir por coordenadas.

No método da matriz-erro apresentado por DUFOUR & GROPPETTI (1981)¹, as componentes do vetor erro para diferentes localizações no espaço de trabalho da máquina são armazenados considerando diferentes carregamentos e variações térmicas. As correções são obtidas da interpolação entre os vetores de erros armazenados. Os autores também sugeriram diferentes formas para incorporar as correções no circuito de controle, desde que o vetor erro seja conhecido.

ZHANG et alli (1985) utilizaram uma análise vetorial para descrição dos erros de uma máquina de medir a três coordenadas tipo ponte móvel. O modelo fundamenta-se na cinemática do corpo rígido e foi projetado para compensar os erros geométricos e os efeitos da expansão térmica das escalas.

No sistema de compensação de erros foi adicionada uma correção devido a expansão térmica das escalas utilizando o coeficiente de dilatação térmica do material e as temperaturas medidas através de termopares.

DONMEZ et alli (1986), propuseram uma metodologia geral para melhorar a acuracidade de máquinas ferramentas prevendo e compensando os erros geométricos e erros térmicos do equipamento. Os autores utilizaram a técnica de transformações homogêneas para descrever a posição e orientação de um objeto com relação a diferentes sistemas de coordenadas. A metodologia envolveu a generalização do modelo matemático baseado nos princípios da cinemática do corpo rígido. Este modelo foi usado para calcular o erro de posicionamento da ferramenta de corte com relação a peça de um grande número de componentes do erro. Para validar a metodologia um exemplo utilizando um centro de usinagem foi apresentado.

DI GIACOMO (1986), utilizou-se das técnicas de análise geométrica para determinar os erros geométricos individuais para uma máquina de medir por coordenadas Ferranti Conquest MKII para compor o erro geométrico resultante em cada direção (X, Y, Z).

¹ Ver FERREIRA & LIU (1993)

DUFFIE & MALMBERG (1987), apresentaram um método para diagnóstico e compensação de erros usando modelos cinemáticos. A abordagem desenvolvida pelos autores é genérica e pode ser aplicada a máquinas ferramentas, máquinas de medir por coordenadas, robôs, etc.

Segundo os autores os coeficientes da função de erros podem ser obtidos através de medidas de posição. Isto pode ser feito relacionando o modelo cinemático do mecanismo com medidas de posição. A estrutura do mecanismo é inicialmente analisada para o modelo cinemático ser desenvolvido. Em seguida, o modelo é ajustado para a utilização dos dados de posição através de técnicas de ajuste não lineares. Os coeficientes do modelo são, então, analisados e um diagnóstico das maiores fontes de erros do mecanismo é realizada. Os resultados, então, podem ser utilizados para a correção dos erros.

As maiores vantagens, mencionadas pelos autores, para o método são: rapidez, baixo custo no diagnóstico e correção dos principais erros pois o mecanismo não necessita interromper a operação, as maiores fontes de erros podem ser identificadas possibilitando a correção. Esta abordagem foi também utilizada por DUFFIE & YANG (1985) e FERREIRA & LIU (1980).

Segundo RESHETOV E PORTMAN (1988), uma técnica comum de modelamento das MM3Cs segue de Denavit-Hartenberg em 1955.

Este modelo utiliza matrizes de transformação 4x4 para descrever o movimento de um corpo através de sistemas de coordenadas, fixados sobre articulações da máquina. O posicionamento nominal do mecanismo, assumindo que todas as articulações tenham comportamento ideal, é determinado pelo produto das transformações individuais de cada uma delas.

Assumindo, também, que os erros são suficientemente pequenos e os termos de ordens elevadas podem ser ignorados, a matriz de transformação homogênea real para uma articulação é:

$$\delta A = \begin{vmatrix} 1 & -\gamma & \beta & \Delta x \\ \gamma & 1 & -\alpha & \Delta y \\ -\beta & \gamma & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

onde

 α = rotação em torno do eixo x; β = rotação em torno do eixo y; γ = rotação em torno do eixo z; Δx = translação na direção x; Δy = translação na direção y; Δz = translação na direção z.

Geralmente esses valores não são constantes e sim uma função da posição ao longo do eixo. Portanto, o posicionamento de uma máquina tomando os erros de movimentação de cada articulação individual é dado por:

$$\vec{r}_{sonda,0} = \left(\prod_{i=1}^{n} \left[A^{i} \right] \delta A_{i} \right) \vec{r}_{sonda,n}$$

onde

 $ec{r}_{sonda,0}$ é o vetor para a ponta da sonda de medição com relação ao sistema de referência;

 $ec{r}_{sonda,n}$ é o vetor da ponta da sonda de medição com respeito ao sistema final da cadeia.

Esse modelo tem obtido sucesso para a compensação de erros de robôs, máquinas ferramentas e máquinas de medir por coordenadas.

ZIEGERT, OLSON, DATSERIS (1992), propuseram uma forma de modelagem para máquinas ferramentas utilizando coordenadas de fuso. As vantagens da utilização das coordenadas de fuso citadas pelos autores são:

- os erros de Abbè tornam-se independentes da posição da escala da máquina permitindo que as medições sejam realizadas em qualquer ponto. Isto facilita o processo de medição pois permite que as componentes dos erros de retilineidade e de posição sejam medidos independentemente da escala de medição;
- a expressão resultante é extremamente compacta e tem a vantagem de mostrar diretamente os eixos no espaço sobre o qual os erros de rotação são tomados;
- é uma abordagem alternativa ao modelo cinemático e tem sido utilizada por DUFFY (1980), HUNT (1986), PAYADEH & GOLDBERG (1987) e outros.

Pode-se dizer que essa abordagem exige um tempo relativamente grande para a modelagem do equipamento. A vantagem frente a utilização de transformações homogêneas apresentada pelos autores é diminuir os erros provocados na medição dos erros de retilineidade e posição devido à dificuldade em realizar medições em pontos coincidentes com os sistemas de referência torna-se irrelevante.

FERREIRA & LIU (1993), desenvolveram um método para modelar os erros quase estáticos para máquinas ferramentas. Segundo os autores os

erros quase estáticos² são responsáveis por 70% dos erros atribuídos às máquinas ferramentas.

O modelo apresentado expressa o erro tridimensional observado no volume de trabalho como uma função dos erros dos componentes da máquina.

Segundo os autores o método tem os seguintes aspectos interessantes:

- modela a retilineidade como uma função da variação dos erros angulares;
- os coeficientes do modelo podem ser obtidos da observação dos componentes do vetor erro através de poucos pontos no volume de trabalho da máquina;
- os coeficientes do modelo s\u00e3o associados com regi\u00f3es localizadas sobre a m\u00e1quina podendo, assim, ser modelados como fun\u00f3\u00f3es do estado t\u00e9rmico e das caracter\u00edsticas da regi\u00e3o onde se encontram.

Com relação à última afirmação pode-se observar que no modelo apresentado os coeficientes não estão escritos como funções dos estados térmicos da máquina e sim somente em função das medições de posição da máquina. O fato de que as medidas de posição dependerem do estado térmico da máquina não conduz à justificativa da afirmação.

SOONS, THEUWS & SCHELLEKENS (1992), apresentaram uma metodologia para obter um modelo generalizado para erros em uma máquina multi - eixos de configuração arbitrária. O modelo avalia os erros geométricos, dinâmicos e térmicos na posição relativa entre a ferramenta e a peça.

A metodologia apresentada é composta de dois modelos intermediários: o modelo geral e o modelo que depende do tipo do equipamento. O modelo geral mostra os erros entre o posicionamento da ferramenta e da peça de trabalho através de sistema de coordenadas colocados em sucessivos componentes da máquina. O segundo modelo considera as características estruturais e térmicas do equipamento.

Os autores utilizaram, então, funções polinomiais obtidas da combinação dos dois modelos e o modelo final foi obtido através da seleção dos parâmetros significantes pelo procedimento dos mínimos quadrados.

² Erros quase estáticos são aqueles que causam desvios na posição relativa entre a ferramenta e a peça que variam lentamente com o tempo e que estão relacionados com a estrutura da máquina. São exemplos: erros devido a carregamentos, erros termicamente induzidos.

Na validação da metodologia os autores utilizaram uma máquina de medir a três coordenadas e uma fresadora de cinco eixos.

Cabe ressaltar, apesar da importância da construção de modelos individuais mencionada pelos autores, a abordagem proposta para modelagem de máquinas multi-eixos exige um grande esforço computacional que na execução de qualquer modelo matemático é uma variável importante a ser considerada devido aos custos que ela cria.

Segundo WECK (1984), testes de performance podem ser realizados para determinar a acuracidade de máquinas ferramentas utilizando-se uma amostra de peças similares. Com a aplicação de técnicas de análise estatística é possível separar erros sistemáticos de erros aleatórios.

Ainda segundo o autor, geralmente não é possível identificar imediatamente as causas individuais da perda da acuracidade porque cada influência individual tem um efeito coletivo sobre a peça.

Entretanto utilizando-se técnicas de planejamento de experimentos é possível separar a influência individual de cada fator e das suas interações sobre a acuracidade da máquina.

Segundo CARDOZA (1995), através do tratamento estatístico das curvas de erro, o erro sistemático, a histerese e o erro aleatório podem ser obtidos.

Ainda segundo o autor, a formulação das equações dos erros para cada uma das direções preferenciais (ida e volta) conduz a resultados confiáveis quanto ao seu significado físico. Entretanto, quando o experimento consiste na observação de muitas variáveis físicas o estudo relação entre essas variáveis torna-se extremamente importante.

Segundo SRINIVASA & ZIEGERT (1995), os erros termicamente induzidos são os que mais influenciam a acuracidade de máquinas ferramentas. O grande obstáculo é o tempo gasto na construção do modelo. Os autores propuseram, então, utilizando um método direto para a calibração de uma máquina ferramenta, uma forma para modelar e prever os erros termicamente induzidos dessas máquinas.

Os autores utilizaram uma barra de esferas telescópica (BBT) como instrumento de calibração posicionada sobre os dois eixos de um centro de torneamento controlado por computador .

Os erros geométricos e "drifts" térmicos medidos foram medidos dentro de uma mesma montagem experimental utilizando a BBT. Estas medidas adotam um método sequencial de trilateração .

Uma rede neural com lógica Fussy ARTMAP foi usada para construir o modelo da máquina fazendo a correlação entre os erros medidos e os gradientes de temperatura de 14 pontos sobre a máquina. As entradas da rede foram as posições nominais da ferramenta e os gradientes de temperatura. As saídas são os erros de posição totais da máquina.

Pode-se observar que o método proposto pelos autores tem a vantagem de economizar tempo nas medições, diminuir o erro de alinhamento do laser nas medidas de retilineidade e o tempo do mesmo na realização das medições dos outros erros. Além disso, a utilização da técnica de trilateração facilita os cálculos dos erros. Quanto ao modelo utilizando redes neurais pode-se dizer que a principal desvantagem é que não se consegue determinar qual ou quais erros individuais são mais relevantes para o erro total o que torna difícil a intervenção para a melhoria.

CHEN & LING (1996), utilizaram redes neurais tipo "feed forward" com treinamento por retropropagação de erro (back propagation) para predizer os erros térmicos em um centro de usinagem vertical. As variáveis de entrada da rede são 15 medidas de temperatura e as variáveis de saída são os seis erros de posicionamento. Um sistema de compensação em tempo real foi desenvolvido para atualizar o CNC da máquina. Segundo os autores o sistema demonstrou ser capaz de prever os erros térmicos com uma precisão acima de 85% e, uma redução de 70 a 90% nos erros térmicos foi obtida depois da compensação.

TAJBAKHSH, et alli (1997), propõem um modelo de erros para máquinas ferramentas utilizando a norma Chebyshev. Os parâmetros do modelo são obtidos através de programação linear e o resultado do modelo de erros minimiza o máximo erro da máquina.

A melhor aproximação é determinada através de um modelo simples de programação linear e segundo os autores resultados experimentais mostram uma redução de 25% no erro em relação ao critério dos mínimos quadrados.

VIEIRA SATO (1998) apresentou uma formulação para o equacionamento de uma máquina ferramenta considerando as variações

térmicas atuantes utilizando matrizes de transformação homogênea para a modelagem da máquina e através de técnicas de regressão linear foram obtidas as componentes do erro planar em qualquer posição do plano de trabalho da máquina e estado de temperatura da mesma.

PIRATELLI FILHO (1998), apresentou um modelo para avaliação de desempenho de Máquinas de Medir a Três Coordenadas, baseado na medição de um artefato padrão calibrado. O modelo utiliza o planejamento de experimentos de avaliação e do emprego de um arranjo experimental proposto por Taguchi, os erros volumétricos de uma MM3C foram determinados e a relação entre as variáveis experimentais e o desempenho da máquina foram investigadas.

Em 1999, MARTINEZ ORREGO propôs uma simplificação da técnica do volume divido, o Volume Divido Parcial. Nesta técnica os erros de posicionamento são medidos paralelamente a 42 geratrizes dos planos XY, XZ e YZ, além da posterior correção das curvas. Além disso, as componentes do erro volumétrico de qualquer ponto (X, Y, Z) como uma combinação dos erros presentes em outros três pontos: dois pontos de projeção em planos ortogonais entre si e paralelos à direção analisada e um outro ponto pertencente à reta de intersecção desses pontos.

BARAKAT, ELBESTAWI & SPENCE (2000), utilizaram matrizes de transformação homogênea para obter um modelo de erros para Máquinas de Medir a Três Coordenadas. Diferentes abordagens foram aplicadas na avaliação dos coeficientes do modelo. A primeira utilizou um sistema interferométrico laser para medir os 21 erros geométricos. Na segunda um anel padrão foi medido em diferentes posições no volume de trabalho da MM3C. Os erros resultantes dessas medições foram usados em conjunto com técnicas estatísticas para determinar os coeficientes do modelo. Além disso, os autores propuseram uma estratégia de compensação para os erros obtidos.

ZHANG & FU (2000) utilizaram análise vetorial para obter um modelo de erros para MM3Cs e,uma placa de esferas foi utilizada na calibração da máquina. O modelo proposto pelos autores é simples, entretanto assume que um dos três eixos da máquina tenha sido calibrado com um interferômetro laser.

Capítulo 3

A Rastreabilidade das Medições a Três Coordenadas

A introdução de instrumentos de medição automática junto ao meio produtivo, em especial as Máquinas de Medir a Três Coordenadas, possibilitou a retirada, de grande parte da instrumentação convencional dos laboratórios de controle de qualidade das empresas dotando tal atividade de maior flexibilidade.

Entretanto, essa mesma flexibilidade, atribui a esses instrumentos características complexas e de difícil controle e principalmente de difícil avaliação. Esses novos problemas passaram a desafiar técnicos e pesquisadores, e dentre os mais importantes, podem ser destacados os problemas de calibração, pois, como todos os instrumentos de medição, as MM3Cs apresentam erros e, por isso, torna-se indispensável o levantamento destes erros, individualmente, e se possível, diagnosticar as suas fontes.

Apesar das MM3Cs já estarem sendo utilizadas a pelo menos três décadas, fabricantes e usuários ainda não dispõem de uma única norma de teste internacionalmente aceita que garanta medidas de desempenho justas e fidedignas ao real comportamento metrológico dessas máquinas.

Isto torna o desempenho das MM3Cs muitas vezes ambíguo, se não completamente desconhecido, impedindo a determinação da cadeia metrológica para fins de rastreabilidade desses equipamentos.

3.1. O Conceito de Rastreabilidade

A principal função da Máquina de Medir a Três Coordenadas, é levantar pontos cartesianos e permitir a avaliação de dimensões de peças manufaturadas.

Assim, torna-se necessário, que as empresas que utilizam tais equipamentos, assegurem que essas dimensões estejam conformes às especificações das tolerâncias de projeto, garantindo a funcionalidade e a intercambiabilidade dos seus produtos. É a chamada garantia da qualidade e, é através de um bom Sistema de Garantia da Qualidade que tais empresas tornam-se capazes de sobreviver em um mercado com características que o fazem depender intensamente da sua capacidade de produzir peças que possam ser intercambiáveis.

E, para garantir a confiabilidade das medições é necessário que se proceda uma calibração dos erros da Máquina de Medir e que esta seja rastreável aos padrões Nacionais e Internacionais.

Segundo SWYT (1995), no período que antecedeu os anos 90, rastreabilidade para os fabricantes no mercado americano resumia-se em apresentar os certificados de calibração dos seus instrumentos. Com a formação dos grandes blocos econômicos, com a globalização e com o advento de normas internacionais da qualidade iniciou-se a busca por conceitos mais modernos como forma de adequação aos requisitos dos sistemas de garantia da qualidade dos compradores. Tais conceitos necessários em todas as medições, estabelecem que:

 é necessário que se esteja apto a demonstrar a cadeia contínua de padrões pela qual a medição foi realizada; é necessário que a incerteza da medição com relação ao padrão
 Internacional seja sempre expressa.

Entretanto, devido a complexidade e a universalidade das Máquinas de Medir a Três Coordenadas, até o presente momento, a noção de rastreabilidade aplicada as medições tridimensionais, é um tanto quanto, insipiente e não se dispõe de procedimentos claros e práticos para os usuários.

Pode-se dizer, então, que, hoje, a rastreabilidade, é, simultaneamente, o mais discutível e o mais importante aspecto metrológico do uso adequado das Máquinas de Medir a Três Coordenadas.

3.1.1. DEFINIÇÃO DA CADEIA DE RASTREABILIDADE

As medições de peças manufaturadas em diferentes tipos de MM3Cs, podem estar relacionadas de formas diferentes a padrões internacionais de comprimento. A pirâmide que representa a cadeia física da rastreabilidade de medições realizadas em MM3Cs (figura 3.1) tem hoje na sua raiz o relógio atômico, que é internacionalmente aceito como meio para o estabelecimento do metro padrão e, cuja definição é: o comprimento do caminho percorrido pela luz no vácuo durante o intervalo de tempo de 1/299792458 de segundos. [SWYT (1995)].

A figura 3.1 descreve os caminhos para rastrear medições a três coordenadas até ao padrão internacional de comprimento, ou seja, o metro.

No topo da pirâmide está a freqüência do relógio atômico de césio com seu padrão de incerteza de 4 partes em 10^{14} . O comprimento de onda laser referente a freqüência do relógio atômico é a do laser HeNe iodo estabilizado e seu padrão de incerteza é de 2.5 partes em 10^{11} .

No segundo nível está o sistema de interferometria laser e seu padrão de incerteza está entre 0.7 e 1.5 partes em 10¹⁰. Neste nível, podem estar incluídos alguns interferômetros comerciais como o sistema Interferométrico HP. Segundo o NIST (2002), este é um dos poucos instrumentos que não necessitam de calibrações visando rastreabilidade, e pode ser tomado como padrão para calibração dos outros integrantes da rede. A afirmação tem por

base que o comprimento de onda da luz utilizada é obtido através do princípio físico de estabilização da radiação na cavidade Laser.

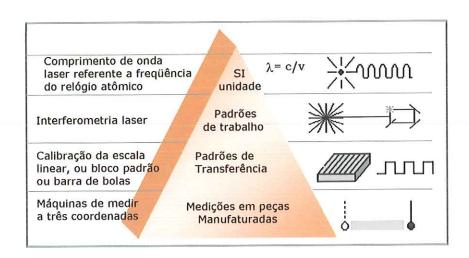


Figura 3.1: Caminhos para rastrear peças manufaturadas até o padrão internacional de comprimento

Em um terceiro nível, estão os instrumentos tradicionalmente conhecidos como Padrões de Transferência cuja incerteza de medição gira em torno de 1 parte em 10⁸, podendo atingir nos seus limites inferiores a incerteza de 1 parte em 10⁶. Este grupo é composto por Escalas de Precisão, Blocos Padrões e montagens de Blocos Padrões, Barras de Esferas, Placas de Esferas, etc. Neste nível as medições dizem respeito a :

- checar padrões tais como a distância entre a graduação do metro com padrão de incerteza de 2 a 5 partes em 10⁸; ou
- calibração de padrões de transferência como barra de esferas, blocos padrões e ou padrões que tem a incerteza da ordem de um micrometro por um metro ou 1 parte em 10⁶.

As Máquinas de Medir por Coordenadas completam o quarto nível ou na base da pirâmide.

A noção de rastreabilidade está vinculada a habilidade de realizar-se uma cadeia contínua de medições referenciadas a um padrão nacional ou internacional. Por isso, algumas cadeias alternativas de rastreabilidade podem ser executadas sem comprometer a pirâmide e a idéia fundamental.

A figura 3.2.mostra as cadeias alternativas de rastreabilidade.

Para qualquer das cadeias alternativas utilizadas, a incerteza a cada nível deverá ser definida e propagada convenientemente para propiciar a avaliação da incerteza final da medição.

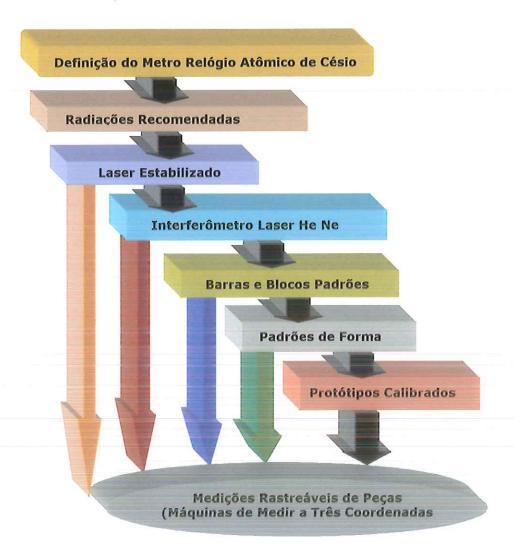


Figura 3.2: Cadeias Alternativas de Rastreabilidade de Dimensões de Peças Manufaturadas

Para estabelecer as cadeias de rastreabilidade e as incertezas de medição é necessário determinar como se dará a calibração do instrumento.

As duas atividades necessárias para a obtenção da rastreabilidade das medições serão abordados a seguir.

3.2. Escolha de um Método para a Calibração

O primeiro problema a ser resolvido e que, muitas vezes, dificulta o estabelecimento de uma cadeia de rastreabilidade para medições a três coordenadas é o estabelecimento de um método que seja aceito internacionalmente para a calibração das MM3Cs.

Uma primeira possibilidade diz respeito ao uso da calibração indireta. Neste tipo de procedimento a escolha de um artefato padrão torna-se fundamental (setas verde e azul da figura 3.2).

Um fator importante quanto aos artefatos de referência, que deve ser considerado, é o alto custo no que diz respeito à fabricação, à calibração, manutenção e à própria aplicação.

Outra possibilidade para a calibração das MM3Cs é o uso dos chamados métodos diretos onde se comparam as grandezas definidas pela máquina testada diretamente com uma escala de referência rastreada a unidade fundamental, por exemplo, laser He-Ne, (seta vermelha na figura 3.2). Estes métodos permitem a medição dos erros individuais que influenciam a máquina permitindo, além de um diagnóstico detalhado, a análise comparativa entre os vários fatores de influência na geometria. Apesar dessa grande potencialidade os métodos diretos freqüentemente eliminam o sistema de sondagem que é um elemento obrigatório na operação normal da máquina. Tal problema é minimizado quando sensores ópticos são utilizados.

Para tornar esses métodos mais atrativos deve-se realizar estudos quanto a realização de testes independentes do sistema de sondagem.

Na determinação da forma de calibração das MM3Cs é importante não perder de vista como se dará a determinação das incertezas, o tempo e dificuldade da calibração e o custo desta atividade, no caso do uso da calibração indireta inclui-se o custo de fabricação e calibração do artefato utilizado. Somente considerando tais fatores poder-se-á obter um procedimento cujo uso seja viável às empresas que utilizam esses equipamentos. Assim, evita-se que a utilização desse procedimento seja restrito a laboratórios e fabricantes visto que a importância desse procedimento normalizado para as empresas é grande.

Com base nas necessidades e dificuldades apresentadas anteriormente,

KUNZMANN et al (1994), cita os requisitos de um método ideal de calibração que vise a rastreabilidade:

- o método deve cobrir todas as tarefas de medição, ou pelo menos um espectro representativo das medidas para os grupos mais importantes de tarefas de medição;
- a avaliação dos erros de todas as tarefas deve considerar os efeitos devidos ao processo de sondagem, ao comportamento geométrico das MM3Cs bem como as influências do software original da MM3C, os erros sistemáticos e aleatórios acima de tudo aqueles devidos a efeitos térmicos;
- um procedimento rápido para uma calibração periódica deve ser especificado para garantir que a MM3C continue capaz de medir dentro da incerteza anunciada;
- deve ser capaz de simular tanto quanto possível os valores de precisão das normas nacionais e internacionais existentes;

3.2.1 A CALIBRAÇÃO E A INCERTEZA DE MEDIÇÕES A TRÊS COORDENADAS

É sabido que a maior limitação para a expansão do uso das Máquinas de Medir a Três Coordenadas é o estabelecimento de um consenso internacional para a padronização da determinação das incertezas das medições realizadas com tais instrumentos.

Segundo SWYT (1995), do ponto de vista metrológico, o estabelecimento das incertezas para medições em máquinas de medir a três coordenadas, necessário para estabelecer a rastreabilidade, é um problema complexo, atual e sem uma solução padrão. A complexidade deriva-se da própria natureza da máquina de medir a três coordenadas, com sua habilidade para realizar uma vastidão de medidas em diferentes posições dentro de seu volume de trabalho de acordo com a estratégia de medição adotada. Em geral, as pesquisas sobre a incerteza das máquinas de medir a três coordenadas incluem aquelas associadas com:

- imperfeições geométricas resultantes da fabricação das MM3Cs, deformações elásticas e efeitos dinâmicos nos seus elementos definindo os seus 21 graus de liberdade;
- imperfeições geométricas do sistema de sondagem como a escolha dos pontos de medição, velocidade da medição, etc;
- distorções mecânicas da máquina devido à temperatura não uniforme, não constante e não padrão durante a medição;
- variabilidades associadas com a combinação do plano de amostragem para a seleção dos pontos a serem sondados, o algoritmo matemático para implementação de um software, e
- propriedades das peças a serem medidas, incluindo erros de forma,
 rugosidade superficial e várias interações da sonda.

WECKENMANN, KNAUER & KILLMAIER (2001) sintetizam as fontes de incerteza das medições a três coordenadas. Observe a figura 3.3.

A ASME B89 1.12M (1990), a CMMA (1989), a ISO 10360-2 (1994) estabelecem diferentes critérios para a estimativa das incertezas. Algumas citam a amplitude (R) dos desvios dos valores medidos em relação ao valor calibrado do padrão como sendo a incerteza da MM3C. Outras tomam o valor máximo destes desvios obtidos nos testes de desempenho. Em outras, ainda, a incerteza pode ser atribuída ao valor máximo dos desvios para 95% dos valores obtidos, denominado critério U95 são exemplos a VDI/VDE 2617 (1986), a BS 6808 (1989) e a JIS B 7440 (1987). A " ISO Guide to Expression of Uncertainty in Measurement" recomenda uma abordagem estatística para a incerteza com um nível de confiança de 95% com distribuição normal. (NIST Technical Note 1297, 1994).

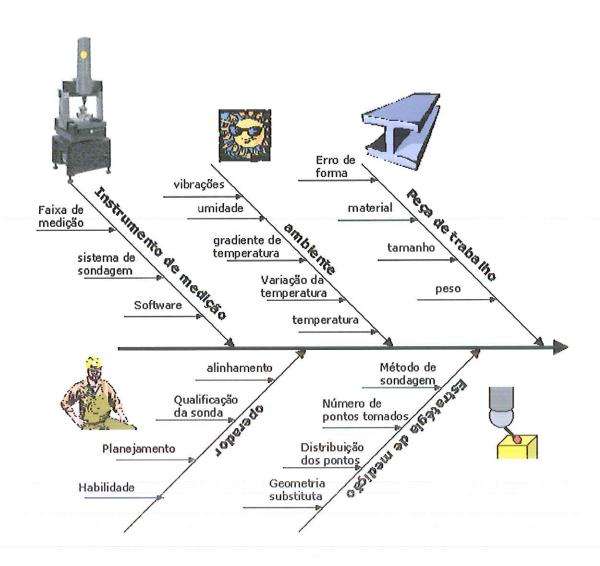


Figura 3.3. Fontes de Incerteza nas Medições a Três Coordenadas

Pela abordagem do *Internacional Committee for Weights and Measures* (CIPM), a representação das componentes de incerteza é feita pela estimativa de um desvio padrão chamada incerteza padrão combinada. No caso de incertezas do tipo A¹, este desvio padrão é estimado estatisticamente enquanto para incertezas do tipo B este é estimado por um julgamento científico usando as informações relevantes disponíveis (NIST Technical Note 1297, 1994).

Existem três abordagens para o problema da determinação das incertezas: o método do comparador, método do teste de desempenho e o

¹ Conforme explicado na página 49

modelo matemático. [PHILLIPS, (1995)].

MÉTODO DO COMPARADOR

A primeira abordagem diz respeito a utilização de um artefato padrão especializado para a medição de uma característica particular (seta preta da figura 3.2); esta abordagem é conceitualmente simples, de grande acuracidade e conveniente quando a MM3C é usada repetitivamente para medir uma ou poucas características. Este fato impede explorar a principal vantagem das MM3Cs que é a flexibilidade e torna necessário o uso de muitos artefatos padrões calibrados aumentando o custo da sua realização.

Neste enfoque a MM3C é reduzida a um aparelho de medição com um só fim, isto é, um comparador utilizado para uma comparação por substituição. Entretanto não há regras universalmente aceitas para estes procedimentos, especificamente não existe nenhuma especificação quanto a similaridade mínima entre o padrão calibrado e o objeto a ser medido, ficando restrito a dimensões e formas realmente idênticas .[KUNZMANN et alli (1995)].

Segundo KUNZMANN et alli (1995), em uma avaliação deste tipo são envolvidas somente as incertezas do artefato padrão, pois os efeitos combinados dos erros da máquina serão considerados nos erros obtidos na medição do mesmo. É um processo de comparação entre a peça a ser medida e o artefato padrão não sendo necessário que a máquina esteja calibrada sendo suficiente que seja estável e que sua rede cúbica de pontos coordenados não apresente interrupções. Este enfoque é o único considerado metrologicamente correto.

MÉTODO DO TESTE DE DESEMPENHO

O método do teste de desempenho consiste na utilização de um artefato padrão pré-calibrado para a realização de algumas medições na MM3C e medidas de uma esfera de referência (ensaio de sondagem). As medições devem ser repetidas várias vezes em posições e orientações discretas dentro do volume de trabalho da máquina. O desempenho da máquina é avaliado

tomando-se a diferença entre o valor determinado pela MM3C e o valor calibrado do artefato (valor verdadeiro).

Existem vários métodos normalizados para testes de desempenho das MM3Cs. São exemplos: ASME B89, VDI/VDE 2617, CMMA, BS 6808, JIS B7440 e a ISO 10360.

Segundo ABACKERLI & MIGUEL (1997), dentre as normas existentes sobre testes de desempenho as normas ISO 10360 são as únicas aceitas como estado da arte em avaliação de MM3Cs estabelecendo bases para a rastreabilidade das medições testadas. Entretanto tais normas apresentam limitações na análise do volume de trabalho em funções das condições experimentais sugeridas para os testes. Segundo os autores os testes propostos são necessários mas não suficientes para a rastreabilidade completa das MM3Cs.

Já norma EAL-G17 Technical Guideline de 1995 estabelece que testes de desempenho não garantem a rastreabilidade das medições em todas as características. Isto se deve ao fato que os testes de desempenho baseiam-se na idéia de que a distorção do volume de trabalho de uma MM3C pode ser descrita através dos erros das distâncias entre os pontos coordenados que o formam.

MÉTODO DO MODELO MATEMÁTICO

Esta abordagem baseia-se na utilização de simulação para prever os erros e as incertezas a eles associadas. São as chamadas Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas (MVM3Cs).

A maior vantagem das MVM3Cs frente ao método do comparador é preservar a flexibilidade na utilização da MM3C entretanto a sua utilização ainda está restrita mais a laboratórios sendo pouco utilizada para aplicações na produção.

Segundo CARDOZA (1995), uma Máquina Virtual de Medir a Três Coordenadas é um sistema numérico que simula através de um modelo matemático as operações de medição de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas. Através desse modelo as diferentes fontes de incerteza são combinadas e seus efeitos propagados. A partir do conhecimento do erro

volumétrico é possível simular uma geometria ideal (sem erro) da característica medida da peça. A geometria simulada funciona como um artefato padrão e o erro de medição seria dado pela diferença entre a geometria calculada pela MM3C e a geometria simulada pela MM3C Virtual. A incerteza de medição seria específica para cada processo de medição.

A figura 3.4 ilustra o conceito de máquina virtual

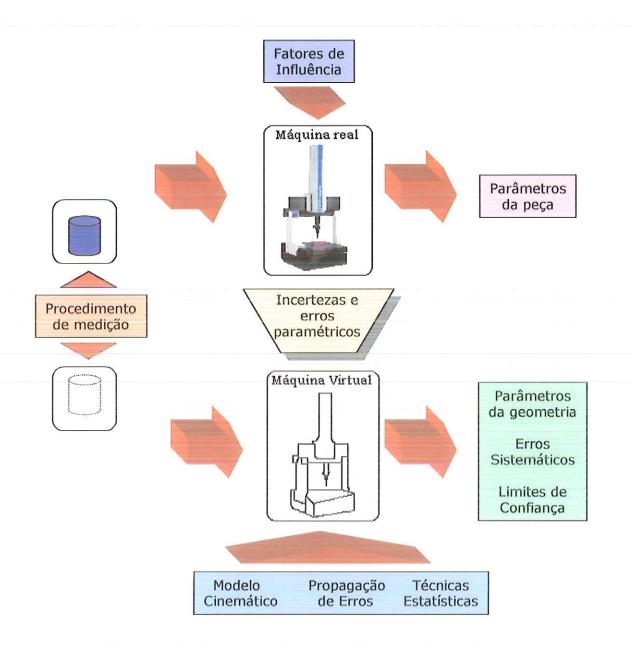


Figura 3.4: Máquina Virtual de Medir a Três Coordenadas

A forma da cadeia de rastreabilidade estabelecida com uma Máquina Virtual de Medir por Coordenadas dependerá dos instrumentos utilizados para realizar as calibrações dos erros da máquina e da sonda.

Uma das desvantagens das MVM3Cs é a necessidade da reavaliação dos erros periodicamente, pois estes mudam com as condições e idade da máquina. Entretanto, pode-se dizer que as Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas são o único método que satisfaz os requisitos necessários para a rastreabilidade. [KUNZMANN et alli (1994)]

Como pôde ser observado o método do modelo matemático, ou seja a utilização de Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas tem mostrado-se o mais promissor. E, pesquisadores tem desenvolvido alguns trabalhos utilizando as MVM3Cs como será apresentado a seguir:

KUNZMANN et alli (1994), separaram os erros paramétricos em erros de sondagem e erros geométricos. Os autores utilizaram uma máquina de medir virtual para a simulação da tarefa de medição. A simulação ocorre em quatro etapas:

- tomada de pontos na superfície do objeto a ser medido através dos quais a geometria do objeto ideal, idêntica àquele a ser medido é gerada;
- 2. cálculo do vetor de erro dos pontos com base no modelo de erro;
- avaliação dos parâmetros geométricos do objeto (por exemplo, diâmetro e comprimento) e;
- 4. avaliação estatística de uma série de simulações.

Os resultados finais de uma simulação são: os erros sistemáticos médios dos parâmetros geométricos do objeto, os desvios padrão destes parâmetros, devido a erros puramente aleatórios e os desvios padrão destes parâmetros devidos a variação esperada dos erros sistemáticos.

BALSAMO et alli (1996), propuseram uma metodologia, utilizando máquinas virtuais de medir a três coordenadas, para representação dos erros das MM3Cs em termos de fatores de escala e suas incertezas em termos de funções com a intenção de contemplar os requisitos para a rastreabilidade de forma breve e simples.

Segundo os autores, para a calibração do sistema apalpador duas operações são requeridas: uma autocalibração e a determinação de um conjunto de fatores de escala que introduz a rastreabilidade ligando as

referências locais a padrões internacionais. A idéia básica é assumir estes fatores de escala como um parâmetro metrológico reportada somente no certificado de calibração e os resultados da autocalibração são utilizados na determinação das incertezas.

Para a calibração dos erros paramétricos da máquina os autores utilizaram uma placa de furos posicionada e orientada diferentemente no volume de trabalho da máquina. A placa não necessita estar calibrada, mas dimensionalmente estável durante o procedimento de calibração.

Uma barra de esferas calibrada foi utilizada para garantir rastreabilidade. A barra de esferas possui a distância entre as esferas igual à distância entre as esferas da placa.

Segundo EVANS et alli (1996) a realização da auto-calibração traz benefícios significantes ao desenvolvimento de um procedimento de calibração visando rastreabilidade. Segundo os autores a auto-calibração elimina a propagação de incertezas ao longo da cadeia de rastreabilidade e prevêem um aumento da sua utilização em empresas.

Como se pode observar pelos artigos apresentados grande parte da preocupação de pesquisadores é desenvolver um método de calibração e um artefato padrão, no caso da calibração indireta, que diminua o tempo e os esforços gastos na calibração, no estabelecimento de uma cadeia de rastreabilidade das MM3Cs bem como na determinação das incertezas da medição.

Com pôde ser observado o problema da rastreabilidade das medições a três coordenadas carece de uma solução principalmente no que diz respeito a sua aplicabilidade na indústria.

3.3. Incerteza de Medição

Nenhuma medição é perfeita. Se uma medição for repetida várias vezes, por mais simples que ela seja, serão obtidos resultados diferentes. Essas diferenças são provocadas por variações associadas ao instrumento utilizado, ao operador, às condições ambientais, entre outras.

Assim, quando se relata o resultado da medição de uma grandeza física

é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado de tal forma que aqueles que a utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem esta indicação os resultados das medições não podem ser comparados sejam entre eles mesmos ou com valores de referência dados em especificações ou em normas.

Torna-se, portanto, necessário que haja um procedimento implementado, facilmente compreendido e de aceitação geral para caracterizar a qualidade do resultado de uma medição, ou seja, para avaliar e expressar sua incerteza. Nesta era do mercado globalizado é imperativo que esse procedimento seja uniforme em todo o mundo, de forma tal que as medições realizadas em diferentes países sejam facilmente comparadas.

Segundo INSTONE (1999), há vários métodos diferentes para calcular incerteza de medições. Todos exigem que o metrologista produza conjuntos múltiplos de medições idênticas da grandeza e execute alguns cálculos bastante tediosos e complicados para chegar a uma estimativa da incerteza da medição. Entretanto, quaisquer dos métodos reconhecidos para combinar contribuintes de incerteza resultará em um valor aproximadamente 10% igual ao obtido por qualquer outro método. A falha principal de qualquer um deles é a quantidade de medições que resultará em custos muito altos que são repassados para o cliente, ou o risco de assegurar uma medição pode aumentar se o instrumento for calibrado utilizando-se um número de pontos significativamente menor.

Com a introdução da 8º Edição de NAMAS documento NIS3003 e a inclusão dos princípios esboçados no "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" o calculo da incerteza associada a uma medição tornou-se uma tarefa mais apropriada para um matemático do que para um engenheiro. Em algumas companhias com departamentos de calibração pequenos poderia ser possível que todos os engenheiros fossem treinados, porém, em laboratórios maiores é mais habitual para vários engenheiros ficar especialista em certos aspectos do processo de calibração. [INSTONE (1999)].

Essa é uma dificuldade no tratamento da incerteza de medição que necessita ser sanada mediante um treinamento e maior difusão dos seus métodos e técnicas entre os profissionais que lidam com medidas.

3.3.1. INCERTEZA DE MEDIÇÃO: CONHECIMENTOS BÁSICOS

Neste item serão apresentados alguns aspectos básicos necessários para o entendimento de como se pode determinar a incerteza de uma medição.

CONCEITUAÇÃO DE INCERTEZA

O conceito de incerteza como atributo quantificável é relativamente novo na história. Atualmente, apesar da determinação e da correção de erros em medições sejam práticas comuns na metrologia, ainda permanece uma incerteza do quão é correto é o resultado declarado.

DIETRICH (1973), define incerteza de medição como uma medida do grau de indeterminação que pode ocorrer nos resultados de uma calibração.

Segundo o GUIA PARA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DA MEDIÇÃO (1999), incerteza é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos à grandeza. Esse parâmetro pode ser o desvio padrão ou a metade de um intervalo de confiança adotado.

Outras definições para incerteza de medição são:

- Uma medida do possível erro no valor estimado da grandeza, tal como proporcionado pelo resultado de uma medição;
- Uma estimativa caracterizando a faixa de valores no qual o valor verdadeiro de uma grandeza se encontra.

FONTES POSSÍVEIS DE INCERTEZA

Segundo o GUIA PARA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO (1999), existem muitas fontes que contribuem para a incerteza de uma medição. Dentre elas pode-se citar:

- Definição incompleta da grandeza;
- Realização imperfeita da definição da grandeza;

- Amostragem n\u00e3o representativa a amostra medida pode n\u00e3o representar a grandeza;
- Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- Erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- Valores inexatos dos padrões de medição;
- Valores de constantes e de outros parâmetros, obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados, inexatos;
- Aproximações e suposições incorporadas ao método e técnica de medição;
- Variações nas observações repetidas do mesurando sob condições aparentemente idênticas;

Estas fontes não são necessariamente independentes umas das outras e algumas podem interagir com outras.

Mas todas as fontes possíveis de incerteza devem ser consideradas na sua estimativa? A resposta é que a escolha das fontes a serem consideradas na estimativa da incerteza de uma medição depende da exatidão requerida para a medição. Ou seja, o procedimento de medição de uma grandeza deve ser definido com um grau de detalhamento adequado para satisfazer a exatidão requerida para a medição. Um exemplo que pode ser dado é: medir o comprimento de uma barra de aço de um metro com exatidão micrométrica exige a especificação da temperatura e da pressão atmosférica. Tais especificações não seriam necessárias para essa mesma medida caso a exatidão da medida fosse milimétrica.

Outro fator importante que deve ser observado durante um procedimento de medição é a reprodutibilidade das condições em uma série de observações. Quando não é possível reproduzir as condições de medição, variações surgem devido à presença de grandezas de influência oriundas dessa falta de reprodutibilidade. Pode-se dizer que, o modelo matemático que transforma o conjunto de observações repetidas em um resultado de medição é de importância crítica, pois ele geralmente inclui grandezas de influência que não são totalmente conhecidas.

Tradicionalmente o erro possui duas componentes: uma aleatória e outra sistemática.

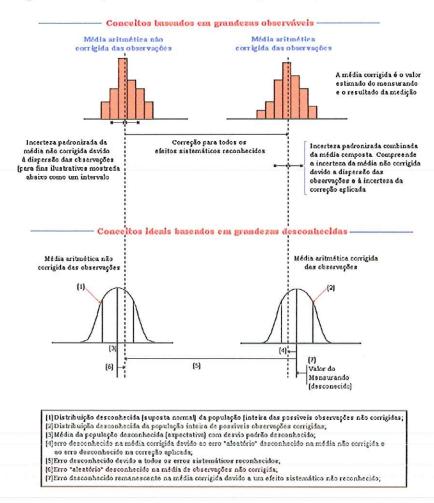
O erro aleatório presumivelmente origina-se de variações imprevisíveis das grandezas de influência. Os efeitos de tais variações são chamados de efeitos aleatórios. Embora não seja possível compensar o erro aleatório no resultado de medição, pode-se geralmente reduzi-lo aumentando-se o número de observações. Assim, a sua esperança ou valor esperado passa a ser zero.

Entretanto, o desvio padrão experimental não é o erro aleatório da média e sim uma medida da incerteza da média devido aos erros aleatórios.

Da mesma forma o erro sistemático, muitas vezes, não pode ser eliminado totalmente, porém, pode ser reduzido. Como se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza no resultado de uma medição, pode ser quantificado. Se esse efeito for significativo com a exatidão requerida da medição uma correção ou fator de correção pode ser aplicado para compensálo. Supõe-se que, após esta correção, a esperança ou valor esperado do erro provocado por um erro sistemático seja zero.

Quando uma correção for aplicada para compensar um erro sistemático a sua incerteza é uma medida do grau do conhecimento incompleto do valor requerido da correção. O erro originado dessa compensação imperfeita não pode ser exatamente conhecido.

Portanto, o resultado de uma medição após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos é ainda tão somente uma estimativa do valor da grandeza devido à incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado no que diz respeito aos efeitos sistemáticos. Entretanto, o valor da incerteza pode estar muito próximo do valor da grandeza, ou seja, seu erro ser pequeno, muito embora possa ter uma incerteza muito grande.



A figura 3.5 apresenta uma ilustração do que foi dito acima

Figura 3.5: Ilustração gráfica do conceito de valor, erro e incerteza

3.3.2. FORMAS DE ESTIMAR AS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

A recomendação INC-1 do Comitê International dês Points et Measures. de 1980 agrupou os componentes da incerteza em duas categorias baseadas no seu método de avaliação, "A" e "B". Estas categorias são aplicadas a incerteza e não são substitutas para os termos aleatório e sistemático.

O propósito dessa classificação é de indicar duas maneiras de avaliar as componentes da incerteza sem que haja qualquer diferenciação quanto à suas naturezas.

• AVALIAÇÃO TIPO A: quando as componentes da incerteza podem ser calculadas por meios estatísticos e seu valor descreve a dispersão da série de medições. [LINK (1997)].

O desvio padrão caracterizando uma componente de uma avaliação tipo A é chamada de incerteza padronizada tipo A e é obtida de uma função densidade de probabilidade derivada da observação de uma distribuição de freqüência.

Se a grandeza Q pode ser obtida através de observações a melhor estimativa disponível da média populacional é a média aritmética \overline{Q} das no observações independentes (equação 3.1):

$$\overline{Q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} q_k \tag{3.1}$$

Sabendo que as observações individuais q_k diferem em valor devido a variações aleatórias a variância σ^2 da distribuição de probabilidade de q, é dada pela equação 3.2:

$$s^{2}(Q) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n} (q_{k} - \overline{Q})^{2}$$
 (3.2)

a raiz quadrada da variância denominada desvio padrão experimental e caracteriza a variabilidade dos valores q_k observados ou mais especificamente a dispersão em torno de sua média \overline{Q} . Além disso, pode ser denominado incerteza padronizada tipo A.

Uma observação importante é que o número de observações deve ser suficientemente grande para garantir que \overline{Q} forneça uma estimativa confiável de μ_q da variável aleatória q e que $s^2(\overline{Q})$ forneça uma estimativa confiável da variância .

 AVALIAÇÃO TIPO B: Quando se trata da estimativa de uma grandeza que não tenha sido obtida por observações repetidas a variância estimada ou a incerteza padronizada é avaliada por julgamento científico baseando-se em informações disponíveis sobre a possível variabilidade de Q. Tais informações podem ser obtidas de resultados de medições similares anteriores, experiência ou do conhecimento do comportamento do instrumento, dados do fabricante, dados fornecidos por certificados de calibração, referências de manuais de instrução, etc. Exemplos: gradiente de temperatura durante a medição; tipo do indicador (analógico ou digital), instabilidade na rede elétrica, histerese, deformações mecânicas, etc. [PIRATELLI FILHO, (1998)]

Segundo LINK (1997), em uma avaliação do tipo B é necessário considerar e incluir pelo menos os originários das seguintes fontes:

- Incerteza associada ao padrão de referência e qualquer instabilidade em seu valor ou indicação (padrão sujeito a drift ou com instabilidade temporal);
- Incerteza associada ao equipamento de medida ou calibração, como por exemplo, envelhecimento de conectores e qualquer instabilidade em seu valor ou indicação (equipamento sujeito a drift);
- Incerteza associada ao equipamento a ser medido ou calibrado, por exemplo, o valor da menor divisão, qualquer instabilidade durante a calibração, etc.
- Incerteza associada ao procedimento de calibração;
- Incerteza associada ao efeito das condições ambiente em um ou mais dos itens acima.

Portanto uma avaliação tipo B da incerteza padronizada o desvio padrão é chamado de incerteza padronizada tipo B e é obtida de uma função densidade de probabilidade baseada no grau de credibilidade que um evento vá ocorrer. É freqüentemente chamada probabilidade subjetiva.

Apesar deste tipo de avaliação ser baseada na experiência e no conhecimento geral deve-se, considerar que uma avaliação tipo B da incerteza padronizada pode ser tão confiável quanto uma avaliação tipo A, especialmente quando esta última for realizada com um número pequeno de observações estatisticamente independentes.

Uma observação importante é que muitas vezes as informações sobre a incerteza obtidas nos manuais, catálogos, fabricantes estabelecem intervalos

de confiança sendo necessário extrair o valor da incerteza a partir do conhecimento da distribuição de probabilidade.

HOFER (1996), discutiu quais seriam as desvantagens em somar incertezas padronizadas tipo A e B através de algumas situações práticas. Para o autor quando a distribuição de probabilidade da incerteza padronizada tipo B não for totalmente conhecida ao somar seu valor a uma incerteza tipo A, com distribuição de probabilidade conhecida, nada poderia ser dito a respeito da distribuição do resultado dessa soma.

A figura 3.6 ilustra esquematicamente distribuições de probabilidade : a trapezoidal, a retangular e a triangular. Na figura μ_t é a média da distribuição.

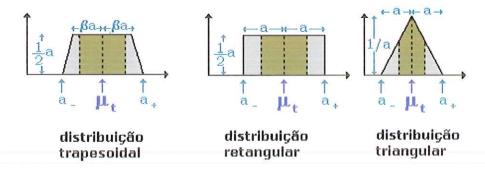


Figura 3.6: Distribuições de probabilidade

DISTRIBUIÇÃO RETANGULAR: é utilizada quando é possível estimar somente fronteiras para Q e firmar que a probabilidade de que Q esteja dentro do intervalo é 1 portanto a probabilidade de estar fora desse intervalo é zero. Segundo LINK (1997), se não for possível conhecer os possíveis valores de Q_i dentro do intervalo, pode-se assumir que é igualmente provável estar em qualquer ponto do intervalo, e conseqüentemente o seu grau de liberdade é infinito. Então a variância para uma distribuição quadrada é dada pela equação 3.3.

$$s^{2}(Q_{i}) = (a_{+} - a_{-})^{2} \div 12 \tag{3.3}$$

Se a diferença entre os limites, a_+ - a_- é designada por 2a , então a equação (3.3) torna-se

$$s^2(Q_i) = a^2/3$$
 (3.4)

A distribuição de retangular é um modelo utilizado na ausência razoável de qualquer outra informação. Mas se conhecido os valores da grandeza, em questão, próximos do centro dos limites é mais provável assumir uma distribuição normal ou, uma distribuição trapezoidal ou triangular.

DISTRIBUIÇÃO TRAPEZOIDAL: em muitos casos é mais razoável considerar que os valores junto aos limites do intervalo são menos prováveis de ocorrerem que os valores próximos ao centro. Há nestes casos, uma substituição da distribuição retangular simétrica por uma distribuição trapezoidal simétrica. [LINK (1997)].

Na figura 3.5. pode-se observar que a base maior do trapézio é igual a 2a e a base menor 2 β a com $0 \le \beta \le 1$. Se $\beta \to 1$ a distribuição trapezoidal aproxima-se da retangular, enquanto quando $\beta = 0$ a distribuição é triangular.

Assumindo que Q_i assuma uma distribuição trapezoidal a variância associada é dada por:

$$s^{2}(Q_{i}) = a^{2}(1 + \beta^{2})/6$$
(3.5)

DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR: quando β =0, a partir da equação (3.5) tem-se que a variância associada à Q_i é dada por

$$s^2(Q_i) = \frac{a^2}{6} \tag{3.6}$$

3.3.3. INCERTEZA PADRONIZADA COMBINADA

Muitas vezes deseja-se medir uma grandeza Y e esta não pode ser medida diretamente, mas é determinada a partir de outras grandezas através de uma relação funcional. (equação 3.7)

$$Y=f(Q_1, Q_2, ..., Q_n)$$
 (3.7)

Além disso, as grandezas Q_i das quais Y depende, também godem não ser obtidas diretamente, dependendo elas também de outras grandezas, e assim todas devem estar relacionadas na função que descreve Y. Neste caso, a função de Y, devido à sua complexidade, não poderá ser escrita de modo explícito, podendo ser determinada experimentalmente ou existir somente como um algoritmo que terá que ser avaliado numericamente.

Segundo o GUIA PARA EXPRESSÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO (1999) as grandezas Q_i podem ser divididas nas seguintes categorias:

- Grandezas cujos valores e incertezas podem ser diretamente determinadas na presente medição, onde os seus valores podem ser obtidos através de avaliações tipo A ou tipo B e, podem envolver correções nas leituras de instrumentos por conta de grandezas de influência tais como temperatura ambiente, pressão barométrica e umidade;
- Grandezas cujos valores e incertezas s\u00e3o incorporadas a partir de fontes externas, tais como grandezas associadas com padr\u00f3es de medi\u00e7\u00e3o calibrados, materiais de refer\u00e9ncia certificados e dados de refer\u00e9ncia obtidos de manuais t\u00e9cnicos.

A incerteza padronizada combinada é a incerteza de um resultado de medição quando este é obtido por meio de valores de várias outras grandezas. Portanto o desvio padrão estimado associado com estimativa de saída ou resultado de medição y é chamado de incerteza padronizada combinada e é designada por i_c (Y).

A equação que determina i_c (Y) é baseada em uma aproximação da série de Taylor de primeira ordem da equação (3.7) e expressa a lei da propagação de incerteza (equação 3.8).

$$i_{c}^{2}(Y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\delta f}{\delta Q_{i}} \right]^{2} i^{2}(Q_{i}) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \frac{\delta f}{\delta Q_{i}} \frac{\delta f}{\delta Q_{j}} i(Q_{i}, Q_{j})$$
(3.8)

onde

f é a função dada na equação 3.7.

- Q_i são as grandezas das quais Y depende.
- As derivadas parciais, freqüentemente denominadas de coeficientes de sensibilidade, descrevem como a estimativa de saída Y varia com alterações nos valores de entrada.

Muitas vezes os coeficientes de sensibilidade, em vez de serem calculados pela função f, são determinados experimentalmente medindo-se a variação em Y causada por uma variação em um dado Q_i, enquanto se mantém constantes as grandezas de entrada restantes. Neste caso, o conhecimento da função f (ou de parte desta função quando somente vários coeficientes de sensibilidade são assim determinados) é reduzida a uma expressão da série de Taylor de primeira ordem, empírica, baseada nos coeficientes de sensibilidade medidos.

A equação (3.8) pode ser simplificada através do conhecimento da correlação entre as grandezas

GRANDEZAS DE ENTRADA NÃO CORRELACIONADAS: pode-se dizer que as grandezas não são correlacionadas quando forem independentes umas das outras. Neste caso a equação (3.8) torna-se

$$i_c^2(Y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\delta f}{\delta Q_i} \right]^2 i^2(Q_i)$$
 (3.9)

GRANDEZAS DE ENTRADA CORRELACIONADAS: são aquelas grandezas dependentes umas das outras. Neste caso a expressão apropriada é a apresentada através da equação (3.8).

Neste caso $i(q_i,q_j)$ é a covariância estimada associada com q_i e q_j . O grau de correlação entre q_i e q_j é caracterizada pelo coeficiente de correlação estimado [equação 3.10].

$$r(q_i, q_j) = \frac{i(q_i, q_j)}{i(q_i)i(q_j)}$$
(3.10)

onde

 $r(q_i,q_j)=r(q_j,q_i)$ e $-1 \le r(q_i,q_j) \le +1$. Se as estimativas q_i e q_j são independentes $r(q_i,q_j)=0$ e a variação numa delas não implica em uma variação esperada na outra.

3.3.4. INCERTEZA EXPANDIDA

Incerteza expandida é a grandeza que define um intervalo em torno de uma medição no qual se espera abranger uma grande fração da distribuição (nível de confiança) dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à grandeza.

Para associar um nível de confiança específico ao intervalo definido pela incerteza expandida, são necessárias suposições explícitas ou implícitas com respeito à distribuição de probabilidade caracterizada pelo resultado da medição e sua incerteza padronizada combinada. O nível de confiança que pode ser atribuído a este intervalo só pode ser conhecido na medida em que tais suposições sejam justificadas.

A Recomendação INC-1 (1980) do Grupo de Trabalho sobre a Declaração de Incertezas e as Recomendações 1 (CI-1981) e 1(CI-1986) do CIPM exige que a incerteza padronizada combinada fosse usada "por todos os participantes no fornecimento de resultados de todas as comparações interacionais ou outros trabalhos feitos sob os auspícios do CIPM e dos seus Comitês Consultivos".

Entretanto, para algumas aplicações comerciais, industriais e regulamentadoras é muitas vezes necessário definir um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos à grandeza. A existência desta necessidade foi reconhecida pelo Grupo de Trabalho e levou ao parágrafo 5 da Recomendação INC-1 (1980). Ela também está refletida na Recomendação 1 (CI-1986) do CIPM.

GODEC (1997) defendeu o uso da incerteza padronizada combinada e não da expandida. A razão disto é que como a incerteza expandida define uma grande faixa de valores possíveis para uma grandeza, em alguns casos, permite uma estimativa ruim da mesma. Além disso, a lei de propagação das incertezas não se aplica a propagação de intervalos de confiança.

A medida da incerteza que contempla essa necessidade é denominada incerteza expandida (I) e é obtida multiplicando-se a incerteza padronizada combinada por um fator de abrangência k.. A incerteza expandida é convenientemente expressa por Y= y± I que é o intervalo com o qual uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a Y.

Entretanto deve ser reconhecido que, na maioria dos casos, o nível de confiança é um tanto incerto, não somente por causa do conhecimento limitado da distribuição de probabilidade caracterizada, mas também por causa da incerteza da própria incerteza combinada.

ESCOLHENDO UM FATOR DE ABRANGÊNCIA

O fator de abrangência é escolhido com base no nível de confiança requerido para o intervalo. Em geral estará entre 2 e 3. Entretanto, para aplicações especiais k pode estar fora desta faixa. A determinação do fator de abrangência requer um conhecimento extenso da distribuição de probabilidade caracterizada pelos resultados de medição e sua incerteza padronizada combinada.

Uma aproximação mais simples adequada para situações onde a distribuição é aproximadamente normal e o grau de liberdade efetivo da incerteza combinada é de tamanho significativo é fazer k=2 para um nível de confiança de 95% e k=3 para um nível de confiança de 99%. Observe a figura 3.7.

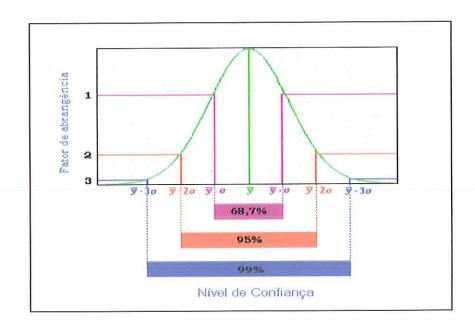


Figura 3.7: Fator de Abrangência e nível de confiança

A figura 3.8 mostra uma representação da Incerteza Padronizada Combinada (I_c) e da Incerteza Expandida com 95% (I_{95}) e 99% (I_{99}) de Confiança

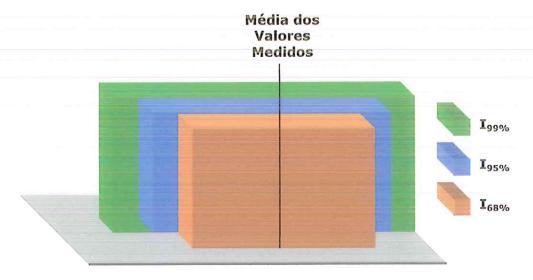


Figura 3.8: Representação da Incerteza Padronizada Combinada (i_c) e da Incerteza Expandida com 95% (I_{95}) e 99% (I_{99}) de Confiança

Entretanto, quando não é conveniente esta aproximação, a utilização do teorema do valor central junto com a distribuição t-student

fornece um fator de abrangência baseado no grau de liberdade efetivo v_{efetivo} da incerteza padrão da medição i através da expressão:

$$\upsilon_{efetivo} = \frac{I^{4}(y)}{\sum \left(\frac{\upsilon_{i}^{4}(y)}{\upsilon_{i}}\right)}$$
(3.11)

onde

 v_i = grau de liberdade da incerteza padrão de medição i $_{\rm i}$ (y);

Assim, para avaliar o grau de liberdade efetivo da incerteza de medição I(y) deve-se determinar o grau de liberdade de cada grandeza de influência.

De uma forma geral, para uma avaliação do tipo A o grau de liberdade é determinado a partir do número de observações realizadas através da expressão:

$$v = n - 1 \tag{3.12}$$

onde

n= número de observações da grandeza;

No caso de uma avaliação do tipo B o grau de liberdade é determinado por

$$\upsilon = \infty \tag{3.13}$$

Capítulo 4

Modelo Reduzido de Sintetização de Erros para Máquinas de Medir a Três Coordenadas

O modelo de sintetização de erros, para Máquinas de Medir a Três Coordenadas, é apresentado neste trabalho.

Este modelo, aqui denominado como MRSE, "Modelo Reduzido de Sintetização de Erros", permite o cálculo do erro de posicionamento da ponta do apalpador, em qualquer direção X, Y ou Z, de qualquer ponto coordenado a partir de erros medidos em 15 geratrizes convenientemente escolhidas. Além disso, possui equações de sintetização, para Ex, Ey e Ez, reduzidas, em comparação a outros modelos conhecidos. Necessita de pouco tempo de calibração o que reduz o custo desta atividade, possibilita o diagnóstico das fontes de erros e garante a rastreabilidade dos erros calculados.

Os erros, que aqui eventualmente são chamados de deslocamentos indesejáveis, podem ser divididos em dois grupos: aqueles que possuem a mesma direção do movimento e são medidos utilizando, como padrão de deslocamento, uma barra de furos, e, aqueles que ocorrem nas direções

perpendiculares à direção do movimento e são medidos utilizando como padrão de deslocamento um esquadro mecânico.

As incertezas oriundas do levantamento dos erros são analisadas. Nesta análise são consideradas as influências, sobre a incerteza, de grandezas como: variação do resultado das medições realizadas, variação devido à temperatura, a resolução da MM3C e do LVDT, entre outras.

Para um melhor entendimento das etapas envolvidas no desenvolvimento deste trabalho, este capítulo está subdividido em duas partes. A primeira descreve, sumariamente, o MRSE e a técnica de calibração utilizada no levantamento dos erros. A segunda apresenta como foi feita a verificação da qualidade dos erros calculados através da estimativa das incertezas e da eficiência do modelo em prevê-los.

4.1. Modelo Reduzido de Sintetização de Erros

Como dito anteriormente o MRSE permite calcular o erro de posicionamento da ponta do apalpador, em qualquer direção X, Y ou Z, de qualquer ponto coordenado a partir de deslocamentos indesejáveis medidos com o artefato padrão posicionado paralelamente a 15 geratrizes convenientemente escolhidas a partir da análise geométrica da MM3C.

No desenvolvimento das equações do MRSE, inicialmente, o sistema de referência foi posicionado sobre um elemento fixo da MM3C. Em seguida, uma caracterização dos deslocamentos indesejáveis da ponta do sensor provocados pelos erros individuais foi feita através de uma análise geométrica detalhada da máquina.

A partir dessa análise foi possível determinar a direção desses deslocamentos e, quando houver, do agente multiplicador, ou seja, os braços de Abbè e, assim, as equações de sintetização das componentes do erro volumétrico puderam ser obtidas.

Observando a influência dos erros individuais sobre o posicionamento da ponta do sensor para diferentes posições no volume de trabalho da máquina, através das equações de sintetização, verificou-se que algumas dessas influências poderiam ser medidas através de uma mesma montagem

experimental. Assim, agrupando esses erros as equações de sintetização, obtidas anteriormente, puderam ser reduzidas originando as equações do MRSE.

A calibração é feita utilizando como artefatos padrões uma barra de furos e um esquadro mecânico. Os deslocamentos indesejáveis, que ocorrem na mesma direção do movimento foram medidos utilizando a barra de furos e, os que ocorrem nas direções perpendiculares à direção do movimento, um esquadro mecânico.

O procedimento de calibração da barra de furos consiste na estimativa dos "valores verdadeiros" das distâncias entre os centros dos furos através de medições realizadas em uma Máquina Universal de Medir (SIP).

Durante essas medições foram observadas as variações de grandezas como a temperatura da barra de furos e da SIP, o afastamento da temperatura de referência, entre outras.

Essas variações, juntamente com a variação das medidas realizadas na SIP, foram utilizadas para estimar a incerteza das distâncias entre centros calculadas.

4.2. Verificação do Modelo Proposto e da Qualidade dos Erros Calculados

Para verificar a eficiência do modelo em prever erros, o MRSE foi aplicado em uma Máquina de Medir a Três Coordenadas, Tipo Ponte Móvel, para gerar os mapas de erros, nas direções X, Y e Z. Em seguida, os erros sintetizados são comparados aos obtidos através da medição da barra de furos calibrada.

Esta comparação é realizada para valores de erros sintetizados e medidos nos extremos, região onde devem ocorrer os maiores erros de previsão do modelo, e no centro do volume de trabalho, local onde a maioria das medições, utilizando a MM3C, é normalmente realizada.

Além disso, o poder de diagnóstico, das fontes de erros, do modelo é verificado através de comparações simples entre os valores de cada um dos deslocamentos indesejáveis medidos em posições diferentes no volume de trabalho da máquina.

Finalmente, as equações de sintetização do MRSE e o número de montagens experimentais necessárias, para a calibração, são comparadas às de outros modelos conhecidos.

Além da verificação da eficiência do MRSE em prever erros, uma avaliação da qualidade dos erros calculados é feita através da análise das suas incertezas.

Para tanto, todas as grandezas que interferem nos resultados obtidos como variação de temperatura, a resolução da MM3C e do LVDT, entre outras são observadas. Mesmo que os efeitos dessas grandezas, sobre os erros calculados, não sejam significativos, devido ordem de grandeza pretendida, elas contribuem, juntamente com o desvio das medições realizadas, para a sua incerteza.

Aplicando-se os requisitos propostos pelo Guia para Expressão das Incertezas de Medição (1999) pôde-se propagar as incertezas dos erros medidos, através das equações do MRSE, estabelecendo assim a incerteza associada a cada componente do erro volumétrico para cada ponto coordenado.

Capítulo 5

Desenvolvimento do Modelo Reduzido de Sintetização de Erros em MM3Cs

O Modelo Reduzido de Sintetização de Erros em Máquinas de Medir a Três Coordenadas está detalhado neste capítulo que, para uma melhor compreensão, foi dividido em três partes.

Na primeira parte é apresentado o MRSE, Modelo Reduzido de Sintetização de Erros para Máquinas de Medir a Três Coordenadas.

Na segunda parte, a técnica de calibração utilizada, a barra de furos bem como as características operacionais e construtivas da Máquina de Medir a Três Coordenadas onde foram realizados todos os testes experimentais estão apresentadas.

Posteriormente, a terceira parte descreve a metodologia para a estimativa das incertezas das componentes do erro volumétrico calculadas utilizando o MRSE.

5.1. O Modelo Reduzido de Sintetização de Erros (MRSE)

A elaboração de qualquer modelo de sintetização de erros inicia-se com a definição do sistema de referência. A figura 5.1 apresenta uma MM3C, do tipo ponte móvel, com o sistema de referência posicionado sobre o desempeno de granito, devido à impossibilidade de realizar medições sobre a guia. Esse sistema servirá de referência para o desenvolvimento do MRSE.



Figura 5.1. Posicionamento do Sistema de Referência na MM3C

Posicionado o sistema de referência, a caracterização dos deslocamentos indesejáveis provocados pelos erros individuais deve ser feita, ou seja, a determinação da direção desses deslocamentos e, quando houver, do agente multiplicador, ou seja, os braços de Abbè.

Esta caracterização, feita a partir da análise geométrica da MM3C, está apresentada na tabela 5.1.

Tabela 5.1. Deslocamentos Indesejáveis nas direções X, Y e Z

Deslocamentos indesejáveis na direção Y (Ey)		
Erro	Depende	
Escala	da coordenada Y	
Retilineidade X direção Y	da coordenada X	
Retilineidade Z direção Y	da coordenada Z	
Pitch (y)	do braço em Z e da coordenada Y	
Yaw (y)	do braço em X e da coordenada Y	
Pitch (z)	do braço em Z e da coordenada Z	
Roll (x)	do braço em Z e da coordenada X	
Ortogonalidade XY	do braço em X	
Ortogonalidade YZ	do braço em Z	
Deslocamentos indesejáveis na direção X (Ex)		
Erro	Depende	
Escala	da coordenada X	
Retilineidade Y direção X	da coordenada Y	
Retilineidade Z direção X	da coordenada Z	
Yaw (y)	do braço em Y fixo ¹ e da coordenada Y	
Yaw (z)	do braço em Z e da coordenada Z	
Pitch (x)	do braço em Z e da coordenada X	
Roll (y)	do braço em Z e da coordenada Y	
Ortogonalidade XY	do braço em Y fixo	
Ortogonalidade XZ	do braço em Z	
Deslocamentos indesejáveis na direção Z (Ez)		
Erro	Depende	
Escala	da coordenada Z	
Retilineidade Y direção Z	da coordenada Y	
Retilineidade X direção Z	da coordenada X	
Picth (y)	do braço em Y fixo e da coordenada Y	
Roll (x)	do braço em Y fixo e da coordenada X	
Roll (y)	do braço em X e da coordenada Y	

5.1.1. Equacionamento da Componente Ey do Erro Volumétrico

A figura 5.2. apresenta P_1 , P_2 e P_3 , três pontos coordenados pertencentes ao volume de trabalho da MM3C.

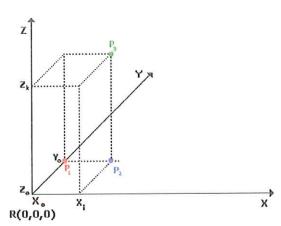


Figura 5.2. Três pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C

¹ O braço fixo em Y é a distância entre a escala X e a escala Z.

Conhecido o erro de escala, na direção Y, do ponto P_1 , o erro de posicionamento de P_2 e P_3 , com relação ao referencial R(0,0,0) pode ser obtido através da análise a seguir.

De acordo com a figura 5.2, P_1 e P_2 , possuem as mesmas coordenadas Y e Z e diferentes coordenadas X. Assim os erros na direção Y, que dependem de braços Z, não alteram o posicionamento relativo entre P_2 e P_1 . O mesmo pode ser dito quanto aos erros paramétricos cujos valores dependem das coordenadas Y e Z.

Entretanto, para o erro de retilineidade do eixo X, na direção Y, o mesmo não pode ser dito já que este depende da coordenada X, diferente para P_1 e P_2 . Essa diferença, também, faz com que os erros Yaw(y) e ortogonalidade XY, que dependem de braços em X, provoquem diferenças no posicionamento, em Y, de P_2 em relação a P_1 . Além disso, o erro angular Roll(x) possui valores diferentes para cada coordenada X. Portanto, de acordo com a análise acima $Ey[P(X_0,Y_j,Z_0)] \neq Ey[P(X_i,Y_j,Z_0)]$, para $\forall i \neq 0$, devido à presença dos erros de perpendicularismo entre os eixos X e Y, Yaw(y) , Roll(x) e da retilineidade do eixo X na direção de Y . Assim, pode-se escrever:

$$E_{Y}[P(X_{0},Y_{j},Z_{0})] + ortog.XY*X + retilineidadeY(x) + Roll(x)*Z + Yaw(y)*X = E_{Y}[P(X_{i},Y_{j},Z_{0})]$$
 (5.1)

onde

 $Ey[P(X_0,Y_j,Z_0)] = erro de escala do eixo Y;$

 $\text{Ey}[P(X_i,Y_j,Z_0)] = \text{erro de posicionamento de Y em qualquer geratriz } X_i \text{ do plano XY}.$

Análise semelhante pode ser feita para o erro de P_3 com relação ao mesmo referencial R(0,0,0).

Observando a tabela 5.1, pode-se dizer que, P_2 e P_3 possuem as mesmas coordenadas X e Y e diferentes coordenadas Z. Assim, os erros, na direção Y, que dependem de braços em X, não alteram o posicionamento relativo de P_3 e P_2 . O mesmo pode ser dito quanto aos erros paramétricos que têm seus valores dependentes dessas coordenadas.

Quanto aos erros que dependem da coordenada Z, diferente para P_2 e P_3 , no caso os erros de retilineidade do eixo Z na direção Y, pode-se dizer que provocam diferenças no posicionamento, em y, de P_3 e P_2 . Essa diferença, também, faz com que os erros Pitch(y), Pitch(z), Roll(x) e ortogonalidade YZ,

que dependem de braço em Z, alterem o posicionamento em Y entre os pontos.

Com esta análise $\text{Ey}[P(X_i,Y_j,Z_0)] \neq \text{Ey}[P(X_i,Y_j,Z_k)]$ devido aos efeitos dos erros de ortogonalidade entre os eixos Y e Z, Pitch(y) e Pitch(z) e retilineidade do eixo Z na direção de Y. Assim, pode-se escrever:

$$Ey[P(X_i, Y_j, Z_0)] + retilin.Y(z) + (ortogon.YZ + pitch(y) + pitch(z))*Z = E_y[P(X_i, Y_j, Z_k)]$$
onde
(5.2)

 $\text{Ey}[P(X_i,Y_j,Z_k)] = \text{erro de posicionamento de } Y \text{ em qualquer geratriz } X_i \text{ do plano } XZ \text{ para } \forall Z_k.$

Substituindo a equação 5.1 na 5.2 tem-se a 5.3 que é a equação de sintetização de Ey válida para todo ponto no volume de trabalho da MM3C.

$$E_{Y}[P(X_{0},Y_{j},Z_{0})] + ortog.XY * X + retilineid ade Y(x) + Roll(x) * Z + Yaw(y) * X + retilin.Y(z) + (ortogon.YZ + pitch(y) + pitch(z)) * Z = E_{Y}[P(X_{i},Y_{j},Z_{k})]$$

$$(5.3)$$

Observando a equação 5.3 pode-se notar que os erros angulares Yaw(y) e o Pitch(y) são os únicos erros na direção Y que crescem proporcionalmente aos braços X e Z, respectivamente, apresentando comportamento linear para uma mesma coordenada Y. Observe a figura 5.3.

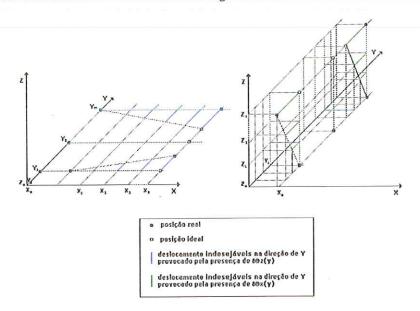


Figura 5.3. Deslocamentos indesejáveis provocados pelos erros angulares Yaw(y) e Pitch(y) devido à existência de braços nas direções X e Z respectivamente.

(5.5)

A partir dessa observação, pode-se dizer que, medindo-se deslocamentos em pontos pertencentes a duas geratrizes de um mesmo plano XY para diferentes coordenadas X e uma terceira geratriz com coordenada Z diferente é possível calcular o valor dos erros em todas as outras geratrizes desses planos. Observe as expressões 5.4 e 5.5.

$$Dy_i^1 = \frac{\left[d_j(X_m) - d_j(X_0)\right] * (X_i - X_0)}{(X_m - X_0)} \quad \text{para i= 0 a me j = 1 a m}$$
 (5.4)

onde

 Dy_i^1 = deslocamento indesejável, na direção Y, provocado pelo erro angular Yaw(y) calculado geratriz $G(X_i)$ do plano XY;

 $d_{j}(X_{m})$ = posicionamento do ponto j medido na geratriz G(X_m), braço X máximo;

 $d_j(X_0)$ = posicionamento do ponto j medido na geratriz G(X₀), braço X mínimo ; m = número de geratrizes do Ey no plano XY;

$$Dy_k^2 = \frac{\left[d_j(Z_m) - d_j(Z_0)\right] * (Z_k - Z_0)}{(Z_m - Z_0)}$$
 para k= 0 a m e j = 1 a m

onde

 Dy_k^2 = deslocamento indesejável, na direção Y, provocado pelo erro angular Pitch(y) calculado para a geratriz $G(Z_k)$ do plano YZ;

 $d_{j}(Z_{m})$ = posicionamento do ponto j medido na geratriz G(Z_{m}), braço Z máximo ;

 $d_j(Z_0)$ = posicionamento do ponto j medido na geratriz G(Z_n), braço Z mínimo; m = número de geratrizes do Ey no plano YZ;

Substituindo os valores de Dy_i^1 e Dy_k^2 na equação 5.3 tem-se

$$E_{\gamma}[P(X_0, Y_j, Z_0)] + Dy_i^1 + Dy_k^2 + ortog.XY * X + retiline idade Y(x) + Roll(x) * Z + + retilin.Y(z) + + (ortogon.YZ + pitch(z)) * Z = E_{\gamma}[P(X_i, Y_j, Z_k)]$$

$$(5.6)$$

Na equação 5.6. pode-se observar que alguns erros alteram o posicionamento, na direção Y, de dependendo da coordenada X ou de braços nesta direção. Neste caso estão os erros de retilineidade Y(x), Roll(x) e

ortogonalidade XY. A figura 5.4 ilustra como essas influências alteram o posicionamento, em Y.

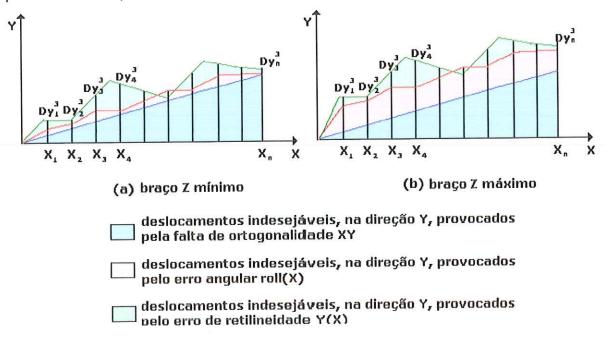


Figura 5.4. Influências dos erros Roll(x), Ortogonalidade XY e retilineidade Y(x) no posicionamento, em Y.

Cada deslocamento Dy_k^3 , para i=1,...,n, agrupa as influências dos erros Roll(x), Ortogonalidade XY e retilineidade Y(x) sobre o posicionamento em Y, para diferentes valores da coordenada X.

Entretanto, o erro angular Roll(x), segundo a tabela 5.1, provoca deslocamentos indesejáveis, na direção Y, que crescem proporcionalmente à coordenada Z, apresentando, neste caso, comportamento linear. Observe na figura 5.4b, como a influência de Roll(x) sobre o posicionamento aumentou, quando comparada a figura 5.4a, devido ao braço em Z ser máximo.

Assim, se a medição de Dy_k^3 for realizada para um braço Z mínimo e, posteriormente, com o braço Z máximo, as diferenças entre os deslocamentos obtidos, para uma mesma coordenada X, nas duas medições ocorrem devido somente ao Roll(x). Sendo estas diferenças lineares e proporcionais ao braço Z, é possível determinar os deslocamentos na direção de Y provocados pelo Roll do eixo X, ortogonalidade XY e retilineidade de X na direção de Y.

$$Dy_k^3 = d_i(Z_0) + \frac{[d_i(Z_m) - d_i(Z_0)] * (Z_k - Z_0)}{(Z_m - Z_0)} \quad \text{para} \quad k = 0 \text{ a m i} = 1 \text{ a n}$$
 (5.7)

onde

 Dy_k^3 = deslocamentos indesejáveis, na direção Y, provocado pelo Roll (x), ortogonalidade XY e retilineidade de X na direção de Y calculado para a geratriz $G(Z_k)$ do plano YZ;

 $d_i(Z_m)=$ deslocamento indesejável, na direção Y, medido na geratriz $G(Z_n)$ com braço em Z máximo ;

 $d_i(Z_0)=$ deslocamento indesejável, na direção Y, medido na geratriz $G(Z_0)$ com braço em Z mínimo;

A equação 5.6 torna-se:

$$E_{y}[P(X_{0},Y_{i},Z_{0})] + Dy_{i}^{1} + Dy_{k}^{2} + Dy_{k}^{3} + retilin.Y(z) + (ortogon.YZ + pitch(z))*Z = E_{y}[P(X_{i},Y_{j},Z_{k})]$$
(5.8)

Na equação 5.8. pode-se notar a presença de erros que alteram o posicionamento, na direção Y, dependendo da coordenada Z ou de braços nesta direção. Neste caso enquadram-se a retilineidade Y(z), do Pitch(z) e da ortogonalidade YZ. A figura 5.5 ilustra como essas influências alteram o posicionamento em Y.

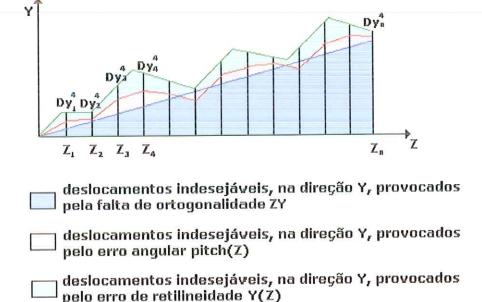


Figura 5.5. Influências dos erros Pitch(z), Ortogonalidade ZY e retilineidade Y(z) no posicionamento, na direção Y.

Cada deslocamento Dy_k^4 , para k=1,...,n, agrupa as influências dos erros Pitch(z), Ortogonalidade ZY e retilineidade Y(z) no posicionamento, na direção Y.

A equação 5.8 torna-se:

$$E_{y}[P(X_{0}, Y_{i}, Z_{0})] + Dy_{i}^{1} + Dy_{k}^{2} + Dy_{k}^{3} + Dy_{k}^{4} = E_{y}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
(5.9)

A equação 5.9 é a equação do MRSE para sintetizar Ey em qualquer ponto no volume de trabalho da MM3C.

5.1.2. Equacionamento da Componente Ex do Erro Volumétrico

Análise semelhante à realizada para o erro de posicionamento, na direção Y, pode ser aplicada para a componente na direção X, a partir da tabela 5.1.

A figura 5.6 apresenta P_1, P_2 e P_3 , três pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C.

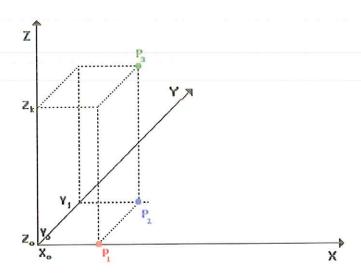


Figura 5.6. Três pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C

Conhecido o erro de escala do eixo X, ou seja, o erro de posicionamento de P_1 , é possível calcular o erro de posicionamento, na direção X, de P_2 e P_3 , com relação ao referencial R(0,0,0).

Observando a figura 5.6, P_1 e P_2 , possuem as mesmas coordenadas X e Z e diferentes coordenadas Y. Assim, os erros que dependem de braços, na direção Z, não alteram o posicionamento, na direção X, de P_2 em relação a P_1 . O mesmo acontece com os erros paramétricos cujos valores dependem das coordenadas X e Z.

Entretanto, a diferença na coordenada Y de P_1 e P_2 faz com que o erro de retilineidade do eixo Y, na direção X, provoque diferenças no posicionamento relativo entre estes pontos. Essa diferença, na coordenada Y, faz com que o erro angular Yaw(y), mesmo sendo multiplicado por um braço em Y que tem tamanho constante, altere o posicionamento entre os pontos.

De acordo com a analise acima $\operatorname{Ex}[P(X_i,Y_0,Z_0)] \neq \operatorname{Ex}[P(X_i,Y_j,Z_0)]$ para $\forall j \neq 0$ devido à influência do erro de retilineidade do eixo Y, na direção de X, e do Yaw(y). Assim, pode-se escrever:

$$E_{x}[P(X_{i}, Y_{0}, Z_{0})] + (ort.XY + yaw(y))^{*}Y_{fixo} + retilinX(Y) = E_{x}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{0})] + ort.XY^{*}Y_{fixo}^{2}$$
 (5.10) onde

 $Ey[P(X_i,Y_0,Z_0)] = erro de escala do eixo X;$

 $\text{Ey}[P(X_i,Y_j,Z_0)] = \text{erro de posicionamento de X em qualquer geratriz } G(Y_j) \text{ do plano XY.}$

Calculado o erro de posicionamento de P_2 , através da equação 5.10, análise semelhante pode ser feita para o cálculo do erro de P_3 com relação do mesmo referencial R(0,0,0).

Observando a figura 5.6, pode-se dizer que, P_2 e P_3 possuem as mesmas coordenadas X e Y e diferentes coordenadas Z. Portanto, os erros que dependem de braços, em Y, não alteram o posicionamento, na direção X, de P_3 e P_2 . O mesmo ocorre com os erros paramétricos que têm seus valores dependentes das coordenadas X e Y. Entretanto, o erro de retilineidade do eixo Z, na direção X, depende da coordenada Z que é diferente para P_2 e P_3 . A diferença, na coordenada Z, dos dois pontos, faz com que os erros angulares Yaw(z), Pitch(x) e a ortogonalidade XZ tenham diferentes influências no posicionamento, em X, dos dois pontos.

O erro de ortogonalidade entre os eixos X e Y, é multiplicado pelo mesmo braço fixo na direção Y e como não é um erro paramétrico não provoca diferenças no posicionamento dos dois pontos. Porém, deve ser corrigido nos valores do posicionamento na direção X.

De acordo com a análise acima $\operatorname{Ex}[P(X_i,Y_j,Z_0)] \neq \operatorname{Ex}[P(X_i,Y_j,Z_k)]$ devido às influências dos erros de ortogonalidade entre os eixos X e Z, Roll(y), Yaw(z), Pitch(x) e da retilineidade do eixo Z na direção de X. Assim, pode-se escrever:

$$E_{x}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{0})] + retilin.X(z) + (yaw(z) + pitch(x) + ortogon.XZ) * Z = E_{x}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
 (5.11)

Substituindo a equação 5.10 na equação 5.11 tem-se a equação 5.12 que é a equação de sintetização de Ex válida para qualquer ponto no volume de trabalho da MM3C.

$$E_x[P(X_i, Y_0, Z_0)] + (ort.XY + yaw(y)) *Y_{fivo} + retilin.X(Y) + retilin.X(z) + (yaw(z) + pitch(x) + ort.XZ) *Z = E_x[P(X_i, Y_i, Z_k)]$$

$$(5.12)$$

Observando a equação 5.12 pode-se notar que o erro angular Pitch(x), único que varia com X e provoca deslocamentos indesejáveis, na direção X, que crescem proporcionalmente ao braço Z, apresenta um comportamento linear para uma mesma coordenada X.

A partir dessa observação, pode-se dizer que, medindo-se esses erros em duas geratrizes de um mesmo plano XZ com coordenadas Z diferentes é possível calcular o valor desses erros em todas as outras geratrizes desse plano.



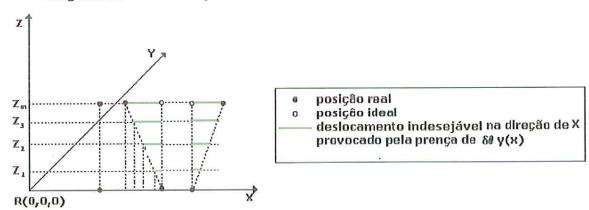


Figura 5.7. Deslocamentos indesejáveis provocados pelo erro angular Pitch(x) devido à existência de braço na direção Z.

Observando a figura 5.7 pode-se escrever a expressão 5.13.

$$Dx_k^1 = \frac{\left[d_i(Z_m) - d_i(Z_0)\right] * (Z_k - Z_0)}{(Z_m - Z_0)}$$
 para i=2,...n K=1,..m (5.13)

onde

 Dx_k^1 = deslocamento indesejável, na direção X, provocado pelo erro angular Pitch(x) calculado para cada geratrizG(Z_k) do plano XZ;

 $d_i(Z_n)$ = posicionamento do ponto i medido na geratriz G(Z_m), braço Z máximo;

 $d_i(Z_0)$ = posicionamento do ponto i medido na geratriz G(Z₀), braço Z mínimo; m= número de geratrizes G(Z_K) do plano XZ

Substituindo o valor de Dx_k^1 na equação 5.12 tem-se a equação 5.14.

$$E_{x}[P(X_{i}, Y_{0}, Z_{0})] + Dx_{k}^{1} + (ort.XY + yaw(y)) * Y_{fixo} + retilin.X(Y) + retilin.X(z) + (yaw(z) + ort.XZ) * Z = E_{x}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
(5.14)

Na equação 5.14. pode-se notar que existem erros que alteram o posicionamento, na direção X, dependendo da coordenada Y ou de braços nesta direção. A figura 5.8 ilustra como essas influências alteram o posicionamento, em X.

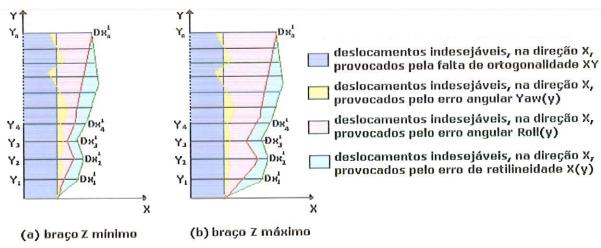


Figura 5.8. Influências dos erros Yaw(y), ortogonalidade XY e retilineidade X(y) no posicionamento, na direção X.

Cada deslocamento Dx_k^2 , para j=1,...,n, agrupa as influências dos erros Yaw(y), Roll(y), ortogonalidade XY e retilineidade X(y) no posicionamento, na direção X, para diferentes valores da coordenada Y.

No caso do erro angular Roll(y), este provoca deslocamentos indesejáveis que são proporcionais a braços em Z. Observe a figura 5.8.b como a influência de Roll(y) sobre o posicionamento aumenta, quando comparada a figura 5.8a, devido ao braço em Z ser máximo.

Assim, se a medição de Dx_k^2 for realizada para um braço Z mínimo e, posteriormente, com o braço Z máximo, as diferenças entre os deslocamentos obtidos, para uma mesma coordenada X, nas duas medições é devido somente ao Roll(y). Sendo estas diferenças lineares e proporcionais ao braço Z, é possível determinar os deslocamentos, na direção de X, provocados pelo Roll do eixo Y, Yaw(y), ortogonalidade XY e retilineidade de Y na direção de X através da equação 5.15.

$$Dx_k^2 = d_i(Z_0) + \frac{[d_i(Z_m) - d_i(Z_0)] * (Z_k - Z_0)}{(Z_m - Z_0)}$$
 para i=2,..n k= 1,..m (5.15)

onde

 Dx_k^2 = deslocamento indesejável, na direção X, provocado pelos erros de ortogonalidade XY, retilineidade do eixo Y na direção de X , Yaw (y) e Roll(y), medido para a geratriz G(Z_k)do plano YZ;

 $d_i(Z_m)$ = deslocamento indesejável, na direção X, medido na geratriz $G(Z_m)$, braço Z máximo; $d_i(Z_0)$ = deslocamento indesejável, na direção X, medido na geratriz $G(Z_0)$, braço Z mínimo;

Substituindo Dx_k^2 na equação 5.14 tem-se

$$E_{x}[P(X_{i}, Y_{0}, Z_{0})] + Dx_{k}^{1} + Dx_{k}^{2} + retilin.X(z) + (yaw(z) + ort.XZ) * Z = E_{x}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
 (5.16)

Na equação 5.16 pode-se notar que, a retilineidade X(z) e o Yaw(z) provocam deslocamentos indesejáveis não lineares, na direção X, devido ao movimento em Z e, a ortogonalidade XZ aumenta sua influência, de forma linear, no posicionamento na direção X à medida que a coordenada Z

aumenta. A figura 5.9 ilustra como essas influências alteram o posicionamento em X.

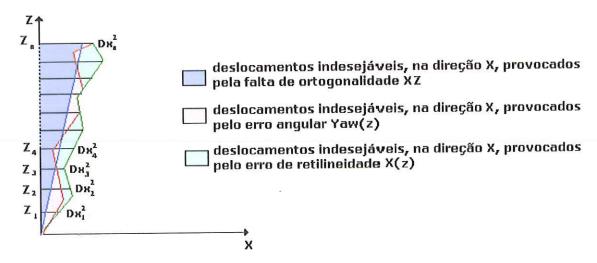


Figura 5.9. Influências dos erros Yaw(z), ortogonalidade XZ e retilineidade X(z) no posicionamento, na direção X.

Cada deslocamento Dx_k^3 , para k=1,...,n, agrupa as influências dos erros Yaw(z), ortogonalidade XZ e retilineidade X(z) no posicionamento, na direção X.

A equação 5.16 torna-se

$$E_x[P(X_i, Y_0, Z_0)] + Dx_k^1 + Dx_k^2 + Dx_k^3 = E_x[P(X_i, Y_j, Z_k)]$$
(5.17)

A equação 5.17 é a equação do MRSE para sintetização de Ex em qualquer ponto no volume de trabalho da MM3C.

5.1.3. Equacionamento da Componente Z do Erro Volumétrico

Análise semelhante à realizada para os erros na direção Y e X pode ser aplicada para a componente na direção Z.

A figura 5.10 apresenta P_1 , P_2 e P_3 , três pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C.

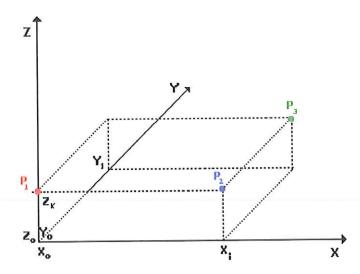


Figura 5.10. Três pontos pertencentes ao volume de trabalho da MM3C

Conhecido o erro de escala do eixo Z, ou seja, o erro de posicionamento do ponto P_1 , os erros para os pontos P_2 e P_3 , com relação ao referencial R(0,0,0), podem ser calculados analisando a tabela 5.1.

De acordo com a figura 5.10, P_1 e P_2 possuem as mesmas coordenadas Z e Y e diferentes coordenadas X. Portanto, os erros angulares Pitch(y) e Roll(y) e o erro de retilineidade do eixo Y na direção Z não provocam diferenças no posicionamento, na direção Z, entre os dois pontos.

A diferença na coordenada X faz com que o erro de retilineidade do eixo X, na direção Z, provoque diferenças entre o posicionamento em X de P_1 e P_2 . Essa diferença, também, faz com que o erro angular Roll(x) apresente valores diferentes para os dois pontos e, mesmo sendo multiplicado por um braço fixo contribui de forma diferente para o posicionamento, em Z, de P_1 e P_2 .

Com a analise acima $Ez[P(X_0,Y_0,Z_k)] \neq Ez[P(X_i,Y_0,Z_k)]$ para $\forall i \neq 0$ devido à retilineidade do eixo X na direção de Z e ao Roll(x). Assim, pode-se escrever:

$$E_{z}[P(X_{o}, Y_{0}, Z_{k})] + retilineidade.Z(x) + roll(x) * Y_{fixo} = E_{z}[P(X_{i}, Y_{0}, Z_{k})]$$

$$(5.18)$$

onde

 $Ez[P(X_0,Y_0,Z_k)] = erro de escala do eixo Z;$

 $Ez[P(X_i, Y_0, Z_k)] = erro de posicionamento de Z em qualquer geratriz X_i.$

Análise semelhante pode ser feita para o cálculo do erro de posicionamento de P_3 com relação ao mesmo referencial R(0,0,0).

Observando a figura 5.10 pode-se dizer que, P_2 e P_3 possuem as mesmas coordenadas X e Z. Assim, os erros que dependem de braços em X não alteram o posicionamento, na direção Z, de P_3 com relação a P_2 . O mesmo pode ser dito para os erros paramétricos que têm seus valores dependentes dessas coordenadas.

A diferença na coordenada Y faz com que o erro de retilineidade do eixo Y, na direção Z, altere o posicionamento, em Z, de P_3 com relação a P_1 . Além disso, o erro angular Roll(y) depende dessa coordenada e, portanto, apresenta valores diferentes em P_1 e P_3

Com a análise acima $Ez[P(X_i,Y_0,Z_k)] \neq Ez[P(X_i,Y_j,Z_k)]$ devido ao erro angular Pitch(y), a retilineidade do eixo Y na direção de Z e o Roll(y). Assim, pode-se escrever:

$$E_{z}[P(X_{i}, Y_{0}, Z_{k})] + retilinZ(y) + pitch(y) * Y_{fixo} + roll(y) * X = E_{z}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
 (5.19)

Substituindo a equação 5.18 na equação 5.19 tem-se a equação 5.20 que é a equação de sintetização de Ez válida para qualquer ponto no volume de trabalho da MM3C.

$$E_{z}[P(X_{o}, Y_{0}, Z_{k})] + retilin.Z(x) + roll(x) * Y_{fixo} + retilinZ(y) +$$

$$+ pitch(y) * Y_{fixo} + roll(y) * X = E_{z}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$

$$(5.20)$$

Na equação 5.20 pode-se observar que tanto o erro de retilineidadeZ(x) quanto o erro angular Roll(x) provocam deslocamentos indesejáveis, na direção Z, devido ao movimento em X. A figura 5.11 ilustra como essas influências alteram o posicionamento em Z.

Cada deslocamento Dz_i^1 , para i-1,...,n, agrupa as influências dos erros Roll(x) e Retilineidade Z(x) no posicionamento, na direção Z, para cada valor da coordenada X e mesma coordenada Z.

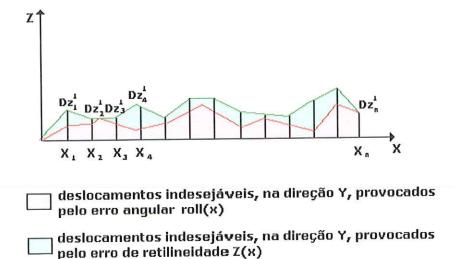


Figura 5.11: Influências dos erros de Roll(x) e Retilineidade Z(x) no posicionamento, na direção Z.

A equação 5.20 torna-se

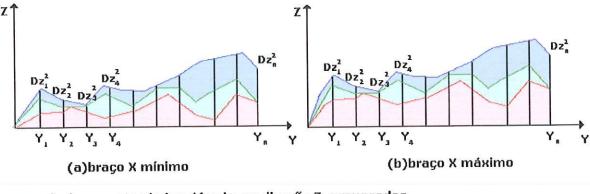
$$E_{z}[P(X_{o}, Y_{0}, Z_{k})] + Dz_{i}^{1} + retilinZ(y) + + pitch(y) * Y_{fixo} + roll(y) * X = E_{z}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
 (5.21)

Observando a equação 5.21 pode-se dizer que tanto o erro de retilineidadeZ(y) quanto os erros angulares Roll(y) e Pitch(y) provocam deslocamentos indesejáveis, na direção Z. A figura 5.12 ilustra como essas influências alteram o posicionamento em Z.

Cada deslocamento Dz_j^2 , para j=1,...,n, agrupa as influências dos erros Roll(y), Pitch(y) e Retilineidade Z(y) no posicionamento, na direção Z.

Entretanto, o erro angular Roll(y), segundo a tabela 5.1, provoca deslocamentos indesejáveis, na direção Z, que são proporcionais à coordenada X, apresentando, neste caso, comportamento linear. Observe na figura 5.12b. como a influência de Roll(y) aumenta para um braço X máximo.

Assim, se a medição de Dz_j^2 for realizada para um braço X mínimo e, posteriormente com o braço X máximo, as diferenças entre os deslocamentos obtidos, para uma mesma coordenada Y, nas duas medições é devido somente ao Roll(y). Sendo estas diferenças lineares e proporcionais ao braço X, é possível determinar os deslocamentos na direção de Z provocados pelo Roll(y), Pitch(y) e retilineidade de Y na direção de Z.



- deslocamentos indesejáveis, na direção Z, provocados pelo erro angular roll(γ)
- deslocamentos indesejáveis, na direção Z, provocados pelo erro angular pitch(y)
- deslocamentos indesejáveis, na direção Z, provocados pelo erro de retilineidade Z(y)

Figura 5.12: Influências dos erros de Roll(y), Pitch(y) e Retilineidade Z(y) no posicionamento, na direção Z.

Assim, tem-se a equação 5.22

$$Dz_{j}^{2} = Dz_{2} + \frac{\left[d_{j}(X_{n}) - d_{j}(X_{0})\right] * (X_{i} - X_{0})}{(X_{n} - X_{0})}$$
(5.22)

onde

 Dz_j^2 = deslocamento indesejável, na direção Z, provocado pelo Roll(y), retilineidade Y na direção Z e Pitch(y) calculado para cada plano plano YZ_i;

 $d_j(X_n)=$ deslocamento indesejável, na direção Z, medido na geratriz G(X_n), braço X máximo;

 $d_i(X_0)$ = deslocamento indesejável, na direção Z, medido na geratriz G(X₀), braço X mínimo;

Substituindo o valor de Dz_i^2 na equação 5.22 tem-se a equação 5.23

$$E_{z}[P(X_{o}, Y_{0}, Z_{k})] + Dz_{i}^{1} + Dz_{j}^{2} = E_{z}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
(5.24)

A equação 5.24 é a equação do MRSE para sintetização de Ez em todo volume de trabalho da MM3C.

Apresentado o desenvolvimento das equações do MRSE para sintetização dos erros de posicionamento, nas direções X, Y e Z, de qualquer ponto coordenado dentro do volume de trabalho da máquina a técnica de calibração será mostrada a seguir.

5.2. Calibração da Máquina de Medir a Três Coordenadas

Como dito anteriormente o MRSE permite calcular as componentes do erro volumétrico, em qualquer direção X, Y ou Z, de qualquer ponto coordenado.

Cada uma dessas componentes está modelada como a soma de erros de posicionamento individuais que possuem mesma direção. Os erros são obtidos através da calibração da MM3C e podem ser de natureza distintas. Quando a direção do erro e a de movimentação são as mesmas, os erros são medidos através da calibração utilizando a barra de furos, caso contrário utilizando um esquadro mecânico com um apalpador eletrônico LVDT.

Das quinze geratrizes onde são medidos os deslocamentos indesejáveis, em nove é utilizado o esquadro mecânico e o apalpador eletrônico LVDT e em seis a barra de furos.

Tanto a Barra de Furos quanto o esquadro mecânico são, convenientemente, posicionados no volume de trabalho da MM3C. Estas posições são determinadas analisando-se a influência dos braços de Abbè sobre os erros individuais, como apresentado no item 5.1.

5.2.1.Descrição da MM3C Utilizada nos Testes Experimentais

A MM3C utilizada nos testes experimentais está locada no Laboratório de Metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

Fabricada pela Brown & Sharpe Mfg. Co. em 1988 esta máquina, do tipo "Ponte Móvel" modelo "Microval", possui dimensões e peso apropriados para o seu uso em bancada. Sua estrutura foi construída em alumínio fundido e possui um desempeno de granito apoiado sobre três esferas e suportes em "V". Toda a estrutura é suportada por 4 isoladores – niveladores. A MM3C descrita acima pode ser observada na figura 5.13.

Ainda através da figura 5.13., pode-se observar que a ponte movimenta-se sobre duas guias montadas diretamente sobre a estrutura. Essas guias compõem o eixo de movimentação Y.

As duas colunas da ponte sustentam a guia que compõe o eixo X sobre a qual desloca-se, teoricamente, perpendicular ao eixo Y, o carro X. Este sustenta o eixo Z, também teoricamente, perpendicular, simultaneamente, aos eixos X e Y. O eixo Z sustenta a sonda de medição, parte fundamental para a utilização da MM3C.

Em cada uma das guias que determinam os eixos da máquina, estão fixadas escalas ópticas. O sistema de leitura, baseado no Princípio das Franjas de Moiré, é composto por um emissor, uma escala indexável (móvel), uma escala fixa e um receptor. O movimento relativo entre as escalas fixas e móveis provoca uma variação da intensidade da luz que chega ao receptor. Esta variação pode ser interpretada como deslocamento através de uma proporção matemática adequada. [MARTINEZ ORREGO (1999)].

A MM3C realiza o processo de medição utilizando um computador dedicado que contém os programas específicos, encarregados da determinação das características geométricas das peças a partir dos pontos coordenados medidos.

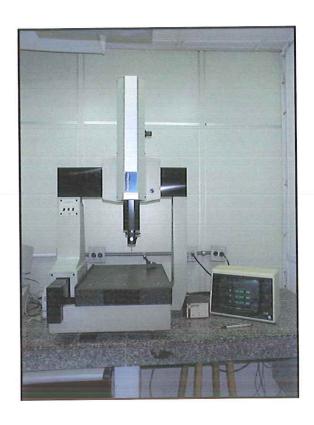


Figura 5.13. Máquina de Medir a Três Coordenadas

A tabela 5.2. resume das características técnicas e condições de operação da MM3C.

Tabela 5.2. Características Técnicas da MM3C

Dimensões		
Largura (direção Y):	730 mm	
Comprimento (direção X):	743 mm	
Altura (direção Z):	1340 mm	
A SHARL SHARL SHARL SHARL	Faixa de Operação	
direção X: 356 mm		
direção Y: 406 mm		
direção Z: 305 mm		
THE RESERVE AND ADDRESS OF THE PARTY.	Condições de operação	
temperatura:	10 a 40°C	
pressão mínima de ar:	70 psi	
conjunto regulador de press	ão: 50 psi	

5.2.2. A Calibração com a Barra de Furos

A maioria dos artefatos utilizados para calibração indireta de MM3Cs foram projetados somente para a finalidade de avaliação de desempenho das MM3Cs tornando complicada a determinação das componentes do erro volumétrico em pontos no volume de trabalho da máquina. Este fato abre uma lacuna quando se fala na utilização de artefatos mecânicos para a calibração de MM3Cs de forma rápida, simples e eficaz.

Para que o atendimento a essas necessidades seja possível, este trabalho apresentou um artefato simples, fácil de ser fabricado e que conjuntamente com um esquadro mecânico e um modelo matemático, o MRSE, permite a obtenção das componentes do erro volumétrico de MM3C. Este artefato é conhecido como *Barra de Furos*.

A barra de furos está representada na figura 5.14.



Figura 5.14. Barra de Furos

A barra foi fabricada em aço ferramenta ASTM O1 que possui uma boa estabilidade dimensional e resistência a deformação, no Laboratório de Máquinas Ferramentas da EESC-USP.

A barra tem secção transversal em H a fim de minimizar as deformações quando esta estiver biapoiada. As distâncias nominais entre os centros dos furos são iguais e os furos possuem o mesmo diâmetro nominal.

Neste trabalho foram utilizadas duas barras de tamanhos diferentes. A primeira possui 378 mm de comprimento nominal e contém nove furos com distância nominal entre centros de furos consecutivos de 41mm. A segunda possui 296 mm de comprimento nominal e sete furos com a mesma distância nominal, entre os centros dos furos, da primeira. A razão disso, é que, conforme a tabela 5.2, os eixos X, Y e Z da MM3C possuem tamanhos

diferentes sendo necessário tamanhos diferentes de barra para que fosse possível medir os deslocamentos indesejáveis ao longo de todos os eixos.

A figura 5.15 apresenta a perspectiva de uma das barras com as dimensões.

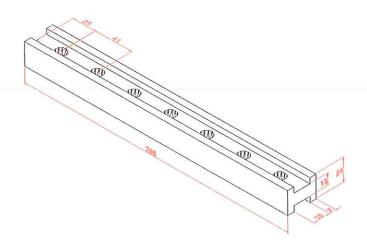


Figura 5.15. Desenho da Barra

A calibração da barra foi realizada em uma Máquina Universal de Medir (SIP), onde foram determinados os "valores verdadeiros" das distâncias entre os centros dos furos. A montagem experimental utilizada na calibração pode ser observada no apêndice II deste trabalho.

Os deslocamentos indesejáveis que são medidos utilizando a barra de furos como padrão de referência são aqueles em que sua direção e a direção de movimentação são as mesmas. São eles: os erros de escala dos eixos X, Y, Z e os deslocamentos indesejáveis, Dy_i^1 , Dy_k^2 para o eixo Y e Dx_k^1 para o eixo X.

Medição do Erro de Escala nas direções X, Y e Z

O erro de escala deve ser medido com a barra de furos, pré calibrada, posicionada paralelamente ao eixo e o mais próximo possível do eixo em questão.

O zero de referência é colocado no centro do primeiro furo da barra, próximo ao sistema de referência e as distâncias entre os centros dos furos j para j=2,..n até o centro do furo 1 são medidas.

Realizadas as medições necessárias, o erro de escala, para as posições nominais dos furos, pode ser obtido através da equação 5.25.

$$d_1^j - dc_1^j = E_A[P(X_0, Y_j, Z_0)]$$
 para $j = 2,...n e A=X, Y e Z$ (5.25)

onde

 $d_{\mathrm{l}}^{j}=$ distância entre o centro do furo j e o centro do furo 1 medida na MM3C;

 dc_1^j = Valor "verdadeiro" da distância entre o centro do furo j e o centro do furo 1 obtido na calibração da barra;

 $E_A[P(X_0,Y_j,Z_0)]$ = Erro de posicionamento, na direção A, do ponto P(0,j,0);

n = número de furos da barra;

Medição dos Deslocamentos indesejáveis nas direções X, Y e Z.

Os deslocamentos indesejáveis, na direção Y, provocados por Yaw(y) e Pitch(y) são Dy_i^1 e Dy_k^2 , respectivamente. Para obtenção desses erros, através das equações 5.4 e 5.5, a barra deve ser posicionada paralelamente às geratrizes que estão mostradas na figura 5.16a e medições semelhantes as do erro de escala devem ser feitas.

Na direção X, os deslocamentos provocados pelo Pitch(x) é Dx_k^1 e para a obtenção desse erros, através da equação 5.13, a barra deve ser posicionada paralelamente às geratrizes que estão mostradas na figura 5.16b e medições semelhantes as do erro de escala devem ser feitas.

Na direção Z só o erro de escala é medido utilizando a barra de furos.

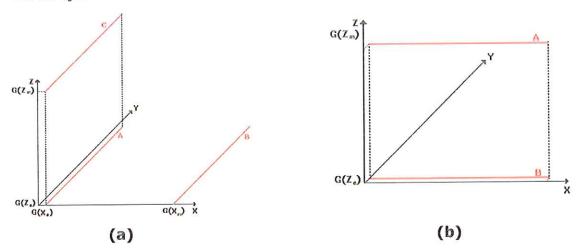


Figura 5.16 Geratrizes medidas utilizando a barra de furos

5.2.3. Calibração com o Esquadro Mecânico

Deslocamentos indesejáveis que não ocorrem na mesma direção do movimento são medidos utilizando, como artefato padrão, um esquadro mecânico e um apalpador eletrônico LVDT.

Medição dos Deslocamentos Indesejáveis na direção Y.

Neste caso enquadram-se os deslocamentos indesejáveis, na direção Y, que ocorrem devido a movimentos nas direções X e Z. São eles: Dy_k^3 e Dy_k^4 .

A figura 5.17 representa a montagem feita para a medição de Dy_k^3 . Observe que uma das faces laterais do esquadro, face menor, foi alinhada com o eixo Y. Em seguida foram medidos, utilizando a face paralela ao eixo X, os deslocamentos na direção de Y que ocorrem devido à movimentação em X.



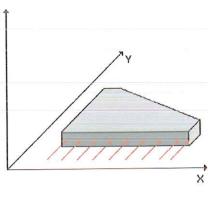


Figura 5.17. Montagem para a Medição dos Deslocamentos Indesejáveis Dy_k^3 para Braço Z máximo

A mesma montagem deve ser feita para braço Z mínimo permitindo, assim, o cálculo de Dy_k^3 através da equação 5.7.

A figura 5.18 apresenta a montagem feita para medir os deslocamentos indesejáveis, na direção de Y, que ocorrem devido ao movimento em Z, ou seja Dy_k^4 .



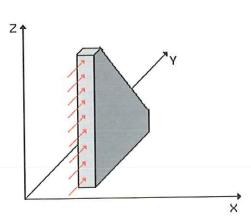


Figura 5.18. Montagem para a Medição dos Deslocamentos Indesejáveis Dy_k^4

Medição dos Deslocamentos Indesejáveis na direção X.

Neste caso enquadram-se os deslocamentos indesejáveis, na direção X, que ocorrem devido a movimentos nas direções Y e Z. São eles: Dx_k^2 e Dx_k^3 .

A figura 5.19 representa a montagem feita para a medição de Dx_k^2 . Observe que uma das faces laterais do esquadro, face menor, foi alinhada com o eixo X. Em seguida foram medidos, utilizando a face paralela ao eixo Y, os deslocamentos indesejáveis, na direção de X, que ocorrem devido à movimentação em Y.



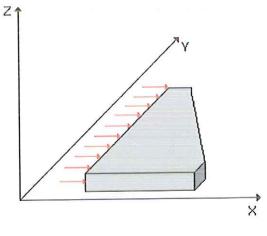


Figura 5.19 Montagem para a Medição dos Deslocamentos Indesejáveis Dx_k^2 com Braço Z máximo

A mesma montagem deve ser feita para braço Z mínimo a fim de calcular Dx_k^2 através da equação 5.15.

A figura 5.20 apresenta a montagem feita para medir os deslocamentos indesejáveis, na direção de X, que ocorrem devido ao movimento em Z, ou seja Dx_k^3 .



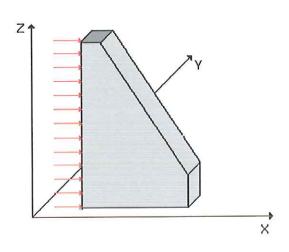


Figura 5.20. Montagem para a Medição dos Deslocamentos Indesejáveis Dx_k^3

Medição dos Deslocamentos Indesejáveis na direção Z.

Neste caso enquadram os deslocamentos indesejáveis, na direção Z, que ocorrem devido a movimentos nas direções Y e X. São eles: Dz_i^1 e Dz_j^2 . A figura 5.21 representa a montagem feita para a medição de Dz_i^1 . Observe que deslocamentos indesejáveis, na direção Z, foram medidos utilizando a face paralela ao eixo X e movimentação em X.

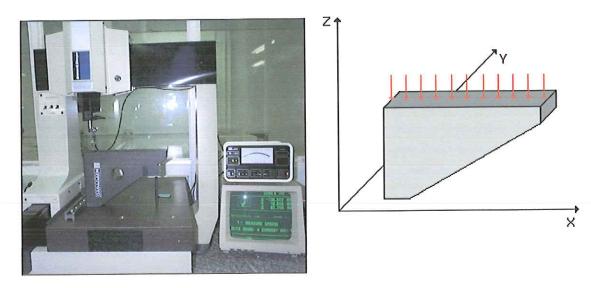


Figura 5.21. Montagem para a Medição dos Deslocamentos Indesejáveis Dz_i^1

A figura 5.22 apresenta a montagem feita para a medição de Dz_j^2 . Observe que deslocamentos indesejáveis, na direção Z, foram medidos utilizando a face paralela ao eixo Y e movimentação em Y.

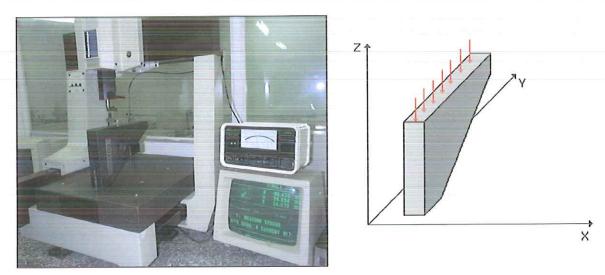


Figura 5.22. Montagem para a Medição dos Deslocamentos Indesejáveis Dz_j^2 com Braço X mínimo

A mesma montagem deve ser feita para braço X máximo a fim de calcular Dz_j^2 através da equação 5.22.

5.3. Estimativa das Incertezas no Cálculo das Componentes do Erro Volumétrico

A estimativa das incertezas de medição é parte obrigatória como forma de expressar a qualidade dos resultados obtidos nos testes experimentais.

Para facilitar a apresentação da metodologia utilizada para a estimativa das incertezas de medição tabelas foram desenvolvidas contendo os cálculos que foram realizados.

Inicialmente serão apresentadas as equações para o cálculo das componentes X, Y e Z do erro volumétrico além das expressões resultantes da aplicação da Lei de Propagação de Incertezas.

Entretanto em todas as expressões observa-se a presença de grandezas que por sua vez são calculadas a partir de medições realizadas utilizando como artefatos padrões a barra de furos e o esquadro mecânico. Assim, em seguida são apresentadas as equações para o cálculo dessas grandezas.

Na grande maioria das medições dimensionais realizadas os valores das grandezas são influenciados por fatores do ambiente, tais como temperatura, umidade, e do próprio instrumento como, por exemplo, a sua resolução. A influência desses fatores, muitas vezes, não necessitam de ser corrigidas, devido à ordem se grandeza requerida. Entretanto, contribuem para a incerteza das medições.

Em cada tabela apresentada a seguir serão mostrados:

- √ a equação das grandezas medidas considerando todas os fatores que influenciaram na medição, o tipo de medição e
- ✓ no caso de medição tipo A o tamanho da amostra,
- ✓ grau de liberdade efetivo,
- ✓ distribuição de probabilidade,
- ✓ a propagação das incertezas bem como os coeficientes de sensibilidade.

5.3.1. Estimativa da Incerteza na Determinação das Componentes Y, X e Z do Erro Volumétrico

A equação matemática que descreve o cálculo da componente Y do erro Volumétrico é apresentada na equação 5.25

$$E_{Y}[P(X_{0},Y_{i},Z_{0})] + Dy_{1}^{i} + Dy_{2}^{k} + Dy_{3}^{k} + Dy_{4}^{k} = Ey[P(X_{i},Y_{j},Z_{k})]$$
(5.25)

onde

 $Ey[P(X_0,Y_i,Z_0)] = erro de escala medido utilizando a barra de furos;$

 Dy_1^i = deslocamento calculado através de medições utilizando a barra de furos;

 Dy_2^I = deslocamento calculado através de medições utilizando a barra de furos;

 Dy_3^k = deslocamento calculado através de medições utilizando o esquadro e o apalpador LVDT;

 Dy_4^k = deslocamento calculado através de medições utilizando o esquadro e o apalpador LVDT;

Aplicando a lei da propagação das incertezas de medição na equação 5.25 tem-se a equação 5.26 que é a expressão utilizada para a estimativa da incerteza da componente Y do erro volumétrico.

$$i^{2}\left(Ey[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})] = \left(\frac{\partial Ey[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial Ey[P(X_{0},Y_{j},Z_{0})]^{2}}i^{2}_{Ey[P(X_{0},Y_{j},Z_{0})]} + \left(\frac{\partial Ey[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{1}^{i}}\right)^{2}i^{2}_{D_{1}^{i}} + \left(\frac{\partial Ey[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{2}^{k}}\right)^{2}i^{2}_{D_{2}^{i}} + \left(\frac{\partial Ey[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{3}^{k}}\right)^{2}i^{2}_{D_{3}^{i}} + \left(\frac{\partial Ey[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{4}^{k}}\right)^{2}i^{2}_{D_{4}^{i}}$$
(5.26)

✓ Estimativa da Incerteza na Determinação da Componente X do Erro Volumétrico

A equação matemática que descreve o cálculo de da componente X do erro volumétrico é apresentada na equação 5.27

$$Ex[P(X_i, Y_j, Z_0)] + Dx_1^k + Dx_2^k + Dx_3^k = Ex[P(X_i, Y_j, Z_k)]$$
(5.27)

ongla

 $Ex[P(X_i, Y_0, Z_0)] = erro de escala medido utilizando a barra de furos;$

 $Dx_1^k = deslocamento calculado através de medições utilizando a barra de furos;$

 $Dx_2^k = ext{deslocamento calculado através de medições utilizando o esquadro e o apalpador LVDT;}$

 $Dx_3^k = ext{deslocamento calculado através de medições utilizando o esquadro e o apalpador LVDT;}$

Aplicando a lei da propagação das incertezas de medição na equação 5.27 tem-se a equação 5.28 que é a expressão utilizada para a estimativa da incerteza da componente X do erro volumétrico.

$$i^{2}\left(Ex[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})] = \left(\frac{\partial Ex[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial Ex[P(X_{i},Y_{0},Z_{0})]}\right)^{2} i_{Ey[P(X_{i},Y_{0},Z_{0})]}^{2} + \left(\frac{\partial Ex[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{1}^{k}}\right)^{2} i_{D_{1}^{k}}^{2} + \left(\frac{\partial Ex[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{2}^{k}}\right)^{2} i_{D_{2}^{k}}^{2} + \left(\frac{\partial Ex[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{3}^{k}}\right)^{2} i_{D_{3}^{k}}^{2}$$
(5.28)

✓ Estimativa da Incerteza na Determinação da Componente Z do Erro Volumétrico

A equação matemática que descreve o cálculo de da componente X do erro Volumétrico é apresentada na equação 5.29

$$E_{z}[P(X_{o}, Y_{0}, Z_{k})] + Dz_{1}^{i} + Dz_{2}^{j} = E_{z}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
(5.29)

onde

 $Ez[P(X_0, Y_0, Z_k)] = erro de escala medido utilizando a barra de furos;$

 $Dz_1^i=$ deslocamento calculado através de medições utilizando o esquadro e o apalpador LVDT; $Dz_2^j=$ deslocamento calculado através de medições utilizando o esquadro e o apalpador LVDT;

Aplicando a lei da propagação das incertezas de medição na equação 5.29 tem-se a equação 5.30 que é a expressão utilizada para a estimativa da incerteza da componente Z do erro volumétrico.

$$i^{2}\left(Ez[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]\right) = \left(\frac{\partial Ez[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial Ez[P(X_{i},Y_{0},Z_{k})]}\right)^{2} i_{Ey[P(X_{0},Y_{0},Z_{k})]}^{2} + \left(\frac{\partial Ez[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{1}^{i}}\right)^{2} i_{D_{1}^{i}}^{2} + \left(\frac{\partial Ez[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{2}^{j}}\right)^{2} i_{D_{1}^{i}}^{2}$$

$$+ \left(\frac{\partial Ez[P(X_{i},Y_{j},Z_{K})]}{\partial D_{2}^{j}}\right)^{2} i_{D_{1}^{i}}^{2}$$
(5.30)

Os coeficientes de sensibilidade das equações 5.26, 5.28 e 5.30 possuem valor 1 e os valores das incertezas padronizadas de cada uma das grandezas de entrada são obtidas através dos parâmetros a serem apresentados a seguir.

5.3.2. Estimativa da Incerteza no Cálculo dos Deslocamentos Indesejáveis que dependem de outras grandezas medidas

A equação matemática que descreve o cálculo de deslocamentos provocados por erros angulares utilizando medidas obtidas com a barra de furos é apresentada na equação 5.31

$$D = \frac{[d_2 - d_1] * (braço1)}{(braço2)}$$
 (5.31)

onde

D = deslocamento provocado por erro angular;

 d_1 = distância entre centros de furos medidas na MM3C com a barra na posição 1;

 $d_2={
m dist}$ ância entre centros de furos medidas na MM3C com a barra na posição 2;

braço1 = distância entre a posição 1 e a posição em que o deslocamento for calculado;

braço2 = distância entre as posições 1 e 2.

Aplicando a lei da propagação das incertezas de medição na equação 5.31 tem-se

$$I(D)^{2} = \left(\frac{\partial D}{\partial d_{1}}\right)^{2} \left(i_{d_{1}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial D}{\partial d_{2}}\right)^{2} \left(id_{2}\right)^{2} + \left(\frac{\partial D}{\partial braço1}\right)^{2} \left(i_{braço2}\right)^{2} + \left(\frac{\partial D}{\partial braço2}\right)^{2} \left(i_{braço2}\right)^{2}$$
(5.32)

A partir das equações 5.31. e 5.32. tem-se a tabela 5.3

Tabela 5.3. Parâmetros para Determinar a Incerteza dos Deslocamentos Calculados

Coeficiente de Sensibilidade	Incerteza padronizada
$\frac{\partial D}{\partial d_1} = -\frac{braço1}{braço2}$	i_{d_1} Tipo de avaliação: A Grau de liberdade: $\frac{i^4(d_1)}{i_{L_{MM3C}}^4}$ Coeficiente t-Student (95%) = consultar
± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ± ±	tabela t - Student
$\frac{\partial D}{\partial d_2} = \frac{braço1}{braço2}$	i_{d_1} Tipo de avaliação: A Grau de liberdade: $\frac{i^4(d_2)}{i^4_{_{LMM3C}}}$
	Coeficiente t-Student (95%) = consultar tabela t - Student
$\frac{\partial D}{\partial braço_1} = \frac{\left(d_2 - d_1\right)}{braço2}$	 i_{braço1} Tipo de avaliação: B Grau de liberdade: ∞ Tipo de Distribuição: retangular
$\frac{\partial D}{\partial braço2} = \frac{p_2 - p_1}{\left(braço2\right)^2}$	 i_{braço2} Tipo de avaliação: B Distribuição de probabilidade: retangular Grau de liberdade: ∞
Grau de liberdade de $d = \frac{i^4(D)}{\frac{i_{di}^4}{4} + \frac{i_{dj}^4}{4}}$	

5.3.3. Estimativa da Incerteza na medição das distâncias entre os furos da barra na MM3C

A equação matemática que descreve a grandeza medida, no caso, o a distância entre furos utilizando a MM3C é apresentada na equação 5.33.

$$d = L_{mm3C} + L_{o_B} \alpha_B (t_B - 20) - L_{0_{Rigua}} \alpha_{Régua} (t_{Régua} - 20) + R$$
 (5.33)

onde

d = distância entre os centros de furos;

 L_{MMSC} = medida da distância entre os centros de furos em uma MM3C

R = resolução da MM3C

 $Lo_B =$ comprimento nominal entre os centros dos furos

 α_B = coeficiente de dilatação térmica do aço

 t_B = temperatura da barra de furos

Lo_{régua} = comprimento nominal da régua

 α_{rigua} = coeficiente de dilatação térmica do vidro

 $t_{r\acute{e}gua}$ = temperatura da régua

Aplicando a lei da propagação das incertezas de medição na equação 5.33 tem-se

$$I^{2}(d) = \left(\frac{\partial d}{\partial L_{MM3C}}\right)^{2} \left(i_{L_{MM3C}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial d}{\partial t_{B}}\right)^{2} \left(i_{t_{B}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial d}{\partial t_{régua}}\right)^{2} \left(i_{t_{régua}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial d}{\partial R}\right)^{2} \left(i_{R}\right)^{2}$$
(5.34)

A partir das equações 5.33. e 5.34. tem-se a tabela 5.4

Tabela 5.4. Parâmetros para Determinar a Incerteza da Medição das Distâncias entre os Centros dos Furos

Coeficiente de Sensibilidade	Incerteza padronizada
$\frac{\partial d}{\partial L_{MM3C}} = 1$	 i_{L_{MM3C}} Tipo de avaliação: A Tamanho da Amostra: 5 Distribuição de probabilidade: normal Grau de liberdade: 4 Coeficiente t-Student (95%) = 2,78
$\frac{\partial d}{\partial t_B} = Lo_B \alpha_B$	i_{l_B} Tipo de avaliação: B Distribuição de probabilidade: retangular Grau de liberdade: ∞
$\frac{\partial d}{\partial t_{r\acute{e}gua}} = Lo_{r\acute{e}gua}\alpha_{r\acute{e}gua}$	 i_{t_{Régua}} Tipo de avaliação: B Distribuição de probabilidade: retangular Grau de liberdade: ∞

Tabela 5.4. Continuação

$$\frac{\partial d}{\partial R} = 1$$

 i_R

Tipo de avaliação: B

Distribuição de probabilidade: triangular

Grau de liberdade : ∞

Grau de liberdade Efetivo de
$$d = \frac{i^4(d)}{i_{L_{MM,3C}}^4}$$

5.3.4. Estimativa da Incerteza na Medição de Deslocamentos utilizando o Esquadro de Granito

A equação 5.35 descreve a grandeza medida, no caso, o deslocamento medido utilizando o esquadro mecânico como padrão de referência. Esta equação contém a correção do desvio de ortogonalidade do esquadro e a resolução do apalpador eletrônico LVDT utilizado na medição do deslocamento.

$$D = L_{LVDT} + C_{esquadro} + R (5.35)$$

onde

D= deslocamentos medidos utilizando o esquadro de granito e o LVDT ; $L_{LVDT}=$ leitura feita no LVDT;

 $C_{esquadro}$ = correção devido ao erro de ortogonalidade do esquadro;

R = resolução do LVDT

Aplicando a lei da propagação de incertezas na equação 5.35 tem-se

$$I(D)^{2} = \left(\frac{\partial D}{\partial L_{LVDT}}\right)^{2} \left(i_{L_{LVDT}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial D}{\partial C_{esquadro}}\right)^{2} \left(i_{C_{esquadro}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial D}{\partial R}\right)^{2} \left(i_{R}\right)^{2}$$
(5.36)

A partir das equações 5.35. e 5.36. tem-se a tabela 5.5

Tabela 5.5. Parâmetros para Determinar a Incerteza da Medição de Deslocamentos utilizando o Esquadro e o Apalpador LVDT

Coeficiente de Sensibilidade	Incerteza padronizada
	$i_{\scriptscriptstyle L_{LVDT}}$
$\frac{\partial D}{\partial L_{LVDT}} = 1$	Tipo de avaliação: A Tamanho da Amostra: 5 Distribuição de probabilidade: normal Grau de liberdade: 4 Coeficiente t-Student (95%) = 2,78
$\frac{\partial D}{\partial C_{esquadro}} = 1$	$i_{C_{esquadro}}$ Tipo de avaliação: B Distribuição de probabilidade: retangular Grau de liberdade: ∞
$\frac{\partial D}{\partial R} = 1$	 i_R Tipo de avaliação: B Distribuição de probabilidade: triangular Grau de liberdade: ∞
Grau de liberdade Efetivo de $d = \frac{i^4(D)}{i_{L_{LVDT}}^4}$	

Capítulo 6

Apresentação e Discussão dos Resultados

Uma vez apresentado o Modelo Reduzido de Sintetização de Erros para MM3Cs, o MRSE, cabe agora mostrar os resultados obtidos através da sua aplicação na máquina anteriormente descrita. A aplicação possibilitou verificar se o MRSE consegue gerar, de forma eficiente, os mapas de erros de uma MM3C bem como permitir o diagnóstico das fontes de erros.

Além disso, o estabelecimento da cadeia de rastreabilidade e uma comparação entre o MRSE e algumas técnicas conhecidas de calibração são apresentados.

Todos os ensaios experimentais foram realizados mantendo a temperatura ambiente a 20 \pm 1°C e umidade relativa do ar sendo de 45 \pm 2 %

O sistema de sondagem da MM3C foi qualificado com um único apalpador, inicialmente disposto na direção vertical (direção Z) e em seguida na direção horizontal (direção X), esta última utilizada somente para medir o erro de escala do eixo Z.



O diâmetro da esfera do sistema de sondagem, 4 mm, foi escolhido com a finalidade de minimizar a influência da rugosidade superficial da parede interna dos furos nos resultados das medições.

Além disso, o artefato utilizado, a Barra de Furos, deve ser avaliada quanto a aspectos, como custo e fabricação.

6.1. Verificação da Eficiência do MRSE em Prever Erros

Para verificar a eficiência do modelo em prever erros, o MRSE foi aplicado em uma Máquina de Medir a Três Coordenadas, Tipo Ponte Móvel. Em seguida, os erros sintetizados foram comparados aos obtidos através da medição da barra de furos calibrada.

Esta comparação foi realizada para valores de erros sintetizados e medidos nos extremos (geratrizes B), região onde devem ocorrer as maiores discrepâncias, e no centro do volume de trabalho (geratrizes A), local onde a maioria das medições, utilizando a MM3C, é normalmente realizada.

A figura 6.1 mostra as geratrizes ao longo das quais foram realizadas medições de erros utilizando a barra de furos para verificar os valores de erros sintetizados utilizando o MRSE.

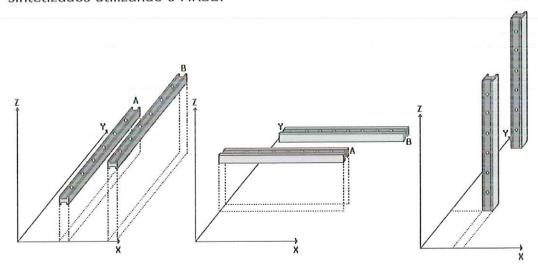


Figura 6.1. Geratrizes medidas para Verificação dos Resultados

Os gráficos da figura 6.2 apresentam os valores dos erros medidos, utilizando a barra de furos calibrada, e sintetizados através do MRSE nas posições apresentadas na figura 6.1.para as direções X, Y e Z.

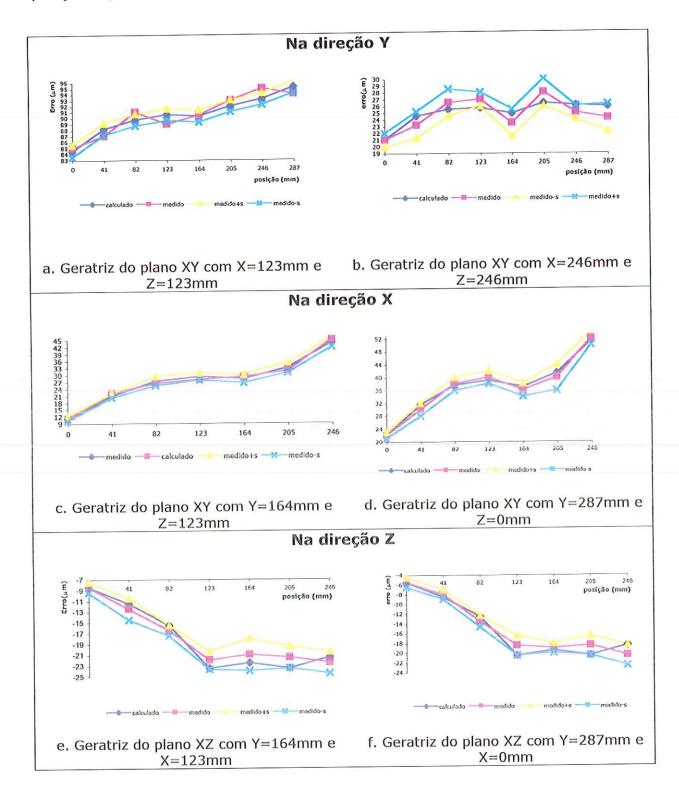


Figura 6.2 Erros Medidos e Sintetizados utilizando o MRSE nas Direções X, Y e Z

Pode-se observar, através dos gráficos apresentados na figura 6.2 que as diferenças entre os valores medidos e sintetizados estão distribuídas aleatoriamente em torno de zero indicando que não existe parcela significativa de erros sistemáticos que não foram considerados.

De um modo geral, pode-se dizer que os valores de erros sintetizados através do MRSE são muito próximos dos valores medidos com a barra de furos. Na direção Y, a maior diferença observada, apresentada no gráfico 6.2.b, foi de 1.5 μm. Esse valor corresponde a um percentual de 7% aproximadamente. Para valores de erros maiores, como os observados no gráfico 6.2.a, uma diferença de 1.0 μm representa uma porcentagem muito pequena, ou seja aproximadamente 1,87%.

Como pode-se observar nos gráficos 6.2 c e d, a maior discrepância entre os erros medidos e sintetizados utilizando o MRSE está na coordenada Y=164mm e é de, aproximadamente, 1.5 μ m.

Finalmente, na direção Z, conforme observado nos gráficos 6.2e e 6.2f a maior diferença entre os valores medidos e sintetizados pelo MRSE está na coordenada Z=205mm e é de, aproximadamente, 2 μ m. Essas diferenças representam, em geral, de 4% a 9% dos valores dos erros apresentados no gráfico 6.2e e 2% a 10% dos apresentados no gráfico 6.2f.

6.2. Resultados do Diagnóstico das Fontes de Erros

Conforme comentado no capítulo 4, o MRSE deve permitir diagnosticar a fontes de erros de uma MM3C, ou pelo menos grande parte delas. Assim, com base nos resultados da aplicação do MRSE na MM3C, apresentada anteriormente e, no conhecimento do comportamento dos erros individuais, obtido através da análise geométrica da Máquina, informações sobre as fontes de erros podem ser retiradas.

A seguir, estão apresentadas as curvas e as análises sobre cada fonte de erro. Cada uma das curvas de erros apresentada, está associada a um gráfico das diferenças obtidas através da comparação entre os erros calculados e medidos utilizando como padrão um sistema interferométrico laser e um nível eletrônico.

Cabe lembrar que os erros de escala dos eixos X, Y e Z foram medidos utilizando a barra de furos como artefato padrão e suas respectivas curvas estão apresentadas, mais adiante, no item 6.5. deste capítulo.

✓ Informações sobre as fontes de erros a partir de Dy_i^1 , Dy_k^2 e Dx_k^1

Os deslocamentos Dy_i^1 , Dy_k^2 e Dx_k^1 correspondem aos efeitos dos erros angulares Yaw(y), Pitch(y) e Pitch(x), respectivamente, sobre o posicionamento da ponta do sensor.

Conforme mostrado através da figura 5.3, para uma mesma coordenada Y, os deslocamentos Dy_i^1 são proporcionais a um braço na direção X. Dessa forma, para obter a curva do erro angular Yaw(y), basta encontrar o arco tangente da divisão do valor de Dy_i^1 pelo respectivo braço na direção X.

A curva do erro angular Yaw(y) obtida bem como o gráfico das diferenças entre os valores medidos e calculados estão apresentados no gráfico 6.1a e b.

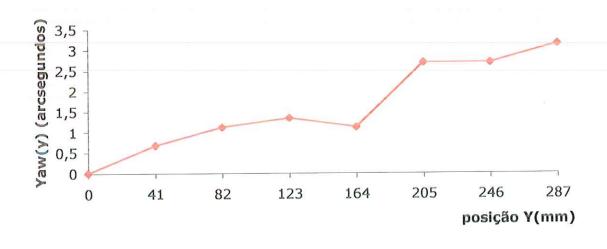


Gráfico 6.1a. Erro Angular Yaw do Eixo Y

O gráfico 6.1a mostra a curva dos valores do erro angular Yaw(y) para diferentes posições Y. Neste gráfico pode-se observar que o erro em questão é positivo e de uma forma geral cresce ao longo do eixo Y.

O gráfico 6.1b apresenta as diferenças obtidas através da comparação entre os erros calculados e os medidos, utilizando um sistema interferométrico laser. Pode-se observar, através do gráfico 6.1b, que as diferenças estão distribuídas aleatoriamente em torno de zero e seu maior valor é de 0,4 arc segundos para um erro angular de 3,5 arc segundos.

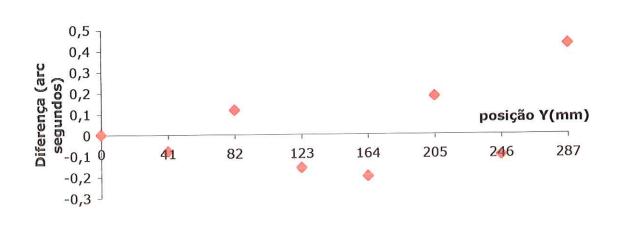


Gráfico 6.1b. Diferenças entre o erro calculado e medido

A mesma forma de cálculo pode ser utilizada na obtenção das curvas para os erros angulares Pitch(y) e Pitch(x), utilizando os deslocamentos Dy_k^2 e Dx_k^1 , respectivamente.

✓ Informações sobre as fontes de erros a partir de Dy_k^3 e Dx_k^2

Os deslocamentos Dy_k^3 dizem respeito aos efeitos dos erros de ortogonalidade entre os eixos XY, de retilineidade Y(x) e Roll(x) sobre o posicionamento Y da ponta do sensor.

Como dito anteriormente, Dy_k^3 são deslocamentos na direção de Y medidos através do movimento em X em duas montagens com posições Z=0mm e Z=246mm.

Na situação onde o braço em Z é zero a influência, sobre Dy_k^3 , do erro angular Roll(x) também é zero. Assim os valores de Dy_k^3 medidos nesta situação dizem respeito somente aos efeitos dos erros de ortogonalidade XY e de retilineidade Y(x). Corrigindo o desalinhamento desses valores, provocado pelo erro de ortogonalidade XY, pelo método dos mínimos quadrados, obtémse o erro de retilineidade Y(x). Neste caso, o erro de ortogonalidade XY é de aproximadamente 19 segundos e o erro de retilineidade é apresentado no gráfico 6.2 juntamente com as diferenças resultantes da comparação entre os valores calculados e medidos utilizando um sistema interferométrico laser.

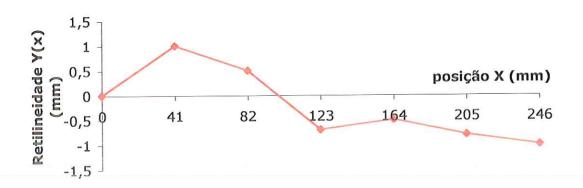


Gráfico 6.2a. Erro de Retilineidade Y(x)

No gráfico 6.2a pode-se observar a curva que apresenta os valores do erro de retilineidade Y(x) para diferentes posições X. Pode-se notar que, aproximadamente, na metade do eixo o erro muda de sinal.

O gráfico 6.2b apresenta as diferenças obtidas através da comparação entre os erros calculados e medidos. Pode-se observar, através do gráfico 6.2b, que as diferenças estão distribuídas aleatoriamente em torno de zero e seu maior valor é de 0,3 μm para um erro de 1μm.

Entretanto ao medir Dy_3^k com o esquadro mecânico posicionado sobre o desempeno da MM3C, ou seja, numa montagem realizada com o braço Z máximo, a influência do erro angular Roll(x) nos valores desses deslocamentos, também, é máxima.

Assim, a diferença entre os valores Dy_3^k , para uma mesma posição X, medidos com as duas montagens é somente a influência do erro angular Roll(x) sobre o posicionamento na direção Y. Portanto, para o cálculo do erro angular Roll(x) basta dividir as diferenças entre Dy_3^k medidos nas duas montagens pelo respectivo braço na direção Z.

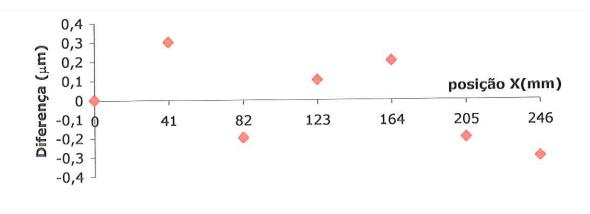


Gráfico 6.2.b. Diferenças entre o erro calculado e medido

O gráfico 6.3 apresenta a curva do erro Roll(x) bem como o gráfico das diferenças obtidas através da comparação entre os valores medidos, utilizando um nível eletrônico, e calculados.

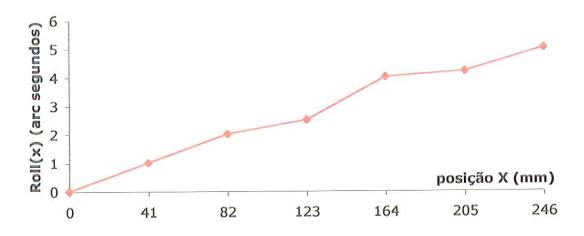


Gráfico 6.3 a. Erro angular Roll do eixo X

No gráfico 6.3a pode-se observar a curva que apresenta os valores do erro angular Roll(x) para diferentes posições X.

O gráfico 6.3b apresenta as diferenças obtidas através da comparação entre os erros calculados e medidos utilizando um nível eletrônico.

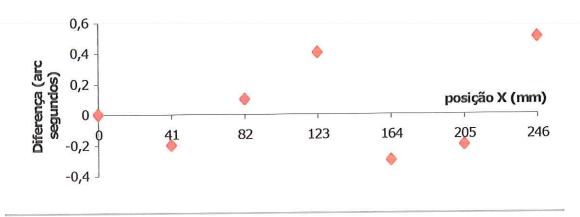


Gráfico 6.3.b. Diferenças entre o erro calculado e medido

Pode-se observar que as diferenças estão distribuídas aleatoriamente em torno de zero e seu maior valor é de 0,5 μ m para um erro de 5 μ m.

O mesmo pode ser feito para os deslocamentos Dx_k^2 que referem-se aos erros de ortogonalidade XY, retilineidade X(y), Yaw(y) e Roll(y).

A curva do erro angular Roll(y), apesar da presença do erro angular Yaw(y), é obtida utilizando o mesmo princípio descrito anteriormente para o erro Roll(x). Isto porque o erro angular Yaw(y) tem sua influência sobre Dx_k^2 constante, para uma mesma posição Y, por estar multiplicado por um braço fixo. Assim, ao fazer a diferença entre os valores de Dx_k^2 , medidos nas duas montagens, a influência do erro angular Yaw(y) é eliminada.

✓ Informações sobre as fontes de erros a partir de Dy_k^4 , Dx_k^3

Os deslocamentos Dy_k^4 referem-se aos efeitos da ortogonalidade YZ, da retilineidade de Z na direção de Y e do erro angular Picht (z) sobre o posicionamento, em Y, da ponta do sensor. Já os deslocamentos Dx_k^3 referem-

se aos efeitos do erro angular Yaw(z), da ortogonalidade XZ e da retilineidade X(z) no posicionamento, na direção X, da ponta do sensor.

Os erros de ortogonalidade YZ e XZ podem ser obtidos corrigindo o desalinhamento dos deslocamentos Dy_k^4 , Dx_k^3 , respectivamente. Neste caso o valor do erro de ortogonalidade YZ é de aproximadamente 120 segundos e o do erro de ortogonalidade XZ 12 segundos.

Entretanto, no caso dos deslocamentos Dy_k^4 , não foi possível separar os erros de retilineidade Y(z) do erro angular Pitch(z) por os dois apresentarem um comportamento não linear para uma mesma posição Z. O mesmo pode ser dito para os erros de retilineidade X(z) e Yaw(z).

✓ Informações sobre as fontes de erros a partir de Dz_i^2 e Dz_i^1

Os deslocamentos Dz_2^j referem-se aos efeitos dos erros angulares Pitch(y) e Roll(y) e retilineidade Z(y) no posicionamento, na direção de Z, da ponta do sensor.

Como as curvas dos erros angulares Pitch(y) e Roll(y) foram obtidas anteriormente, subtraindo seus valores para cada ponto de Dz_2^j a curva do erro de retilineidadeZ(y) pode ser obtida.

O mesmo pode ser dito sobre os deslocamentos Dz_1' . Estés deslocamentos referem-se aos efeitos provocados pelos erros de retilineidade $\mathbb{Z}(x)$ e roll(x), sobre o posicionamento da ponta do sensor na direção \mathbb{Z} , sendo que a curva deste último já foi obtida anteriormente.

6.3. O MRSE e a Rastreabilidade

A rastreabilidade, aspecto fundamental nas medições, é garantida na utilização do MRSE como modelo de sintetização de erros para Máquinas de medir a Três Coordenadas através da utilização da Barra de Furos e do Esquadro Mecânico calibrados por instrumentos pertencentes a rede de calibração.

Como dito no capítulo 5, as distâncias entre os centros dos furos foram calibradas em uma Máquina Universal de Medir e as suas incertezas determinadas. Ver apêndice II.

A figura 6.3 mostra a cadeia de rastreabilidade que fica inserida a barra de furos.

Além disso, as incertezas foram devidamente propagadas através das equações do MRSE estimando as incertezas dos erros calculados para pontos coordenados dentro do volume de trabalho da MM3C.

As equações reduzidas do MRSE e o fato das medições terem a mesma natureza, ou seja são todas medidas de deslocamentos, facilitou a estimativa das incertezas. Assim, pode-se dizer que os erros calculados são rastreáveis à unidade fundamental de comprimento, o metro.

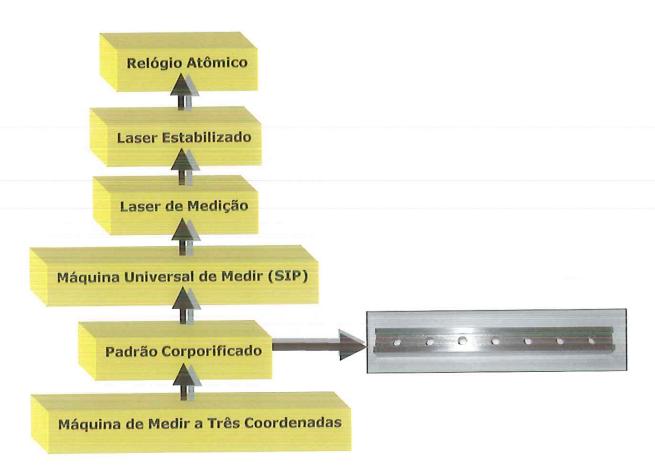


Figura 6.3. Demonstração da Cadeia de Rastreabilidade

6.4. Comparando o MRSE a outros Modelos de Sintetização conhecidos.

Este item apresenta uma comparação do MRSE e da sua técnica de calibração com alguns modelos matemáticos e técnicas de calibração mais difundidos na literatura. Dentre os escolhidos estão a técnica paramétrica e a do volume dividido.

6.4.1. MRSE x Calibração Paramétrica

De acordo com o que foi apresentado no capítulo 2 deste trabalho, a calibração paramétrica é técnica que permite o diagnóstico mais simples das fontes de erro. Isso porque são medidos, direta ou indiretamente, os 21 erros individuais de uma máquina de medir a três coordenadas. Entretanto, como pode ser observado no item 6.1. deste capítulo o MRSE também permite que as influências de cada erro individual da MM3C seja levantado garantindo que o diagnóstico das fontes desses erros, também, seja possível.

A diferença é que a primeira utiliza, para o levantamento dos erros individuais, instrumentação diferente dependendo do erro a ser medido além do que a equação que combina esses erros, para o cálculo de Ex, Ey e Ez, é grande. No caso da equação de Ey e Ex, as equações de sintetização utilizando a técnica paramétrica possuem nove termos cada e a de Ez seis termos. Isso implica em, se cada termo tem uma incerteza associada a propagação dessas incertezas ao longo das equações provavelmente, super-estima a incerteza da MM3C.

Já as equações do MRSE possuem 5,4 e 3 termos para estimar Ey, Ex e Ez respectivamente diminuindo a propagação das incertezas. Além disso, a instrumentação a ser utilizada é bastante simples e acessível. Além das equações serem menores o número de dados a serem levantados também é menor que na técnica paramétrica, sendo medidos o erro de posicionamento em seis geratrizes e medições de deslocamento em cada eixo utilizando o esquadro. Isso reduz o tempo gasto no levantamento de dados do MRSE e conseqüentemente o custo com relação à primeira.

Além disso, a combinação dos dados levantados no caso da calibração paramétrica exige que os erros angulares e os de ortogonalidade ainda sejam multiplicados pelos braços de Abbè. No MRSE os termos da equação já possuem a mesma natureza e, portanto para determinar as componentes do erro volumétrico basta somar os deslocamentos facilitando a realização dos cálculos.

6.4.2. O MRSE x volume dividido

A forma encontrada para "fugir" das equações de sintetização foi a medição das componentes do erro volumétrico através da técnica do volume dividido, como apresentada no capítulo 2.

O volume dividido reduziria a propagação de incertezas da determinação das componentes Ex, Ey e Ez. Entretanto, isso acontece levantando os valores de Ex, Ey e Ez em todas as geratrizes dos planos XY, XZ e YZ e ainda a correção de ortogonalidade em cada uma dessas geratrizes, aumentando enormemente o tempo de calibração.

Até mesmo as tentativas reduzir o número de geratrizes como a apresentada por ORREGO (1999) e descrita no capítulo 2 deste trabalho requerem mais dados que o MRSE sendo que esta última apesar de possuir um número menor de termos da equação, necessita o levantamento de dados em 42 geratrizes além de considerar as correções de ortogonalidade e retilineidade que são necessárias.

6.5. Resultados obtidos com a Aplicação do MRSE

A seguir, estão apresentados os erros de posicionamento da ponta do apalpador, nas direções X, Y e Z, obtidos a partir da aplicação do MRSE na MM3C anteriormente descrita.

Para facilitar a análise das curvas de erros e o entendimento de como foram gerados os mapas de erros optou-se por apresentar os resultados, na seqüência que foram obtidos. Além disso, para cada uma das curvas as estimativas das incertezas padronizadas combinadas são apresentadas.

Para cada direção são apresentados dois planos. Em resumo: para a direção Y o plano XY com Z=0mm e Z=246mm, para a direção X o plano XY com Z=0mm e Z=246mm e para a direção Z o plano XZ com Y=0mm e Y=287mm.

6.1.1. Erros na Direção Y

A equação 5.9 apresentada no capítulo 5 e transcrita abaixo é a equação do MRSE para o cálculo da componente, na direção Y, do erro volumétrico em todo o volume de trabalho da máquina.

$$E_{Y}[P(X_{0},Y_{i},Z_{0})] + Dy_{i}^{1} + Dy_{k}^{2} + Dy_{k}^{3} + Dy_{k}^{4} = E_{Y}[P(X_{i},Y_{j},Z_{k})]$$
(6.1)

Inicialmente optou-se por gerar o mapa de erros da componente Y do erro volumétrico para o plano XY com Z= 0mm.

O primeiro termo da equação 6.1. corresponde ao erro de escala do eixo Y e o gráfico 6.4. apresenta seu valor bem como sua incerteza padronizada combinada.

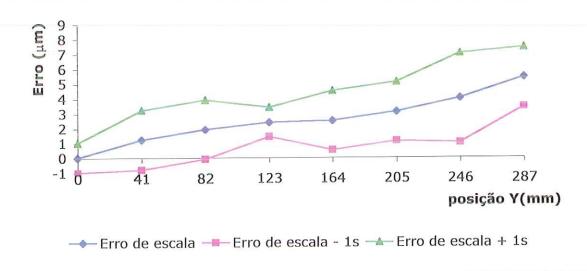


Gráfico 6.4. Erro de Escala do Eixo Y

Ao erro de escala acrescenta-se o segundo termo da equação 6.1, ou seja, os deslocamentos Dy_i^1 . O gráfico 6.5. apresenta os resultados desse acréscimo.

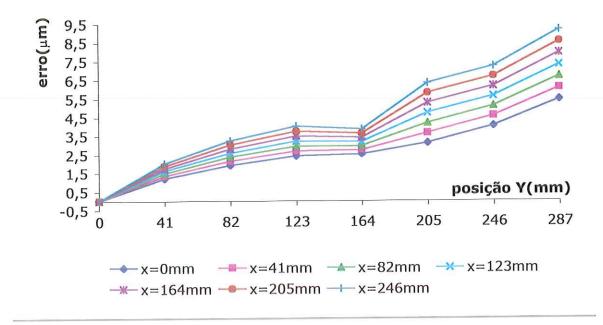


Gráfico 6.5. Erro de Escala + Dy_i^1

No gráfico 6.5. pode-se observar que as curvas de erros apresentam forma e inclinação similares e que os valores dos erros crescem ao longo do eixo Y. Além disso, pode-se notar que os valores são positivos e proporcionais à posição X o que pode ser explicado pelo fato dos deslocamentos Dy_i^1 , para uma mesma posição Y, serem positivos e também proporcionais à posição X.

A tabela 6.1 apresenta as incertezas padronizadas combinadas para os erros apresentados no gráfico 6.5.

		Coordenada Y											
$G(X_i)$	0	41	82	123	164	205	246	287					
X=0	1,4	2,8	2,8	1,4	2,8	2,9	2,2	2,8					
X=41	1,4	2,6	2,8	2,2	2,2	2,8	2,8	2,8					
X=82	1,1	2,8	2,8	3,1	2,5	2,2	2,2	2,8					
X=123	1,4	2,5	2,9	3,1	2,5	2,2	2,5	3,2					
X=164	1,8	2,2	2,9	2,2	3,2	2,2	3,2	2,2					
X=205	2,2	2,8	2,2	3,1	2,3	3,2	2,5	2,2					
X=246	1,4	3,2	2,2	3,1	2,8	2,2	2,6	2,8					

Tabela 6.1. Incerteza Padronizada Combinada (µm)

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

O cálculo da incerteza dos deslocamentos Dy_i^1 permitiu perceber que quanto mais afastadas estiverem as duas posições de medição menor é a influência de eventuais variações nas medidas das distâncias, entre os centros dos furos da barra, na incerteza final. Isso ocorre porque o coeficiente de sensibilidade, com relação às medidas das distâncias, torna-se menor, conforme pode ser observado nas equações apresentadas na tabela 5.3.

Com o acréscimo dos deslocamentos Dy_k^2 aos valores apresentados no gráfico 6.5 obtém-se o gráfico 6.6. Pode-se observar que, nem a forma das curvas nem os valores dos erros foram modificados em comparação aos apresentados no gráfico 6.5. Isso se deve ao fato dos deslocamentos Dy_k^2 corresponderem à influência do erro angular Pitch(y) sobre o posicionamento em Y da ponta do sensor e esta influência ser proporcional a braços Z, que neste caso são 0mm. Pode-se dizer, então, que quando o braço Z atingir seu valor máximo, ou seja, na posição 246mm ter-se-á o maior valor, em módulo, de Dy_k^2 .

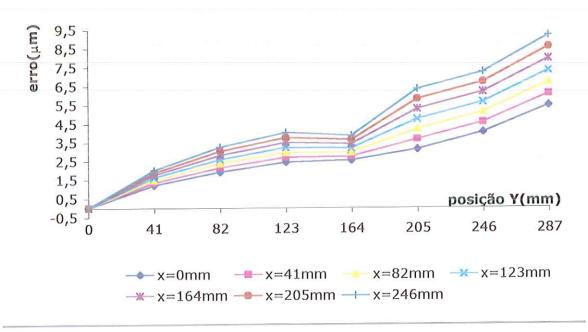


Gráfico 6.6. Erro de Escala + $Dy_i^1 + Dy_k^2$

A tabela 6.2 apresenta as incertezas padronizadas combinadas dos erros apresentados no gráfico 6.6. Pode-se notar que os valores das incertezas

não sofreram um grande acréscimo. O maior aumento foi de 0,3 μm. Isso se deve, também, ao fato do braço ser zero, pois de acordo com os parâmetros propostos na tabela 5.3 os coeficientes de sensibilidade das medições, maior fonte de incerteza, na posição 1 e na posição 2 dependem do braço.

Tabela 6.2. Incerteza Padronizada Combinada (μm)

	Coordenada Y										
G(X _i)	0	41	82	123	164	205	246	287			
X=0	1,4	3,0	2,9	1,7	2,9	3,0	2,4	3,0			
X=41	1,4	2,8	2,9	2,4	2,4	2,9	3,0	3,0			
X=82	1,2	3,0	2,9	3,3	2,6	2,3	2,4	3,0			
X=123	1,4	2,7	3,1	3,3	2,6	2,3	2,7	3,4			
X=164	1,8	2,4	3,1	2,4	3,3	2,3	3,4	2,4			
X=205	2,3	3,0	2,4	3,3	2,5	3,2	2,7	2,4			
X=246	1,4	3,3	2,4	3,3	2,9	2,3	2,8	3,0			

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

O gráfico 6.7. apresenta o acréscimo, aos erros apresentados no gráfico 6.6, dos deslocamentos Dy_k^3 que dizem respeito às influências dos erros de ortogonalidade entre os eixos XY e retilineidade de X na direção de Y e Roll(x) sobre o posicionamento Y da ponta do sensor.

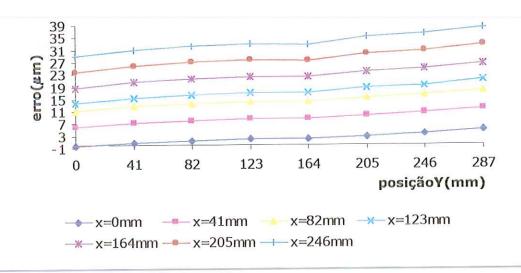


Gráfico 6.7. Erro de Escala $+ Dy_i^1 + Dy_k^2 + Dy_k^3$

Como Dy_k^3 é medido através do movimento em X, ou seja perpendicularmente à direção Y, o valor a acrescentar, à componente Y do erro volumétrico de cada ponto pertencente a uma mesma geratriz $Gy(X_i)$, é uma constante. Portanto, a forma e a inclinação das curvas, apresentadas no gráfico 6.7, não são diferentes daquelas do gráfico 6.6. As curvas foram somente transladadas.

A tabela 6.3 apresenta as incertezas padronizadas combinadas dos erros mostrados no gráfico 6.7. Pode-se notar que o maior aumento em relação aos valores das incertezas apresentados na tabela 6.2. é de 0,2 μ m.

Tabela 6.3. Incerteza Padronizada Combinada (μm)

	Coordenada Y										
$G(X_i)$	0	41	82	123	164	205	246	287			
X=0	1,4	3,0	2,9	1,7	2,9	3,0	2,4	3,0			
X=41	1,5	2,8	3,0	2,5	2,4	2,9	3,0	3,0			
X=82	1,4	3,1	3,0	3,4	2,7	2,5	2,6	3,1			
X=123	1,7	2,8	3,2	3,4	2,7	2,4	2,8	3,4			
X=164	1,9	2,5	3,1	2,5	3,4	2,4	3,4	2,5			
X=205	2,3	3,0	2,4	3,4	2,5	3,3	2,7	2,5			
X=246	1,5	3,4	2,4	3,4	3,0	2,3	2,8	3,0			

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

Finalmente o gráfico 6.8. apresenta a componente Y do erro volumétrico para pontos pertencentes ao plano XY para Z=0mm, ou seja, o gráfico 6.7. acrescido dos deslocamentos Dy_k^4 .

Os deslocamentos Dy_k^4 referem-se aos efeitos da ortogonalidade XZ, da retilineidadeY(Z) e do Picht (z) sobre o posicionamento Y da ponta do sensor.

Como Dy_k^4 é medido através do movimento em Z o valor a acrescentar na componente Y do erro volumétrico é uma constante para todos os pontos pertencentes a um mesmo plano XY . Assim a forma e a inclinação das curvas não são modificadas em comparação as apresentadas no gráfico 6.8.

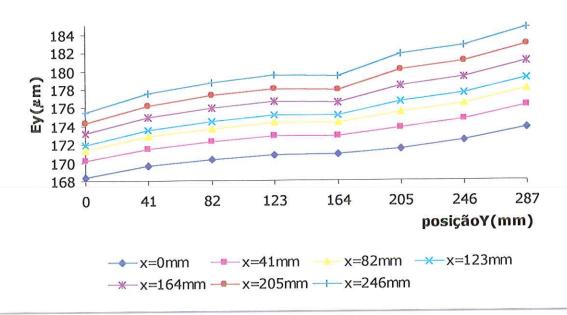


Gráfico 6.8. Ey calculado para o plano XY com Z=0mm

A tabela 6.4. apresenta as incertezas padronizadas combinadas dos erros apresentados no gráfico 6.8.

Tabela 6.4. Incerteza Padronizada Combinada (μm)

	Coordenada Y											
$G(X_i)$	0	41	82	123	164	205	246	287				
X=0	1,6	3,0	3,0	1,8	3,0	3,1	2,5	3,1				
X=41	1,6	2,8	3,0	2,6	2,5	3,0	3,1	3,1				
X=82	1,5	3,1	3,1	3,5	2,8	2,5	2,6	3,2				
X=123	1,8	2,8	3,2	3,5	2,8	2,5	2,9	3,5				
X=164	2,0	2,6	3,2	2,6	3,4	2,4	3,5	2,6				
X=205	2,4	3,1	2,5	3,4	2,6	3,3	2,8	2,6				
X=246	1,6	3,4	2,5	3,4	3,0	2,4	2,9	3,1				

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

Comparando os valores das incertezas apresentados pelas tabelas 6.3 e 6.4 pode-se perceber que o aumento é pequeno, seu valor máximo é de $0.2\mu m$.

Para complementar a análise já feita optou-se por escrever a componente Y do erro volumétrico no plano XY para z=246mm. Para fazer isso os deslocamentos com índice K, ou seja, aqueles que tem seus valores dependentes da coordenada Z devem ser modificados em relação ao

apresentado anteriormente. Neste caso, incluem-se os deslocamentos Dy_k^2 , $Dy_k^3 \in Dy_k^4$.

Como o valor do erro de escala e dos deslocamentos Dy_i^1 não dependem da posição ou da coordenada Z, os gráficos 6.4 e 6.5. não sofrem modificações. Assim, a partir do gráfico 6.6, o valor do deslocamento Dy_k^2 deve ser alterado.

Pode-se notar, através do gráfico 6.9, que o valor de Dy_k^2 não é zero como apresentado no gráfico 6.6. Isso ocorre porque o braço na direção Z é máximo.

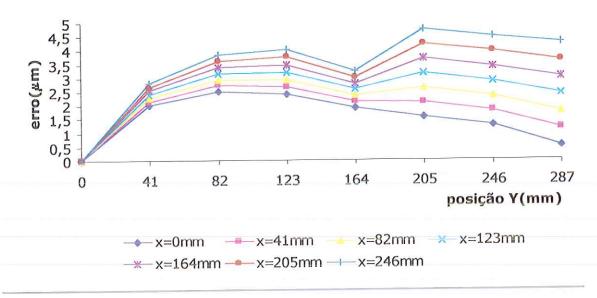


Gráfico 6.9. Erro de Escala $+ Dy_i^1 + Dy_k^2$

As curvas de erros apresentadas no gráfico 6.9. apresentam forma e inclinação similares e os valores dos erros crescem ao longo do eixo X. Entretanto, quando comparadas às curvas do gráfico 6.6. apresentam valores diferentes pela influência dos deslocamentos Dy_k^2 .

Os próximos deslocamentos a serem considerados são os Dy_k^3 , ou seja os deslocamentos em Y da ponta do sensor devido aos erros de ortogonalidade XY, Roll(x) e de retilineidade Y(x).

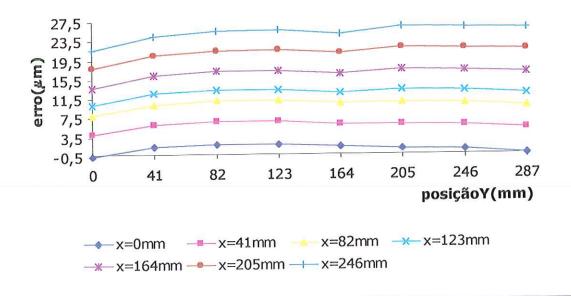


Gráfico 6.10. Erro de Escala + $Dy_i^1 + Dy_k^2 + Dy_k^3$

As mesmas considerações feitas sobre a forma e a inclinação das curvas apresentadas no gráfico 6.7. são válidas para as curvas do gráfico 6.10. Entretanto, pode-se observar que a amplitude dos erros diminuíram devido ao braço Z ser zero e, conseqüentemente, o efeito do erro angular Roll(x), sobre o posicionamento Y, também ser zero.

Acrescentando os deslocamentos Dy_k^4 aos valores apresentados no gráfico 6.10 tem-se o erro de posicionamento na direção de Y no plano YX para z=246mm. Observe o gráfico 6.11.

Como os deslocamentos Dy_k^4 são medidos através do movimento em Z o valor a acrescentar na componente Y do erro volumétrico é uma constante para todos os pontos pertencentes a um mesmo plano XY . Assim a forma e a inclinação das curvas não são modificadas em comparação as apresentadas no gráfico 6.10.

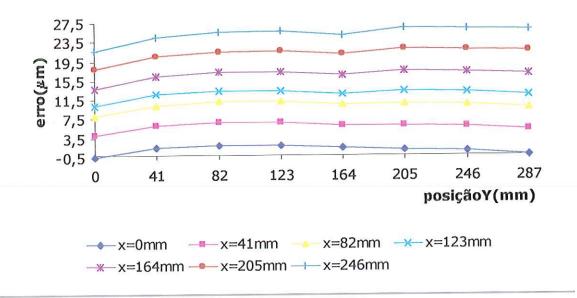


Gráfico 6.11. Ey calculado para o plano XY com Z=246mm

As incertezas padronizadas para os gráficos 6.9.,6.10 e 6.11. não foram apresentadas por não diferirem muito daquelas apresentadas nas tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4.

6.1.2. Erros na Direção X

A equação 5.17 apresentada no capítulo 5 e transcrita abaixo é a equação do MRSE para gerar a componente X do erro volumétrico em todo o volume de trabalho da máquina.

$$E_x[P(X_i, Y_0, Z_0)] + Dx_1^k + Dx_2^k + Dx_3^k = Ex[P(X_i, Y_j, Z_k)]$$
(6.2)

Como descrito no capítulo 5 o MRSE parte do erro de escala para calcular Ex de pontos pertencentes às geratrizes $Gx(Y_I)$ dos planos XY para diferentes coordenadas Z, portanto o erro de escala do eixo X, bem como sua incerteza padronizada combinada, estão apresentadas no gráfico 6.12.

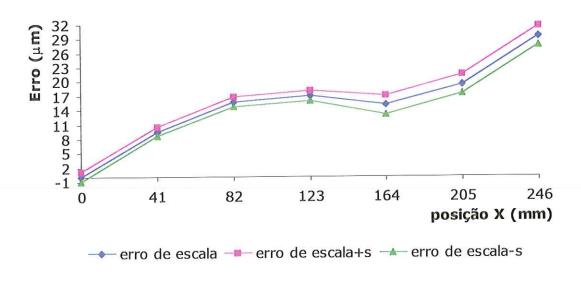


Gráfico 6.12: Erro de Escala do Eixo X

Inicialmente optou-se por gerar os mapas de erros para a componente X do erro volumétrico para pontos sobre o plano XY com Z=0mm.

Com o acréscimo dos deslocamentos Dx_k^1 , apresentado no gráfico 6.13, os erros dos pontos ao longo das geratrizes dos planos XY são mostrados.

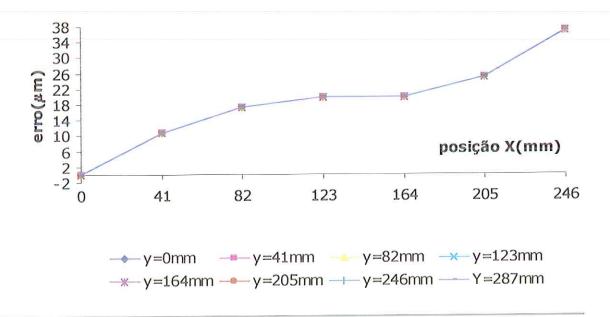


Gráfico 6.13. Erro de Escala + Dx_k^1

Pode-se observar no gráfico 6.13 os erros na direção X possuem o mesmo valor para diferentes geratrizes Gx(Yj). Isso ocorreu porque os deslocamentos Dx_k^1 dizem respeito às influências do erro angular Pitch(x) sobre o posicionamento da ponta do apalpador que são proporcionais a braços na direção Z. Como o gráfico 6.13 representa os erros de posicionamento de pontos pertencentes a um mesmo plano XY o valor a acrescentar independe da posição Y.

A tabela 6.5 apresenta as incertezas padronizadas combinadas para os erros apresentados no gráfico 6.13.

Tabela 6.5. Incerteza Padronizada Combinada (μm)

	Coordenada X										
$G(X_i)$	0	41	82	123	164	205	246				
Y=0	2,2	1,3	2,6	1,4	1,3	1,7	1,8				
Y=41	2,2	1,3	2,6	1,4	1,3	1,7	1,8				
Y=82	2,2	1,3	2,6	1,4	1,3	1,7	1,8				
Y=123	2,2	1,3	2,6	1,4	1,3	1,7	1,8				
Y=164	2,2	1,3	2,6	1,4	1,3	1,7	1,8				
Y=205	2,2	1,3	2,6	1,4	1,3	1,7	1,8				
Y = 246	2,2	1,3	2,6	1,4	1,3	1,7	1,8				
Y=287	2,2	1,3	2,6	1,4	1,3	1,7	1,8				

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

Pode-se notar, pelos valores apresentados na tabela 6.5. que da mesma forma que os valores dos erros as suas incertezas também são iguais.

O gráfico 6.14 apresenta o acréscimo dos deslocamentos Dx_k^2 aos valores do gráfico 6.13. Os deslocamentos Dx_k^2 dizem respeito às influências dos erros de ortogonalidade XY, retilineidade X(y), Yaw(y) e Roll(y) sobre o posicionamento, na direção X, da ponta do apalpador.

Como Dx_k^2 é medido através do movimento em Y, ou seja perpendicularmente à direção X, o valor a acrescentar a componente X do erro volumétrico de cada ponto, pertencente a uma mesma geratriz $Gx(Y_{ij})$ é uma constante. Portanto, a forma e a inclinação das curvas, apresentadas no gráfico 6.14, não são diferentes daquelas do gráfico 6.13.

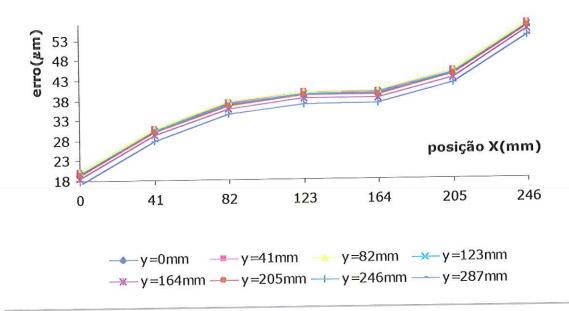


Gráfico 6.14: Erro de Escala + $Dx_k^1 + Dx_k^2$

A tabela 6.6 apresenta as incertezas padronizadas combinadas para cada erro apresentado no gráfico 6.14.

Tabela 6.6. Incerteza Padronizada Combinada (μm)

	Coordenada X											
$G(X_i)$	0	41	82	123	164	205	246					
Y=0	2,4	1,6	2,8	1,8	1,6	2,0	2,0					
Y=41	2,3	1,6	2,8	1,7	1,6	1,9	2,0					
Y=82	2,3	1,5	2,7	1,6	1,5	1,9	2,0					
Y=123	2,4	1,6	2,7	1,8	1,5	1,8	2,0					
Y=164	2,4	1,6	2,7	1,8	1,5	1,8	2,0					
Y=205	2,3	1,6	2,7	1,8	1,5	1,8	2,0					
Y=246	2,3	1,6	2,7	1,8	1,5	1,8	2,0					
Y=287	2,4	1,6	2,8	1,8	1,6	2,0	2,0					

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

O gráfico 6.15 apresenta o acréscimo dos deslocamentos Dx_k^3 aos valores do gráfico 6.14. Com isso, obtém-se a componente X do erro volumétrico para o plano XY com Z=0mm.

Como os deslocamentos Dx_k^3 são medidos através do movimento em Z o valor a acrescentar na componente X do erro volumétrico é uma constante para todos os pontos pertencentes a um mesmo plano XY . Assim a forma e a

inclinação das curvas do gráfico 6.15 não são modificadas em comparação as apresentadas no gráfico 6.14.

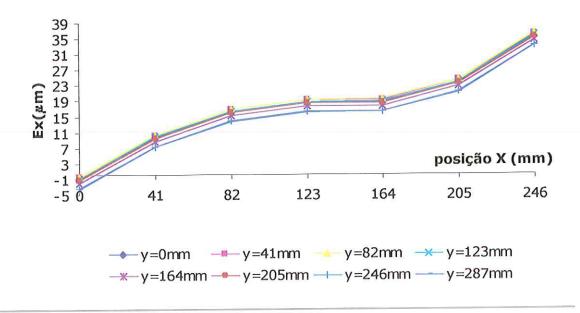


Gráfico 6.15: Ex no plano XY para Z=0mm

A tabela 6.7. apresenta as incertezas padronizadas combinadas para os valores da componente X do erro volumétrico apresentados no gráfico 6.15.

Tabela 6.7. Incerteza Padronizada Combinada (μm)

	Coordenada X										
$G(X_i)$	0	41	82	123	164	205	246				
Y=0	2,5	1,8	2,9	1,9	1,8	2,1	2,2				
Y=41	2,4	1,7	2,9	1,8	1,7	2,0	2,1				
Y=82	2,4	1,7	2,8	1,8	1,7	2,0	2,1				
Y=123	2,5	1,7	2,8	1,9	1,7	1,9	2,2				
Y=164	2,5	1,7	2,8	1,9	1,7	1,9	2,2				
Y=205	2,4	1,7	2,8	1,9	1,7	1,9	2,2				
Y=246	2,4	1,7	2,8	1,9	1,7	1,9	2,2				
Y=287	2,5	1,8	2,9	1,9	1,8	2,1	2,2				

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

Para complementar a análise já feita, e ainda demonstrar como gerar Ex para os planos XY com $Z\neq 0$ mm optou-se por escrever a componente X do erro volumétrico para pontos pertencentes ao plano XY com Z=246mm. Como no caso anterior, ao fazer isso os valores dos deslocamentos com índice k devem ser alterados.

Assim, a partir do gráfico 6.13, os valores dos deslocamentos Dx_k^2 devem, ser alterados , observe o gráfico 6.16.

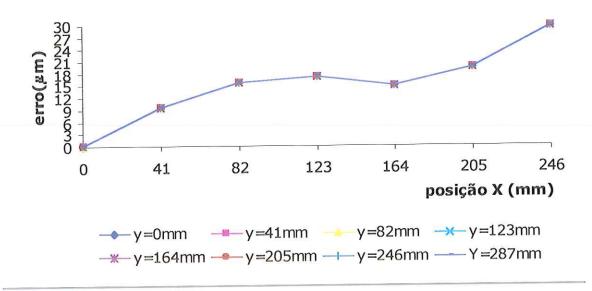


Gráfico 6.16. Erro de Escala + Dx_k^1

As mesmas considerações feitas sobre o comportamento das curvas apresentadas no gráfico 6.13 são válidas para o gráfico 6.16.

Além disso, pode-se observar que os valores dos erros, para uma mesma posição X, são maiores quando comparados aos valores apresentados no gráfico 6.13.

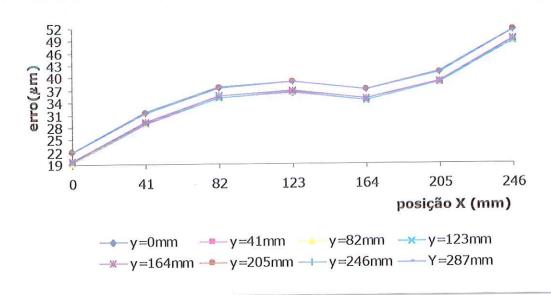


Gráfico 6.17. Erro de Escala + $Dx_k^1 + Dx_k^2$

Comparando os erros apresentados no gráfico 6.17. com os mostrados no gráfico 6.14 pode-se observar uma alteração nos valores do erro para X=0mm. A razão disso é que, no caso do gráfico 6.17, o braço em Z é zero, portanto, a influência do erro angular Roll(y) no erro de posicionamento da ponta do apalpador é, também, nula

Finalmente o gráfico 6.18 a componente X do erro volumétrico para o pontos pertencentes ao plano XY com Z=246mm.

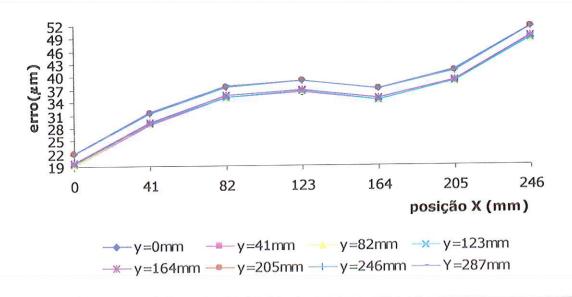


Gráfico 6.18. Ex no plano XY para Z=246mm

Pode-se observar que os valores sofreram uma redução com relação aos apresentados no gráfico 6.18. Isso de deve, em grande parte, à redução do efeito do erro de ortogonalidade XZ, sobre o posicionamento na direção X da ponta do sensor, que é proporcional a um braço na direção Z.

As incertezas padronizadas para os gráficos 6.17. e 6.18 não foram apresentadas por não diferirem muito daquelas apresentadas nas tabelas 6.6 e 6.7.

6.1.3. Erros na Direção Z

A apresentação dos resultados obtidos para o eixo Z será feita da mesma forma que as dos outros dois eixos, ou seja, apresentando o erro de escala e, em seguida, acrescentando os erros medidos.

O gráfico 6.19 apresenta o erro de escala do eixo Z, bem como sua incerteza padronizada combinada.

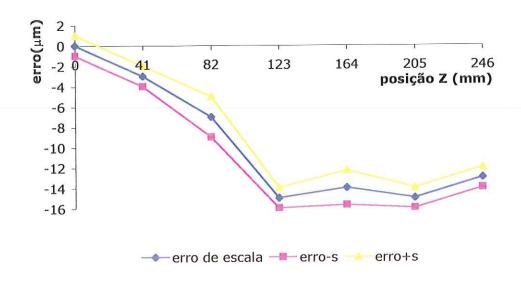


Gráfico 6.19 Erro de Escala do Eixo Z

Determinado o erro de escala, a equação 5.23 apresentada no capítulo 5 e transcrita a seguir é a equação do MRSE para gerar a componente Z do erro volumétrico em todo o volume de trabalho da máquina.

$$E_{Z}[P(X_{0}, Y_{0}, Z_{k})] + Dz_{i}^{1} + Dz_{j}^{2} = E_{Z}[P(X_{i}, Y_{j}, Z_{k})]$$
(6.3)

O gráfico 6.20 apresenta os erros de posicionamento da ponta do sensor, na direção Z, com o erro de escala acrescido dos deslocamentos Dz_i^1 .

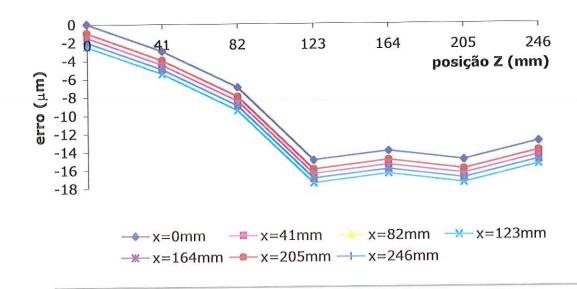


Gráfico 6.20 Erro de Escala $+Dz_i^1$

No gráfico 6.20 pode-se observar que as curvas apresentam forma e inclinação similares e os valores dos erros, no geral, crescem ao longo do eixo Z. Além disso pode-se notar que os valores dos erros são negativos, porém, não são proporcionais à posição X, o que pode ser explicado conhecendo-se os erros que compõem os deslocamentos Dz_i^1 .

Os deslocamentos Dz_i^1 são compostos pelos efeitos dos erros de retilineidadeZ(x) e Roll(x), sobre a componente Z do erro volumétrico, que não são lineares para diferentes posições X o que explica a não proporcionalidade citada acima.

A tabela 6.8. apresenta as incertezas padronizadas combinadas dos erros apresentados no gráfico 6.20.

G(X _i)	Coordenada Z									
	0	41	82	123	164	205	246			
X=0	1,3	1,3	2,2	1,3	1,9	1,3	1,3			
X=41	1,3	1,3	2,2	1,3	1,9	1,3	1,3			
X=82	1,1	1,1	2,1	1,1	1,8	1,1	1,1			
X=123	1,2	1,2	2,1	1,2	1,8	1,2	1,2			
X=164	1,3	1,3	2,2	1,3	1,9	1,3	1,3			
X=205	1,2	1,2	2,1	1,2	1,8	1,2	1,2			
X=246	1.1	1,1	2,1	1,1	1,8	1,1	1,1			

Tabela 6.8. Incerteza Padronizada Combinada (μm)

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

O gráfico 6.21 apresenta o acréscimo dos deslocamentos Dz_j^2 aos valores apresentados no gráfico 6.20.

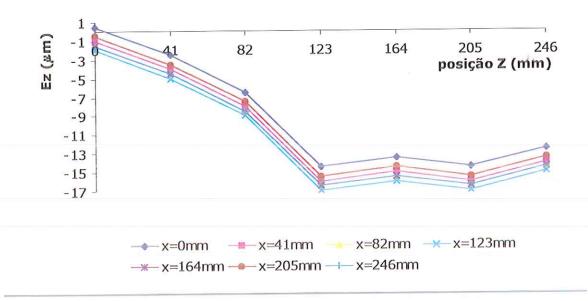


Gráfico 6.21 Ez para o plano XZ com Y=0mm

Comparando as curvas apresentadas nos gráficos 6.20 e 6.21 pode-se dizer que elas apresentam a mesma forma e inclinação. E, da mesma forma que as apresentadas no gráfico 6.20 pode-se dizer que as curvas do gráfico 6.21 não são proporcionais à posição X devido a razões semelhantes.

A tabela 6.9 apresenta a estimativa da incerteza padronizada combinada para os valores dos erros apresentados no gráfico 6.21.

Tabela 6.9. Incerteza Padronizada Combinada (μm)

G(X _i)	Coordenada Z									
	0	41	82	123	164	205	246			
X=0	1,4	1,4	2,2	1,4	2,0	1,4	1,4			
X=41	1,4	1,4	2,2	1,4	2,0	1,4	1,4			
X=82	1,4	1,4	2,2	1,4	1,9	1,4	1,4			
X=123	1,5	1,5	2,3	1,5	2,0	1,5	1,5			
X=164	1,4	1,4	2,2	1,4	1,9	1,4	1,4			
X=205	1,4	1,4	2,2	1,4	1,9	1,4	1,4			
X=246	1,2	1,2	2,1	1,2	1,8	1,2	1,2			

Os valores em vermelho representam o menor e o maior valor estimado para a incerteza dos erros.

Complementando a análise já realizada, e ainda demonstrar como escrever a componente Z do erro volumétrico para planos XZ com Y≠0mm, o cálculo de Ez para o plano XZ com Y=287mm foi feito.

Como a coordenada Y do plano foi alterada somente os deslocamentos Dz_i^2 deve ser alterado

O gráfico 6.22 apresenta a componente Z do erro volumétrico para os pontos pertencentes ao plano XZ com Y=287mm.

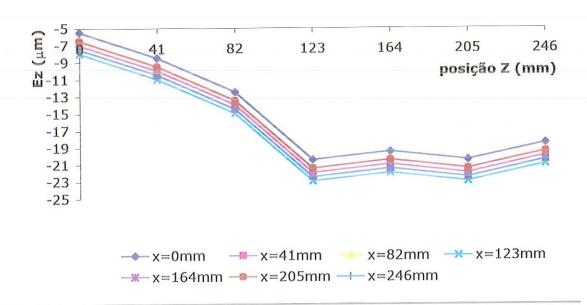


Gráfico 6.22 Ez para o Plano XZ com Y=287mm

Através da comparação entre os gráficos 6.22 e 6.21 pode-se dizer que, apesar das curvas apresentarem a mesma forma os pontos iniciais de cada uma foram deslocados devido a influência da coordenada Y.

6.6. Avaliação da Utilização da Barra de Furos como Artefato Padrão

A utilização de um artefato mecânico para calibração de erros é uma proposta interessante visto que permite considerar o sistema de sondagem do equipamento que é parte obrigatória na sua utilização.

A utilização da barra de furos como artefato para o levantamento de dados para o MRSE mostrou-se ainda gratificante por ser um artefato simples, fácil de ser fabricado e manuseado.

Alguns pontos positivos da utilização da barra de furos são levantados a seguir:

- ✓ Grande facilidade de manuseio e posicionamento no volume de trabalho da máquina, mesmo quando a barra está biapoiada a forma da secção transversal minimiza as deformações;
- ✓ Facilidade na fabricação não necessitando de tolerâncias geométricas muito estreitas. Os efeitos desses erros macro e microgeométricos podem ser minimizados sendo exemplos: a falta de um acabamento superficial de alta qualidade das paredes internas dos furos pode ser eliminado pela utilização de um apalpador com diâmetro adequado, o desvio de circularidade dos furos também pode ser minimizado se um número elevado de pontos for tomado.
- ✓ O fato de tomar vários pontos para determinar o centro do furo e o diâmetro dos furos ser relativamente grande faz com que uma possível influência de erros cíclicos seja minimizada. Observe a figura 6.4

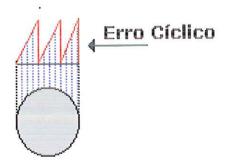


Figura 6.4. Erro Cíclico

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões para trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentado um novo modelo de sintetização de erros, o Modelo Reduzido de Sintetização de Erros (MRSE), para MM3Cs.

A literatura sobre o assunto, consultada na revisão bibliográfica, destacou a necessidade de modelos matemáticos que permitam sintetizar os erros em MM3Cs de forma eficiente, rápida e de baixo custo.

O MRSE permite calcular o erro de posicionamento, em qualquer direção X, Y ou Z, de qualquer ponto coordenado a partir de erros medidos em 15 geratrizes. Além disso, possui equações de sintetização, para Ex, Ey e Ez, reduzidas, em comparação à outros modelos conhecidos. Necessita de pouco tempo de calibração o que reduz o custo desta atividade, possibilita o diagnóstico das fontes de erros e garante a rastreabilidade dos erros calculados.

O modelo proposto foi aplicado em uma Máquina de Medir, tipo ponte móvel, e envolveu a realização de ensaios planejados cuidadosamente e executados utilizando a barra de furos e um esquadro mecânico.

Em todas as etapas do ensaio, foram calculadas as incertezas padronizadas combinadas com a finalidade de verificar a qualidade dos resultados obtidos.

Finalmente, os erros sintetizados, através do MRSE, foram comparados aos obtidos através da medição da barra de furos calibrada. Esta comparação foi realizada para valores de erros sintetizados e medidos nos extremos, região onde devem ocorrer os maiores erros de previsão do modelo, e no centro do volume de trabalho, local onde a maioria das medições, utilizando a MM3C, é normalmente realizada.

Da aplicação do Modelo Reduzido de Erros e da sua comparação a outros modelos conhecidos as seguintes conclusões foram obtidas:

- ✓ A eficiência de prever erros do MRSE, para prever erros, é de 91% para erros bastante pequenos, isto é, da ordem de 10μm e 98% para 100μm, sendo que as diferenças observadas entre o erro medido e o sintetizado nos extremos e no centro do volume de trabalho da MM3C, para todos os eixos, estavam no intervalo entre 1 e 2μm. Além disso, os resíduos distribuídos aleatoriamente em torno de zero demonstram que não há parcelas de erros sistemáticos que não foram consideradas.
- ✓ as equações do MRSE, quando comparadas a modelos de sintetização que combinam erros individuais, possuem um número menor de termos. Para uma MM3C tipo ponte móvel, a equação de sintetização, construída através da técnica de transformações homogêneas, de Ex e Ey possuem 9 termos cada e a de Ez, seis. Já as equações de Ey, Ex e Ez, do MRSE, possuem 5, 4 e 3 termos respectivamente. Se cada termo possui uma incerteza associada vale dizer que um menor número de termos diminui a propagação de incerteza no cálculo dos erros da MM3C, já que todos os termos possuem coeficientes de sensibilidade constantes;
- ✓ cada termo do MRSE representa um agrupamento de erros individuais, o que diminuiu o número de montagens experimentais necessárias em levantados em comparação a modelos, tais como, volume dividido total

- ou parcial e técnica paramétrica. Isso reduz o tempo de levantamento de dados e consequentemente o custo da calibração;
- mesmo com número reduzido de termos, o MRSE, através de simples comparações, permite o diagnostico das fontes de erros o que torna o MRSE bastante interessante aos fabricantes de MM3Cs;
- ✓ a utilização da barra de furos e do esquadro, calibrados com instrumentos pertencentes a cadeia de rastreabilidade atende aos requisitos de rastreabilidade. Assim, os erros medidos e calculados são rastreáveis à unidade fundamental;
- ✓ o MRSE pode ser aplicado a outras configurações de MM3Cs, guardadas as devidas diferenças de estruturas que alteram os vetores de erros e, consequentemente, os grupos de erros formados;
- ✓ a utilização de um artefato mecânico para a calibração da MM3C permite que o sistema de sondagem e a estratégia de medição adotada sejam considerados, visto que, inserem incertezas ao sistema influenciando na qualidade das medições realizadas nestes equipamentos.
- ✓ durante a medição das distâncias entre os centros dos furos, vários pontos, ao longo da parede interna de cada furo, foram levantados. Se cada ponto sofre diferentes influências dos erros cíclicos e o diâmetro dos furos permite que mais de um ciclo ocorra, o cálculo do centro utilizando todos esses pontos minimiza o efeito desse erro;
- ✓ a influência da rugosidade superficial da parede interna dos furos, nas medições, pode ser eliminada escolhendo-se corretamente o diâmetro do apalpador. Da mesma forma, as influências dos erros de forma dos furos são minimizadas quando um número conveniente de pontos é tomado.

- ✓ Devido a facilidade de fabricação e calibração do artefato o seu custo é menor que outros artefatos, diminuindo ainda mais o custo da calibração. Em uma escala crescente de custo, de 1 a 5, a calibração utilizando a barra de furos seria 1 contra 5 da placa de esferas.
- ✓ O artefato é fácil de ser manuseado e posicionado quando comparados com padrões tridimensionais, como as placas de esferas e de furos devido ao seu tamanho e peso reduzidos em comparação a estes últimos.

Durante o desenvolvimento deste trabalho diferentes propostas para trabalhos futuros surgiram. São elas:

- ✓ A aplicação da metodologia apresentada para diferentes estruturas de MM3Cs;
- ✓ Desenvolvimento de um sistema de compensação de erros para a máquina de medir a três coordenadas que utilize o MRSE e a técnica de calibração apresentada;
- ✓ Construção de um esquadro mecânico através de montagens com a barra de furos;
- ✓ Verificação da influência da temperatura na aplicação da técnica de calibração e do MRSE.

Referências Bibliográficas

ABACKERLI, A..MIGUEL, P.A.C. "Máquina Virtual: uma solução viável para a estimativa de incertezas na medição por coordenadas" **Máquinas e Metais** abril/maio. 1997

ANANDA, M.V. "Residual error compensation of a vision-basead coordinate measuring machine" Dissertação. The University of North Carolina. Charlotte, United State. 1992

ANTHONY, D.M. " Engineering Metrology". Pergamon Press.Oxford. 1986.

ASME B89.1.12, Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines. 1990.

BALSAMO, A.. et al. "Results of the CIRP-Euromet Intercomparison of Ball Plate – based Techniques for Determining CMM Parametric Erros ". Annals of the CIRP. Vol 46 p. 463 a 466 . 1997.

BALSAMO, A. et al "Towards Instrument-oriented calibration of CMMs" Annals of the CIRP. Vol. 45. 1996.

BARAKAT, N. A., ELBESTAWI, A. D. & SPENCE, A. D.. Kinematic and Geometric error compensation of a coordinate measuring machine. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing.** V.40, p.833-850. 2000.

BICUDO, L.A.M.de C. "Compensação de Erros Dimensionais para Retificadoras Cilíndricas Utilizando Redes Neurais". Tese. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.1997.

BREYER, K.H. PRESSEL, H.G. " Paving the way to thermally stable coordinate measuring machines" s.n.t, p.56-76. 1989

BRYAN, J.B. " The Abbè principle revisited and updated interpretation." **Precision Engineering**. V.1, n.1, p.129-132. 1979.

BRYAN, J.B. A simple meted for testing measuring machines and machines tools. Part 2: Construction details. **Precision Engineering.** Abril. 1982

BS 6808 - Coordinate Measuring Machines. Parte III Code of Pratice.
British Standards Intitution. 1989

CARDOZA, J.A.S. "Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas". Tese. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.1995.

CHEN, J.S. & LING, C. C.. Improving the machine accuracy through machine tool metrology and error correction. INT. J. Adv. Manufaturing Technology., v.1, n.3, 198-205. 1996.

CMMA: Coordinate Measuring Machines Manufaturing Association. London 1989.

CIPM: COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES Recomendação INC-1. 1980

DIETRICH, C. F. **Uncertainty, calibration and probability.** London, Adam Hilger. 1973.

DI GIACOMO, B..MARTINEZ ORREGO, R.M.. VIEIRA SATO, D. P. "Na Exploratory study about the second order errors in mathematical models of coordinate measuring machines" **Metrocal**. Abril .1997.

DI GIACOMO, B. " Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric erros in coordinate measuring machine".

Tese. University of Manchester Institute of Science and Tecnology. 1986.

DOMEZ M.A, et alli. "A General Methodology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation". Precision Engineering. Vol 8. P.187-196. 1986.

DUFFIE, N.A., MALMBERG, S.J. "Error Diagnosis and Compensation Using Kinematic Models and Position Error Data". In: Anais do CIRP. Vol 36. P. 355-358.1987.

DUFFIE, N.A., YANG, S. "Generation of Kinematic Error Correction Funtions from Volumetric Error Measuraments". In: Anais do CIRP. Vol 35. P. 435-438.1985.

DUFFY, J., "Analysis of Mechanisms and Robot Manipulators". John Wiley Publishers. 1980

EVANS, C., HOCKEN, R.,ESTLER, W. T.. Self Calibration: Reversal, redundancy, error separation and absolute testing. **Annals of the CIRP**, v.45/2. 1996

FERREIRA, P.M.LIU,C.R. "An Analytical Quadratic Model for the Geometric Error of a Machine Tool". Journal of Manufaturing Systems. Vol 5. p. 51-62.1980.

FERREIRA, P.M.LIU,C.R. "A Method for Estimating and Compensating Erros of Machine Tools". Journal of Engineering for Industry. Vol 115. p. 149-159.1993.

FRENCH,D., HUMPHRIES,S.H., "Compensation for Backlash and Alignment Errors in a Numerically Controlled Machine Tool a Digital Computer Program" MTDR. **Conference Proceedings**. Vol 8. Nº 2 p.707-726.1967

GODEC, Z. Standard uncertainty in each measurement result explicit or implicit. Measurement. V.20 n.2 pp.97-101. 1997

HARVIE, A. "Factors affecting component measurement on coordinate measuring machines". **Precision Engineering**. V.8, n.1, p.13-18.1986

HOCKEN, R.J. **Technology of Machine Tools, vol.5: Machine Tools Accuracy.** Lawrence Livermore Laboratory, report n.UCRL – 52960-5, 1-85, 1980.

HOCKEN, R., et al , "Three Dimensional Metrology". **CIRP Annals**, Vol.26. p. 403-408.1977

HOFER, E. When to separate uncertainties and when not to separate.

Reliability Engineering and System Safety. P.113-118. 1996

HUNT, K.H. Special Configurations os Robot Arms via Screw Theory", **Robotic**, v.4, p.171-179.1986

ISO. Proposed Draft Standart Part 1 - 1989 (E), Doc ISI/TC 3/WG10/N77.

ISO 10360-2: Methods for the assessment of the Performance and verification of Co-ordinate Measuring Machines. 1994

INMETRO. Guia para Expressão das Incertezas de Medição. Janeiro 1999.

INSTONE, I. Simplified method for assessing uncertainties in a commercial production environment. **Test & Measurement. Metrology Forum.** www.uktm.external.hp.com/mikehut/icepaper/iee2.html. 25/02/99.

JIS B 7440: Test Code for accuracy of Coordinate measuring Machines, 1987.

KNAPP et al. "Metrology Standards News "Precision Engineering vol 13 n.4.p 277-291. 1991.

JENQ, S.C., LING, C.C. "Improving the Machine Accuracy Through Machine Tool Metrology and Error Correction" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.V.11.p.198-205.1996

KNAPP,W., et alli. Comparison of Different Artefacts for Interim Coordinate-measuring Machine Checking: a report from the swiss standards committee.

Journal of the American Society for Precision Engineering, 13(4), outubro (1991)

KUNZMANN, H.. et al. " Já há como rastrear as medições com máquinas de coordenadas ". **Máquinas e Metais** .Agosto. p. 74-85. 1994.

KUNZMANN, H. WÄLDELE, F., NI, J., Accuracy Enhancement, IN: BOSCH, J. A. Coordinate measuring Machines and Systems. New York. Marcel Dekker, Inc., 1995.

KUNZMANN, H. WÄLDELE,F. "On testing coordinate measuring machines (CMM) with kinematic reference standards (KRS). **Annals of the CIRP**, 32(1), p. 465-468.1983.

KRENG, V.B..LIU, C.R.. CHU, C.N.."A kinematic model for machine tool accuracy characterization. **Int I Adv Manuf. Technol**, n° 9, p 79-86. 1994.

LIM, et al. "A two dimensional test body for calibration of coordinate measuring machines". **Precision Engineering**. Vol 10 p 153-156.1989

LINK, W. Metrologia Mecânica. Expressão da Incerteza de Medição. PROGRAMA RH METROLOGIA. 1997

LOVE,W.J.& SCARR, A.J.. The determination of the volumetric accuracy of multi axis machines. **Proceedings of 14th. MTDR Conference.**p.307-315. 1973.

MARTINEZ ORREGO, R.M.. Método de Calibração Direta para Máquinas de Medir a Três Coordenadas. Tese. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.1999.

MEREDITH, D.R. Improving the vibration resistance of CMMs. www.bwnshp.com/ms/archive/mgf4ar13.html 10/11/1997.

NIST TECHNICAL NOTE 1297. Guide lines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results. National Institute os Standards and Technology. 1994.

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. 469-476. 1991.

PAYADEH, S..GOLDBERG, A.A.. "Formulation of the Kinematics Model of a General Robot Manipulator Using a Screw Theory". Journal of Robotic Systems, V.4, No 6. P.771-797. 1987

PEREIRA, P.H. "Levantamento e Modelamento dos Erros Térmicos de uma Retificadora Cilíndrica CNC". Dissertação. 1995.

PEGGS, G.N. Traceability for co-ordinate measurement technology. **27**th **International MATADOR Conference.** Manchester. 1990.

PHILLIPS, S.D., et alli. Properties of free-standing ball bar systems.

International Journal of Japan Society for Precision Engineering.

Janeiro. 1993

PIRATELLI FILHO, A. Tese. "Método para Avaliação do Desempenho de Máquinas de Medir a Três Coordenadas através de Planejamento de Experimentos" Universidade de São Paulo. 1998.

RESHETOV, D.N., PORTMAN, V.T., **Accuracy of Machine Tools**, ASME Press, 1988.

SANTOS, M.T. "Análise de Erros Geométricos em Máquinas de Medir a Três Coordenadas". Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1994.

SOONS, J.A. THEUWS, F.C. SCHELLEKENS, P.H. "Modeling the erros of multi-axis machines: a general methodology" Precision Engineering. Vol 14. p.5-19.1992

SRINIVASA, N..ZIEGERT, J.C. "Modeling and Prediction of Thermally Induced Error Maps in Machine Tools Using a Laser Ball Bar and a Neural Network". Vol12. ASME. 1995.

SWIYT, D. A. The International standard of length, IN: BOSCH, J. A. Coordinate measuring Machines and Systems. New York. Marcel Dekker, Inc., 1995.

Thermal Effects: Understandig their causes can minimize their influence on precision measurement www.bwnshp.com/ms/mgf6ar10.htm. 10/11/1997.

TAJBALHSH, H.. ABADIN, Z.. FERREIRA, P.M. "L_∞ Parameter estimates for volumetric error in models of machine tools". **Precision Engineering**. V.20 n° 3. P.179-187. 1997.

UDA, Y..KOHMO,T..YAZAWA, T.." In-process measuring and workpiece-referred form accuracy control system: application to cylindrical turning using na ordinary lathe". **Precision Engineering.** V. 18. P. 50-55. 1996.

VDI/VDE 2617.Accuracy of Coordinate Measuring Machines. Abril. 1986.

VDI/DGQ 3441-3445: Statistical Examination of Exact Working and Positioning of Machine Tools, Beuth-Verlag, Cologne and Berlin. (1977).

VDI/VDE 2617 Parte I Accuracy of Coordinate Measuring Machines,

Part 1: Characteristics and their checking. Verein Deutscher

Ingenieure/ Verband Deutscher Elektro-Techniker. 1986

VIEIRA SATO, D.P. Uma Contribuição aos Modelos de Sintetização de Erros em Máquinas Ferramentas. Tese. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 1998.

WECKENMANN, A. HEINRICHOWSKI, M. "Problems with software for running coordinate measuring machines" **Precision Engineering**. V.7 p.87-91. 1985.

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

WECK, M.." Handbook of Machine Tools: Metrological Analysis and Performance Tests " V. 4. Copyright Wiley Heyden Ltda. 1984.

ZIEGERT,J.C.; OLSON,D.G & DATSERIS, P.. Description of machine tools errors using screw coordinates. **Journal of Mechanical Design,** v.114, p.531-535, Dezembro.1992

ZHANG, G.X. " A Study on the Abbè Principle and Abbè Error " **Annals of the CIRP**. V. 38. p. 525-528.1989.

ZHANG, G..CHARLTON, B.B..HOCKEN, R. "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines". (Tianjim University - NBS Gaithersburg) - Annals of CIRP. 1985.

ZHANG, G. X., FU, J. Y..A method for optical CMM calibration using a grid plate. **Annals of the CIRP.** V.49.p. 399-402. 2000.

ZIEGERT, J.C.MIZE, C.D. "The Laser ball bar: a new instrument for machine toll metrology." **Precision Engineering**. vol 16 n.4. p 259-267. 1994.

ZIEGERT.J.C., OLSON.D.G., DATSERIS.P. "A Screw Coordinate Model of Machine Tool Erros". In: Modeling of Machine Tools: Accuracy, Dynamics and Control - Winter Annual Meeting os the ASME. V.45. P.23-31. Dallas. 1990.

The OminiGage Mechanism.htttp:\\www.tetrapec.com..1997.

Trilateration htttp:\\www.tetrapec.com..1997

Apêndice 1

Modelo Matemático de uma MM3C do Tipo Ponte Móvel Utilizando a Técnica de Transformações Homogêneas

A máquina utilizada para a modelagem é do tipo ponte Móvel e está descrita no item 5.1. deste trabalho.

Conhecendo-se claramente a máquina estudada foram escolhidas as posições dos sistemas de coordenadas, observe a figura A1. Nesta etapa algumas observações devem ser feitas para evitar possíveis erros:

 o sistema de coordenadas de referência deve estar posicionado sobre um componente estático da estrutura da máquina;

- cada um dos componentes da máquina deve ser representado por pelo menos um sistema de coordenadas;
- 3. cada braço deve ser representado por pelo menos um sistema de coordenadas.
- 4. todos os sistemas devem ter a mesma orientação.

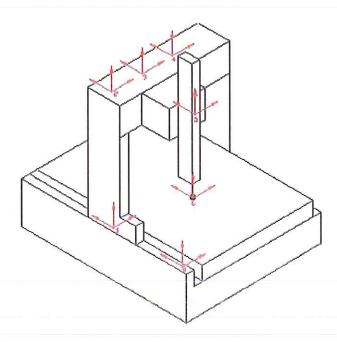


Figura A1: Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo Ponte Móvel com os Sistemas de Coordenadas

Pode-se observar através da figura A1 que alguns sistemas de coordenadas representam apenas translações puras devido aos braços existentes na estrutura da máquina e outros representam os movimentos dos eixos, ou seja, rotações e translações. Os sistemas de coordenadas estão descritos a seguir:

- o sistema de coordenadas 0 ou de referência está posicionado de forma que o eixo Y do sistema de referência esteja paralelo ao eixo Y da Máguina.
- 2. o sistema de coordenadas 1 está posicionado sobre o elemento responsável pelo movimento do eixo Y, ou seja, a ponte. A

transformação do sistema de referência para este sistema descreve as rotações e translações sofridas pelo eixo Y durante o movimento.

- 3. o sistema de coordenadas 2 está posicionado sobre o elemento fixo do eixo X representando uma translação pura em Z. Esta translação ocorre devido à presença de um braço fixo na direção Z que liga os sistema 1 e 2. Além disso quando da translação entre esses dois sistemas ocorre uma mudança de elemento da máquina, ou seja, do eixo Y para o eixo X. Assim, possíveis erros de montagem serão descritos através do desvio de perpendicularismo entre esses dois elementos.
- o sistema de coordenadas 3 está posicionado sobre a escala do eixo X, existindo apenas uma translação pura na direção X do sistema 2 para o sistema 3.
- 5. o sistema de coordenadas 4 está posicionado sobre o carro do eixo X e é o responsável pela identificação dos movimentos neste eixo, ou seja as rotações e translações que ocorrem durante o movimento.
- 6. o sistema de coordenadas 5 representa uma translação pura na direção Y devido a um braço fixo que liga os sistemas 4 e 5. Da mesma forma que no item 3, a mudança de elementos torna necessária a representação do desvio de perpendicularismo entre os elementos X e 7.
- 7. Finalmente o sistema de coordenadas 6 deve ser colocado no centro da esfera na extremidade da haste da sonda. Este sistema vai indicar os movimentos ocorridos no eixo Z.

Conhecido o posicionamento dos sistemas de coordenadas as matrizes de translação e rotação podem ser obtidas. Construindo o modelo, passo a passo, tem-se:

♣ TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA 0 PARA O SISTEMA 1

Na transformação do sistema 0 para o sistema 1 ocorrem translações e rotações. Esta transformação descreve os movimentos do eixo Y devido ao movimento do mesmo.

$${}^{1}\text{Trans}_{0} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{\text{me}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

A MATRIZES DE ROTAÇÃO

$$\text{Roll} = \begin{vmatrix} \cos[\delta\theta y(y)] & 0 & \sin[\delta\theta y(y)] & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin[\delta\theta y(y)] & 0 & \cos[\delta\theta y(y)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Pitch =
$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos[\delta\theta x(y)] & -\sin[\delta\theta x(y)] & 0 \\ 0 & \sin[\delta\theta x(y)] & \cos[\delta\theta x(y)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$Yaw = \begin{vmatrix} \cos[\delta\theta z(y)] & -\sin[\delta\theta z(y)] & 0 & 0 \\ \sin[\delta\theta(y)] & \cos[\delta\theta z(y)] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

ROLL*PITCH*YAW

$${}^{1}\text{Rot}_{0} = \begin{vmatrix} 1 & -\sin[\delta\theta z(y)] & \sin[\delta\theta y(y)] & \delta x(y) \\ \sin[\delta\theta z(y)] & 1 & -\sin[\delta\theta x(y)] & \delta y(y) \\ -\sin[\delta\theta y(y)] & \sin[\delta\theta x(y)] & 1 & \delta z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

🕹 transformação do Sistema 1 para o Sistema 2

Neste caso tem-se translação pura. Entretanto, a transformação do sistema 1 para o sistema 2 liga diferentes elementos da estrutura, ou seja, o eixo Y ao eixo X . Assim, existe também um erro de montagem que é o erro de perpendicularismo entre os dois elementos. Esse erro está representado pela matriz de perpendicularismo entre Y e X.

$${}^{2}\operatorname{Trans}_{1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_{\text{ma}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

PERPENDICULARISMO [XY]

$$Per_{XY} = \begin{vmatrix} 1 & -\delta\theta zo & 0 & 0 \\ \delta\theta zo & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

🖶 TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA 2 PARA O SISTEMA 3

Aqui temos translação pura.

$${}^{3}\text{Trans}_{2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{23} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

🖶 TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA 3 PARA O SISTEMA 4

Na transformação do sistema de coordenadas 3 para o sistema de coordenadas 4 ocorrem rotações e translações pois descreve o movimento do eixo X.

$${}^{4}\text{Trans}_{3} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{\text{me}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$Roll = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos[\delta\theta x(x)] & -sen[\delta\theta x(x)] & 0 \\ 0 & sen[\delta\theta x(x)] & cos[\delta\theta x(x)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Pitch =
$$\begin{vmatrix} \cos[\delta\theta y(x)] & 0 & \sin[\delta\theta y(x)] & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin[\delta\theta y(x)] & 0 & \cos[\delta\theta y(x)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$Yaw = \begin{vmatrix} \cos[\delta\theta z(x)] & -\sin[\delta\theta z(x)] & 0 & 0\\ \sin[\delta\theta z(x)] & \cos[\delta\theta z(x)] & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

ROLL*PITCH*YAW

$${}^{4}\text{Rot}_{3} = \begin{vmatrix} 1 & -\text{sen}[\delta\theta z(x)] & \text{sen}[\delta\theta y(x)] & \delta x(x) \\ \text{sen}[\delta\theta z(x)] & 1 & -\text{sen}[\delta\theta x(x)] & \delta y(x) \\ -\text{sen}[\delta\theta y(x)] & \text{sen}[\delta\theta x(x)] & 1 & \delta z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

↓ TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA 4 PARA O SISTEMA 5

A transformação do sistema 4 para o sistema 5 representa uma translação pura devido a um braço fixo entre esses dois sistemas e um desvio de perpendicularismo entre os eixos X e Z da máquina.

A MATRIZ DE TRANSLAÇÃO

$${}^{5}\text{Trans}_{4} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_{45} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

PERPENDICULARISMO [XYZ]

$$Per_{xyz} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \delta\theta yo & 0 \\ 0 & 1 & -\delta\theta xo & 0 \\ -\delta\theta yo & \delta\theta xo & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

🕹 TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA 5 PARA O SISTEMA 6

Essa transformação irá descrever os movimentos de translação e rotação do eixo Z.

$${}^{6}\text{Trans}_{5} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_{\text{me}} - Z_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

MATRIZ DE ROTAÇÃO

$$Roll = \begin{vmatrix} \cos[\delta\theta z(z)] & -\sin[\delta\theta z(z)] & 0 & 0 \\ \sin[\delta\theta z(z)] & \cos[\delta\theta z(z)] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$Pitch = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos[\delta\theta x(z)] & -sen[\delta\theta x(z)] & 0 \\ 0 & sen[\delta\theta x(z)] & cos[\delta\theta x(z)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\mbox{Yaw} = \begin{vmatrix} \cos[\delta\theta y(z)] & 0 & \sin[\delta\theta y(z)] & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin[\delta\theta y(z)] & 0 & \cos[\delta\theta y(z)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

ROLL*PITCH*YAW

$$^{6}\text{Rot}_{5} = \begin{vmatrix} 1 & -\operatorname{sen}[\delta\theta z(z)] & \operatorname{sen}[\delta\theta y(z)] & \delta x(z) \\ \operatorname{sen}[\delta\theta z(z)] & 1 & -\operatorname{sen}[\delta\theta x(z)] & \delta y(z) \\ -\operatorname{sen}[\delta\theta y(z)] & \operatorname{sen}[\delta\theta x(z)] & 1 & \delta z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Descritos todos os movimentos (translações e rotações) de um sistema para outro, pode-se calcular o erro volumétrico.

Sabe-se que o erro é o caminho com erro menos o caminho sem erro. Observe a figura A2.

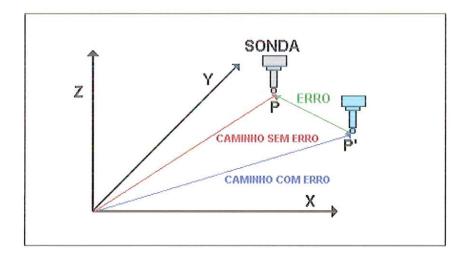


Figura A2: Representação dos vetores do ponto de prova

🕹 Determinação do Caminho sem erro

O vetor que representa o caminho ideal da máquina, ou seja, o caminho sem erro, tem como componentes translações ideais. Esta pode ser observada na matriz caminho_{sem erro}.

$$caminho_{semerro} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{23} + X_{me} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{me} - Y_{45} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{ma} - Z_{56} - Z_{me} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

🕹 DETERMINAÇÃO DO CAMINHO COM ERRO

Pela propriedade das transformações homogêneas pode-se encontrar o caminho com erro multiplicando as matrizes de translação e rotação associada a cada transformação de um sistema (i-1) para (i).

Observação: sendo a origem do sistema de coordenadas 6 coincidente com a ponta da sonda e considerada ponto material, as rotações perdem a sua importância. Portanto utiliza-se como artifício para eliminação desta parcela a multiplicação do resultado pelo vetor origem representado a seguir:

origem =
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

Portanto:

$$\begin{aligned} & \text{Caminho}_{\text{ com erro}} = \frac{^{1}\text{Trans}_{0}*^{1}\text{Rot}_{0}*^{2}\text{Trans}_{1}*\text{Per}_{\text{XY}}*^{3}\text{Trans}_{2}*^{4}\text{Trans}_{3}*^{4}\text{Rot}_{3}}{^{5}\text{Trans}_{4}*\text{Per}_{\text{XYZ}}*^{6}\text{Rot}_{5}*^{6}\text{Trans}_{5}*\text{origem}} \end{aligned}$$

Fazendo as devidas multiplicações obteve-se as equações das três componentes do erro volumétrico Ex, Ey e Ez.

$$\begin{split} E_{x} &= \delta x(x) + \delta x(y) + \delta x(z) - \delta \theta y(y) [Z_{me} - Z_{ma} + Z_{56}] + \delta \theta z(y) Y_{45} - \delta \theta y(z) [Z_{me} + Z_{56}] \\ &- \delta \theta y(x) [Z_{me} + Z_{56}] + \delta yo [Z_{me} + Z_{56}] + \delta zo Y_{45} \end{split}$$

$$\begin{split} E_y &= \delta y(x) + \delta y(y) + \delta y(z) + \delta \theta x(y) [Z_{me} + Z_{56} - Z_{ma}] + \delta \theta z(y) [X_{me} + X_{23}] \\ \delta \theta x(z) [Z_{me} + Z_{56}] + \delta \theta x(x) [Z_{me} + Z_{56}] + \delta zo [X_{me} + X_{23}] + \delta xo [Z_{me} + Z_{56}] \end{split}$$

$$\boldsymbol{E}_{z} = \delta z(y) + \delta z(x) + \delta z(z) - \delta \theta y(y) [\boldsymbol{X}_{me} + \boldsymbol{X}_{23}] - \delta \theta x(x) \boldsymbol{Y}_{45} - \delta \theta x(y) \boldsymbol{Y}_{45}$$

Apêndice 2

Calibração da Barra de Furos

A calibração das distâncias entre os centros dos furos da barra foi realizada utilizando a montagem apresentada na figura segundo o esquema apresentado na figura 1.

Pode-se observar, através da figura 1, que a montagem desenvolvida para determinar os centros dos furos, quando montado sobre a SIP, cria um braço de Abbè. Este braço interfere no valor das medidas das distâncias devido à existência de erros angulares, neste caso *Yaw*.

A fim de corrigir a influência deste *Yaw*, pode-se observar ainda na figura 1, que foram utilizados um sistema interferométrico laser Hewlett Packard, modelo HP5528A e ópticas de medição angular.



Figura 1. Montagem Experimental para calibração da Barra de Furos

As medições das distâncias entre os centros dos furos e do erro angular deram-se simultaneamente. Assim, o erro de medição relativo à presença do braço de Abbè pode ser compensado não influenciando mais nos resultados.

A estimativa da distância entre os centros de dois furos quaisquer A e B na SIP foi realizada através da calibração dos diâmetros dos furos A e B e da Máxima Distância $\left(MD_A^B\right)$ entre os respectivos furos. Observe a figura 2.

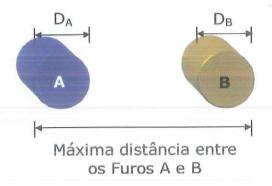


Figura 2. Dimensões medidas na SIP para a Calibração da Barra.

A partir dessas medidas a distância entre os centros dos furos pode ser escrita como:

$$dc_A^B = MD_A^B - \left(\frac{D_A + D_B}{2}\right) \tag{1}$$

onde

 dc_A^B = distância entre os centros dos furos A e B

 $M\!D_{\!\scriptscriptstyle A}^{\scriptscriptstyle B}$ = máxima distância entre os furos A e B

 $D_{\!\scriptscriptstyle A}$ = diâmetro do furo A

 $D_{\!\scriptscriptstyle B}$ = diâmetro do furo B