ALESSANDRO DAVID VIEIRA

**CALIBRAÇÃO INDIRETA DE MÁQUINA DE MEDIR
POR COORDENADAS UTILIZANDO ESQUADRO
MECÂNICO DE ESFERAS**

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

ORIENTADOR: PROF. BENEDITO DI GIACOMO

São Carlos
2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

V657c   Vieira, Alessandro David
            CALIBRAÇÃO INDIRETA DE MÁQUINA DE MEDIR POR
            COORDENADAS UTILIZANDO ESQUADRO MECÂNICO DE ESFERAS /
            Alessandro David Vieira; orientadora Benedito di
            Giacomo. São Carlos, 2009.

            Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
            em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
            Projeto Mecânico -- Escola de Engenharia de São Carlos
            da Universidade de São Paulo, 2009.

            1. Calibração Indireta de Erros.. 2. Máquina de
            Medir por Coordenadas.. 3. Esquadro Mecânico de
            Esferas.. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALESSANDRO DAVID VIEIRA**.

Dissertação defendida e julgada em 15/07/2009 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **BENEDITO DI GIACOMO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Dr. **FABRÍCIO TADEU PAZIANI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP/ Pós-doutorando FAPESP)

APROVADO

Dr. **ALESSANDRO MARQUES**
(Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial/INMETRO)

APROVADO

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Aos meus pais, Marieta e Osvaldo (in memoriam).

Aos meus irmãos.

Agradecimentos

Ao Prof. Benedito Di Giacomo pela orientação, apoio na realização deste trabalho, amizade e grande conselheiro.

Aos colegas de laboratório e de pós-graduação: Vagner, Claudinho, Fabrício, Alessandro Marques, Rodrigo, Larissa, Paulo, Guilherme, Helena e Pedro pelo companheirismo, risadas e incentivo durante nossa convivência.

Ao Luiz Neves, pela amizade e auxílio técnico. Pelos desenhos e a grande ajuda nas montagens experimentais.

À Juliana (Ninja), pela amizade e pelas sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários da oficina do LAMAFE: Sr. Adão, José Botelho, José Risardi e Maurão pela amizade e companhia.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

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

Aos meus pais Marieta e Osvaldo (in memoriam), pelo seu amor e apoio em todos os momentos. Aos meus irmãos Edilson (grande companheiro), José e Nivaldo, pelo apoio e incentivo nesta jornada.

Aos meus amigos Junior (japonês), Igã, Grande Kiba, Renato (Mineiro), Daniel (toquinho) e a Liliane pelo grande incentivo.

A todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para conclusão deste trabalho.

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

Resumo

VIEIRA, A. D. (2009). *Calibração indireta de máquina de medir por coordenadas utilizando esquadro mecânico de esferas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Com o crescimento industrial e tecnológico nas últimas décadas, as indústrias passaram a oferecer produtos customizados, ou seja, desenvolvidos com tolerâncias geométricas cada vez mais apertadas e geometrias cada vez mais complexas. Com isso, as máquinas de medir por coordenadas (MMC) vêm tornando-se instrumentos essenciais no ambiente industrial. A MMC é extremamente versátil o que possibilita a medição das mais diversas características geométricas e dimensionais. Padrões para calibração de MMC foram sugeridos e colocados em uso através dos anos, com a finalidade de utilizá-los em testes de aceitação e verificação periódica dos erros e da incerteza de medição de MMC. Novos artefatos para a calibração indireta de MMC visam melhorar os procedimentos de calibração para uso em sistemas de compensação de erros. Diante do exposto acima, este trabalho tem como objetivo desenvolver um procedimento de calibração indireta de MMC com o esquadro de esferas aliado a um modelo reduzido de sintetização de erros (MRSE) para uso em um Sistema de Compensação de Erros. O procedimento possibilita maior rapidez na obtenção dos valores e comportamentos dos erros quando comparado com outros procedimentos de calibração indireta. O procedimento proposto tem como vantagem o uso de um esquadro de esferas para medir todos os termos das equações das componentes do erro volumétrico, nas direções X, Y e Z de uma MMC.

Palavras-chave: Calibração Indireta de Erros, Máquina de Medir por Coordenadas, Esquadro Mecânico de Esferas.

Abstract

VIEIRA, A. D. (2009). Indirect calibration of a coordinate measuring machine using mechanical ball square. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

With the technological and industrial growth in recent decades, the industries began to offer customized products, that is, products that fit individual specifications and often present increasingly tight tolerances and increasingly complex geometries. Therefore, the coordinate measuring machines (CMMs) have become an essential tool in the industrial environment. The CMM is very versatile since it allows the measurement of several geometric and dimensional features at once. Different standards for the calibration of CMMs were suggested and put into use through the years. This type of standard is traditionally used in acceptance tests and periodic verifications of the CMMs and in the evaluation of measurement uncertainties. New artifacts for indirect calibration of CMMs are proposed to allow the development of better procedures of error evaluation and compensation. Considering the above, this work aims to develop a procedure for indirect calibration of CMMs using a mechanical ball square combined with a reduced model of synthesis of Errors (MRSE). As a result, a compensation system for CMM errors is obtained. The procedure allows a faster evaluation of the values and behaviors of errors when compared with other indirect calibration procedures. Additionally, the proposed procedure has the advantage of using a single artifact to measure all the components of the volumetric error in the directions X, Y and Z of a CMM.

Keywords: Indirect Error Calibration, Coordinate Measuring Machine, Mechanical Ball Square.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Método do volume dividido.	31
Figura 2.2 – Padrões de verificação de máquinas de medir a três coordenadas utilizados no Brasil.	32
Figura 2.3 – Montagem de blocos padrão (esquerda) e padrão escalonado (direita).	33
Figura 2.4 – Barra de esferas	34
Figura 2.5 – Barra de esferas telescópica com encaixe magnético.....	35
Figura 2.6 – Machine checking gauge (RENISHAW, 2007).....	36
Figura 2.7 – Placa de esferas.	38
Figura 2.8 – Rotação da barra de esferas.....	38
Figura 2.9 – Padrão tetraédrico (TRAPET, 2009).....	39
Figura 2.10 – Cubo de esferas (TRAPET, 2009).	40
Figura 3.1 – Curvas de erros, resultados da calibração de qualquer erro paramétrico de uma MM3C ou de uma Máquina Ferramenta segundo a proposta de Weck (1984).	43
Figura 3.2 - Erro de posição na direção Y.....	44
Figura 3.3– Erro de retilidade do eixo Y na direção Z.	44
Figura 3.4– Erro de retilidade do eixo Y na direção X.	44
Figura 3.5– Erro angular PITCH (Y).....	44
Figura 3.6– Erro angular YAW (Y).	45
Figura 3.7 – Erro angular ROLL (Y).	45
Figura 3.8 – Erro de posição na direção X.	45
Figura 3.9 – Erro de retilidade do eixo X na direção Z.	45

Figura 3.10 – Erro de retilidade do eixo X na direção Y.....	46
Figura 3.11 - Erro angular PITCH (X).....	46
Figura 3.12 - Erro angular ROLL (X).	46
Figura 3.13 - Erro de posição na direção Z.	47
Figura 3.14 - Erro de retilidade do eixo Z na direção X.	47
Figura 3.15 - Erro de retilidade do eixo Z na direção Y.	47
Figura 3.16 - Erro angular PITCH (Z).....	47
Figura 3.17 - Erro angular YAW (Z).....	47
Figura 3.18 - Erro de perpendicularismo XY.....	48
Figura 3.19 - Erro de perpendicularismo XZ.	48
Figura 3.20 - Erro de perpendicularismo YZ.....	48
Figura 3.21 - Curva de distribuição normal de probabilidades.	50
Figura 3.22 - Distribuições de probabilidades.	54
Figura 5.1 – Máquina de Medir a Três Coordenadas (Brown & Sharp).	64
Figura 5.2 – Fluxograma do Programa de aquisição de dados.	66
Figura 5.3 – Tela inicial do MaqMed 2000.....	67
Figura 5.4 – Procedimento para qualificação do apalpador (MARQUES, 2003).....	68
Figura 5.5 – Tela do Menu principal do MaqMed 2000.....	69
Figura 5.6 – Telas para escolha da medição.	69
Figura 5.7 – Desenho do conjunto do esquadro.	70
Figura 5.8 – Calibração da posição na SIP.....	71
Figura 5.9 – Posicionamento do esquadro no plano XY.....	72
Figura 5.10 – Montagem do esquadro no desempenho.	73

Figura 5.11 – Montagem do esquadro no desempenho.....	73
Figura 5.12 – Montagem do esquadro no desempenho.....	74
Figura 5.13 – Método da Reversão (A).	75
Figura 5.14 – Método da Reversão (B).	75
Figura 5.15 – Método da Reversão do Esquadro.	76
Figura 5.16 - Montagem do Esquadro na Posição M1.....	77
Figura 5.17 - Montagem do Esquadro na Posição M2.....	78
Figura 5.18 - Montagem do Esquadro na Posição M3.....	79
Figura 5.19 - Montagem do Esquadro na posição M4.....	80
Figura 5.20 - Montagem do Esquadro na posição M5.....	81
Figura 5.21 - Sistema de coordenadas de referência.	82
Figura 5.22 - Análise de erros - movimentação do eixo Y.....	83
Figura 5.23 - Análise de erros - movimentação do eixo X.	84
Figura 5.24 - Análise de erros - movimentação do eixo Z.	85
Figura 6.1 – Esquema de calibração do erro de retilineidade entre esferas, no plano perpendicular ao esquadro, na direção Z.	98
Figura 6.2 – Esquema de calibração do erro de retilineidade entre esferas, no plano do esquadro, na direção X.	99
Figura 6.3 – Esquema de calibração do erro de retilineidade entre esferas, no plano do esquadro, na direção Y.	100
Figura 6.4 – Erro de Retilineidade na direção Z da haste longa.....	101
Figura 6.5 – Erro de Retilineidade na direção X da haste longa.....	102
Figura 6.6 – Erro de Retilineidade na direção Z da haste curta.	102
Figura 6.7 – Erro de Retilineidade na direção Y da haste curta.	103

Figura 6.8 – Erro de retilidade na direção X devido a movimento em Y.	107
Figura 6.9 – Erro de retilidade na direção Y devido a movimento em X.	108
Figura 6.10 – Erro de posição na direção Y medidos em M1.....	108
Figura 6.11 – Erro de posição na direção X medidos em M1.	109
Figura 6.12 – Erro de retilidade na direção Z devido a movimento em X.	109
Figura 6.13 – Erro de retilidade na direção Z devido a movimento em Y.	110
Figura 6.14 – Erro de posição na direção Y medidos em M2.....	111
Figura 6.15 – Erro de posição na direção X.	112
Figura 6.16 – Erro de posição na direção Y.....	113
Figura 6.17 – Erro de retilidade na direção X devido a movimento em Y.	114
Figura 6.18 – Erro de retilidade na direção Y devido a movimento em X.	114
Figura 6.19 – Erro de retilidade na direção Y devido a movimento em Z.	115
Figura 6.20 – Erro de posição na direção Z.	116
Figura 6.21 – Erro de retilidade na direção Z devido a movimento em Y.	116
Figura 6.22 – Erro de retilidade na direção X devido a movimento em Z.	117

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Características e condições técnicas da MM3C.....	65
Tabela 5.2 – Componentes do Erro na Posição M1.	77
Tabela 5.3 - Componentes do Erro na Posição M2.....	78
Tabela 5.4 - Componentes do Erro na Posição M3.....	79
Tabela 5.5 - Componentes do Erro na Posição M4.....	80
Tabela 5.6 - Componentes do Erro na Posição M5.....	81
Tabela 5.7 - Erros devido a movimentação do eixo Y.....	83
Tabela 5.8 - Erros devido a movimentação do eixo X.	84
Tabela 5.9 - Erros devido a movimentação do eixo Z.	85
Tabela 5.10 - Parâmetros para Determinar a Incerteza da Medição das Distâncias entre os Centros das Esferas.....	91
Tabela 5.11 - Parâmetros para Determinar a Incerteza dos Deslocamentos Calculados.....	92
Tabela 5.12 - Parâmetros para Determinar a Incerteza da Medição de Deslocamentos utilizando o Esquadro.....	94
Tabela 6.1 – Médias das distâncias medidas entre esferas e Desvios Padrões.....	97
Tabela 6.2 – Médias das distâncias medidas entre esferas e Desvios Padrões.....	97
Tabela 6.3 – Valores médios das posições dos centros das esferas, posição 1 e reversa.....	104
Tabela 6.4 – Coeficientes das retas ajustadas pelos pontos medidos.	105

Tabela 6.5 – Cálculo dos coeficientes angulares da posição 1 e reversa.	105
Tabela 6.6 – Equações de sintetização das componentes E_x , E_y e E_z do modelo reduzido.	118
Tabela 6.7 – Incerteza associada às componentes do Erro Volumétrico E_x	119
Tabela 6.8 - Incerteza associada às componentes do Erro Volumétrico E_y	120
Tabela 6.9 - Incerteza associada às componentes do Erro Volumétrico E_z	121

Sumário

1. Introdução	25
2. Calibração e Artefatos Padrão	29
2.1. PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO DIRETA DE MMC.....	30
2.1.1. MÉTODO DO VOLUME DIVIDIDO.....	30
2.1.2. MÉTODO DE SINTETIZAÇÃO DE ERROS	31
2.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO INDIRETA DE MMC.....	31
2.2.1. ARTEFATOS MECÂNICOS - UNIDIMENSIONAIS	33
2.2.2. ARTEFATOS MECÂNICOS - BIDIMENSIONAIS	36
2.2.3. ARTEFATOS MECÂNICOS - TRIDIMENSIONAIS	38
3. Fundamentos Teóricos que apoiam o presente trabalho sobre Erros, Análise Geométrica, Estatística aplicada e Incerteza de Medição	41
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ERROS SEGUNDO SUA NATUREZA.....	41
3.2. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA MM3C DO TIPO PONTE MÓVEL.....	43
3.2.1. ANÁLISE GEOMÉTRICA NA DIREÇÃO Y.....	44
3.2.2. ANÁLISE GEOMÉTRICA NA DIREÇÃO X.....	45
3.2.3. ANÁLISE GEOMÉTRICA NA DIREÇÃO Z.....	46
3.2.4. Erro de perpendicularismo	48
3.3. ESTATÍSTICA FUNDAMENTAL.....	49
3.4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	50
3.4.1. CLASSIFICAÇÃO ATUAL DAS FONTES DE INCERTEZA	51
3.4.2. INCERTEZA PADRONIZADA POMBINADA	55
3.4.3. INCERTEZA EXPANDIDA	56

4. Procedimento de Calibração Indireta de MM3C 59

4.1. ESQUADRO DE ESFERAS.....	60
4.2. MODELO MATEMÁTICO DE SINTETIZAÇÃO DE ERROS.....	60
4.3. CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO DE ESFERAS.....	61
4.4. CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	61

5. Descrição do Procedimento de Calibração Indireta em MM3C tipo Ponte Móvel 63

5.1. DESCRIÇÃO DA MM3C UTILIZADA NOS TESTES EXPERIMENTAIS.....	63
5.1.1. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL DE AQUISIÇÃO DE DADOS	65
5.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DO ESQUADRO DE ESFERAS.....	70
5.2.1. DESCRIÇÃO DO ESQUADRO MECÂNICO DE ESFERAS	70
5.3. Procedimento de Calibração da MM3C com o Esquadro de Esferas	77
5.4. Modelo Reduzido de Sintetização de Erros.....	82
5.5. Estimativa da Incerteza de Medição.....	89

6. Resultados e Discussões 95

6.1. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO ESQUADRO.....	96
6.1.1. CALIBRAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE OS CENTROS DAS ESFERAS DO ESQUADRO	96
6.1.2. CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE RETILINEIDADE DO ESQUADRO MECÂNICO DE ESFERAS	97
6.1.3. RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO DESVIO DE PERPENDICULARISMO DO ESQUADRO MECÂNICO DE ESFERAS	103
6.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C.....	106
6.2.1. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M1	106

6.2.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M2	110
6.2.3. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M3	111
6.2.4. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M4	114
6.2.5. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M5	117
7. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	123
Referências Bibliográficas	125
APÊNDICE 1	Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial e tecnológico das últimas décadas provocou alterações no mercado com a crescente exigência de produtos de alta qualidade, com máquinas capazes de realizar processos de fabricação em tempos curtos e com menor custo.

Portanto, para atender o mercado, as indústrias passaram a oferecer produtos customizados, ou seja, desenvolvidos com tolerâncias geométricas cada vez mais apertadas e geometrias cada vez mais complexas.

Com isso, surge no mercado a primeira máquina de medir por coordenadas fabricada pela Ferranti, Ltd. Of Dalkeith, na Escócia. A MM3C foi introduzida na indústria de forma a tentar acompanhar o ritmo da produção das máquinas automatizadas, uma vez que os equipamentos convencionais existentes não conseguiam dar a resposta que muitas vezes se lhes exigia (BOSCH, 1995).

A máquina da Ferranti apresentava um desenho original baseado em um mínimo de restrições cinemáticas, mas que ainda permitiam o alinhamento de seus elementos móveis. Ela oferecia uma resolução de 0,012 mm e possuía um curso muito pequeno (254 mm) na direção Z. As leituras eram feitas só nas direções X e Y (610 mm e 381 mm, respectivamente).

A máquina usava uma sonda rígida para estabelecer os pontos de inspeção. Segundo Ferranti, ela estava desenhada para inspecionar as peças com uma acuracidade de 0,025 mm.

De início, os fabricantes de instrumentos de medição não reconheceram o potencial oferecido por essa iniciativa da Ferranti. No entanto, seu uso revolucionou os métodos de inspeção de peças manufaturadas, minimizando o tempo de medição e os requisitos relacionados à qualificação do pessoal de inspeção. De fato, em poucos anos surgiu um mercado para essa invenção, que levou ao desenvolvimento da indústria de máquinas de medir a três coordenadas, que oferece, hoje em dia, máquinas em diferentes configurações mecânicas, capazes de realizar as mais diferentes tarefas de medição (ORREGO; DI GIACOMO; ABACKERLI, 2000).

As MM3Cs, como todos instrumentos de medição são sujeitos a erros e estes erros ocorrem devido às imperfeições da geometria da máquina, resultantes da fabricação, da montagem e do desgaste de seus elementos. Tais erros são considerados os que mais influenciam a acuracidade e a repetibilidade das medições (DI GIACOMO, 2006).

Dentro deste contexto, é através de procedimentos de calibração que o comportamento metrológico da máquina é avaliado. Alguns destes métodos de calibração podem ser separados em diretos e indiretos. As diretas visam avaliar os erros individuais de cada direção preferencial por procedimentos específicos de medição. Enquanto as indiretas avaliam o erro total da máquina através de artefatos padrão.

O objetivo deste trabalho consiste na calibração indireta de máquina de medir por coordenadas utilizando um esquadro mecânico de esferas para a avaliação dos erros geométricos.

No capítulo 2 deste trabalho apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre métodos de calibração direta e indireta, e os artefatos-padrão utilizados.

Os aspectos teóricos que fornecem embasamento ao trabalho desenvolvido são abordados no capítulo 3. Assim, o capítulo toma início

com a caracterização dos erros, seguida pela discussão dos métodos de análise geométrica das MM3Cs do tipo ponte móvel, estatística básica aplicada e fundamentos de incerteza de medição.

No capítulo 4 expõe-se a proposta de trabalho em linhas gerais, enumerando-se as principais etapas de seu desenvolvimento. O procedimento de calibração indireta de máquinas de medir por coordenadas é apresentado.

Os desenvolvimentos realizados em cada etapa do trabalho, necessários à calibração indireta da máquina de medir a três coordenadas, são detalhados no capítulo 5. Assim, este capítulo contém uma descrição dos equipamentos utilizados, do artefato padrão utilizado e o programa de aquisição de dados são apresentados. Por fim, discute-se o modelo reduzido de sintetização de erros e a estimativa de incerteza de medição.

Os resultados da calibração do artefato padrão e os resultados da calibração da MM3C são apresentados no capítulo 6.

Finalmente, no capítulo 7, apresentam-se as principais conclusões alcançadas e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

CALIBRAÇÃO E ARTEFATOS PADRÃO

Desde que as Máquinas de Medir a Três Coordenadas tornaram-se produtos disponíveis no mercado, fabricantes e usuários têm mostrado a necessidade da avaliação e verificação das máquinas.

A avaliação do desempenho de uma MM3C é realizada através dos testes de calibração. Segundo CARDOZA (1995), a calibração de MM3Cs torna-se importante à medida que é através dela que o comportamento metrológico da máquina é levantado, garantido, assim, a confiabilidade das medidas realizadas.

A norma ANSI/ASME B89.4.1 (1997) define a calibração como sendo a determinação da diferença entre o valor indicado por um instrumento de medição e o valor nominal ou "verdadeiro". A calibração deve ser válida para todas as condições de operação sob as quais pode ser utilizado o instrumento calibrado.

De acordo com o ISO-GUM (2003), calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões.

Os procedimentos de calibração podem ser divididos em dois grandes grupos: os métodos de medições diretas e os métodos de medições indiretas.

2.1. PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO DIRETA DE MMC

O método de calibração direta envolve a utilização de técnicas ópticas e opto-mecânicas, sem a utilização de artefatos mecânicos. Tais técnicas ópticas, como interferômetro laser, podem mapear 18 das 21 componentes de erros paramétricos. O erro angular (roll) não pode ser medido diretamente (CAUCHICK, 1996).

Os métodos diretos possuem grande poder de diagnóstico, permitindo a identificação das fontes de erros e das imperfeições geométricas da máquina. Os dados, resultantes da calibração direta, são apropriados para a correção de erros através de programas computacionais, além de contar com as informações para melhoria de projeto da máquina. Quando comparados com os métodos indiretos eles oferecem maior quantidade de informação sobre o desempenho das MM3Cs (ARENCIBIA, 1999).

O procedimento de calibração direta pode ser realizado utilizando-se dois métodos: volume dividido e o de sintetização de erros.

2.1.1. MÉTODO DO VOLUME DIVIDIDO

Neste método, geratrizes de planos paralelos no volume de trabalho da máquina são identificadas e o erro de posição do eixo de interesse é levantado. A medição do erro de posição é repetida diversas vezes, em todas as geratrizes, formando uma grade de erros (Figura 2.1)(DI GIACOMO, 1986).

Segundo ARENCIBIA (1999), este método é considerado uma excelente técnica de calibração para fins de diagnóstico e para a construção de sistemas de compensação de erros. Entretanto, ele apresenta uma limitação, pois consome um longo tempo para sua realização, onde mudanças de temperatura podem afetar a acuracidade das medições.

Figura 2.1 – Método do volume dividido.

2.1.2. MÉTODO DE SINTETIZAÇÃO DE ERROS

O método de sintetização utiliza-se da teoria da cinemática dos corpos rígidos para modelar geometricamente a estrutura da máquina e a teoria da superposição dos efeitos para escrever o modelo matemático da contribuição de cada componente individual de erro na expressão do erro volumétrico (Burdekim, M. S.; Voutsadopoulos, C. (1981).

Utiliza-se a técnica de análise geométrica estrutural, verifica-se cada erro nas direções preferenciais da máquina, fornecendo equações de sintetização com as expressões das componentes E_x , E_y e E_z do erro volumétrico.

2.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO INDIRETA DE MMC

A calibração indireta tem como característica a utilização de artefatos padrões para determinação dos erros individuais de uma máquina. Neste caso, os erros individuais obtidos, são as diferenças

entre as dimensões de um artefato calibrado e as dimensões das medidas obtidas através da máquina.

A norma internacional ISO 10360-2 de verificação de desempenho recomenda que a verificação rápida com artefatos padrões seja fundamental para garantia da confiabilidade das medições que devem ser realizadas em intervalos curtos, de acordo com as necessidades da indústria. Assim, a verificação rápida torna-se uma solução de baixo custo e recomendada por norma, o que justifica a sua aplicação também nas indústrias.

Diante desta recomendação, ABACKERLI (2000) conduziu uma pesquisa entre usuários de MM3C nas indústrias brasileiras. Dentre os principais tópicos pesquisados, a utilização de artefatos padrão para testes periódicos das máquinas recebeu atenção especial. A pesquisa envolveu 70 usuários de máquinas de medir por três coordenadas e concluiu que os principais padrões utilizados na verificação de MM3Cs são os blocos-padrões e os padrões escalonados. A figura 2.2 aponta o resumo dos artefatos utilizados.

Figura 2.2 – Padrões de verificação de máquinas de medir a três coordenadas utilizados no Brasil.

Os artefatos padrões são classificados de acordo com o número de coordenadas espaciais associadas às suas características de calibração, podendo ser unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais (PEGGS, 1989).

2.2.1. ARTEFATOS MECÂNICOS - UNIDIMENSIONAIS

O ensaio de verificação de desempenho com artefatos unidimensionais foram estabelecidos como um método prático e com grande acuracidade na verificação de MM3Cs por muitos anos. (PEGGS, 1989).

A seguir estão apresentadas algumas características de alguns destes artefatos.

2.2.1.1. BLOCOS PADRÃO E PADRÃO ESCALONADO

Os blocos-padrão e padrão escalonado são utilizados para ensaios de verificação rápida. Podem ser usados em conjuntos com suportes que facilitam o posicionamento, por exemplo, um conjunto de blocos-padrão sobre a mesa da MM3C (Figura 2.3 esquerda). O padrão escalonado (Figura 2.3 direita) é a montagem de um conjunto de blocos-padrão fabricados em cerâmica ou aço, montados em uma base de ferro fundido, tornando mais robusto.

Figura 2.3 – Montagem de blocos padrão (esquerda) e padrão escalonado (direita).

2.2.1.2. BARRA DE ESFERAS

A barra de esferas (figura 2.4) é um dispositivo simples. Consiste de duas esferas de precisão posicionadas nas extremidades de uma barra rígida.

De acordo com a norma americana ANSI/ASME B89.12M, a distância entre os centros das esferas não deve ser maior que 900 mm e aproximadamente 100 mm menor do que o menor eixo da máquina. As esferas podem ser feitas de carbeto de tungstênio, rubi, cerâmica ou aço.

A barra de esferas é um artefato portátil e de fácil transporte, mas a sua fixação é complexa e demorada, o que deixa o processo de verificação periódica um pouco lento para as exigências da indústria.

O procedimento de calibração com a barra de esferas é sugerido pela norma ANSI/ASME B89.4.1. Consiste em posicionar e orientar a barra em posições do volume de trabalho e em seguida determinar a distância entre os centros das esferas. Os desvios observados entre as dimensões do padrão e as medidas indicam os erros (Souza, 2000).

Figura 2.4 – Barra de esferas

2.2.1.3. BARRA DE ESFERAS TELESCÓPICA COM ENCAIXE MAGNÉTICO

A barra de esferas telescópica com encaixe magnético (figura 2.5), com fixação através de soquetes magnéticos foi desenvolvida no Physikalische Technische Bundesanstalt (PTB). As esferas permanecem fixas sobre soquetes magnéticos, um soquete é fixado no desempenho da MM3C enquanto o outro no cabeçote de apalpação. O cabeçote realiza movimentos circulares sobre o plano de referência da máquina e um transdutor de deslocamento mede a variação de distância entre os centros das esferas da barra. O comprimento da barra é o raio constante de um círculo, qualquer desvio com relação a este raio é caracterizado como erro.

Figura 2.5 – Barra de esferas telescópica com encaixe magnético

2.2.1.4. MACHINE CHECKING GAUGE

O dispositivo ***Machine Checking Gauge*** (figura 2.6), consiste de uma base e um suporte para um pivô, uma barra e um apalpador. Só podem ser usados em máquinas capazes de deslocar o apalpador em movimentos circulares, ou seja, não é adequado para máquinas manuais. Entre as principais vantagens estão a facilidade de utilização e o tempo de ensaio.

Figura 2.6 – Machine checking gauge (RENISHAW, 2007).

2.2.2. ARTEFATOS MECÂNICOS - BIDIMENSIONAIS

Há algumas vantagens na utilização de artefatos mecânicos bidimensionais, como a placa de esferas e placa de furos. KUNZMANN et al. (1995) afirmou que os artefatos bidimensionais são fáceis de manusear, podem ser rigorosamente calibrados e são baratos para produzir. Quando comparadas aos instrumentos utilizados no método direto de medição, o artefato pode ser considerado relativamente mais barato.

De acordo com PEGGS (1990), os artefatos padrões bidimensionais possuem elevado custo de construção e são difíceis de serem calibrados. Além disso a duração dos ensaios são aspectos negativos do uso desses artefatos. Tudo isso estimula os usuários de MM3Cs a utilizar as barras de esferas e padrões passo a passo. As mesmas restrições de uso podem ser atribuídas aos padrões tridimensionais, como os padrões volumétricos tetraédricos.

Neste aspecto, de acordo com KUNZMANN et al. (1995), a placa de esferas e placa de furos, por permitirem uma avaliação bem mais abrangente do volume da MM3C, substituem com vantagem os padrões unidimensionais.

A seguir estão apresentadas algumas características de alguns destes artefatos.

2.2.2.1. PLACA DE ESFERAS

A Placa de Esferas consiste de uma placa de aço quadrada onde são fixadas esferas padrões de mesmo diâmetro nominal, constituindo normalmente um conjunto 25 esferas (Figura 2.12). A calibração é feita medindo-se as distâncias entre os centros das esferas. A placa pode ser colocada em diversas posições do volume de trabalho da máquina, dependendo da estratégia de medição programada para a calibração (KNAPP et al, 1991).

Segundo TRAPET (1991), a placa de esferas possui a versatilidade de se executar diversas medições com uma única posição no volume de trabalho. Se comparado com outros artefatos reduziria grandemente o tempo de calibração, porém problemas de flexão e peso da placa podem inserir incertezas no método.

A placa é posicionada e alinhada nas direções dos eixos, para obtenção dos erros de posição. Os erros de perpendicularismo e de retilineidade são obtidos com o padrão inclinado 45° (graus) com relação aos eixos coordenados.

Os erros angulares pitch e yaw podem ser medidos com o padrão em diferentes braços de Abbè.

O erro angular Roll é obtido na medição de retilineidade em diferentes braços de Abbè.

Figura 2.7 – Placa de esferas.

2.2.2.2. PLACA DE FUROS

A placa de furos (*Hole Plate*) consiste em um conjunto de 25 furos posicionados simetricamente sobre uma placa de espessura nominal de 20 mm (Figura 2.8). A distância entre os centros dos furos é conhecida. Esse processo é semelhante à calibração das placas de esferas.

Figura 2.8 – Rotação da barra de esferas

2.2.3. ARTEFATOS MECÂNICOS - TRIDIMENSIONAIS

Os ensaios com artefatos tridimensionais possibilitam a redução no tempo de ensaio devido à necessidade de um menor número de

posicionamentos, portanto, com a redução do número de posicionamentos, surge a necessidade de ocupar um volume relativamente grande elevando assim a massa do artefato e afetando sua rigidez.

De acordo com CAUCHICK (1996), o objetivo dos ensaios com artefatos tridimensionais não é mapear erros geométricos ou cumprir requisitos de aceitação, mas indicar quando uma avaliação mais completa é necessária. A seguir estão apresentadas algumas características de alguns destes artefatos.

2.2.3.1. PADRÃO VOLUMÉTRICO TETRAÉDRICO

O Padrão tetraédrico (Figura 2.9) foi proposto e construído por J. Bury em 1976, o artefato consiste em uma montagem tridimensional de barras de esferas de grande estabilidade dimensional e que permitem ser calibradas com instrumentos de medição linear.

Uma estrutura com quatro esferas de carbeto de tungstênio ou de aço, acopladas entre si por barras de fibra de carbono, formando a geometria de um tetraedro. As esferas e as barras são conectadas por forças magnéticas, possibilitam a montagem e desmontagem da estrutura, facilitando o transporte.

Figura 2.9 – Padrão tetraédrico (TRAPET, 2009).

2.2.3.2. CUBO DE ESFERAS

O Cubo de esferas consiste de uma estrutura em fibra de carbono, alumínio, ou aço. As esferas são em geral de quartzo, vidro ou cerâmica, e a estrutura é normalmente do tipo caixa ou treliça, com oito esferas nos vértices do cubo.

Este método permite determinar, através de uma aproximação linear, os erros de posicionamento, rotação e ortogonalidade.

Figura 2.10 – Cubo de esferas (TRAPET, 2009).

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS QUE APOIAM O PRESENTE TRABALHO SOBRE ERROS, ANÁLISE GEOMÉTRICA, ESTATÍSTICA APLICADA E INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Este capítulo trata da apresentação dos fundamentos teóricos empregados na análise dos dados experimentais, na análise estatística de dados e na análise da incerteza de medição segundo a proposta do "Guia para Expressão da Incerteza de Medição", terceira edição brasileira revisada em 2003.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ERROS SEGUNDO SUA NATUREZA

Em geral, considera-se que os erros podem ser de natureza sistemática, aleatória e a histerética.

Os erros definidos como sistemáticos permanecem constantes em grandeza e sinal ou podem variar de acordo com uma lei bem definida, quando um número considerável de medições de uma grandeza são repetidas sob as mesmas condições. Uma vez determinados, podem ser

corrigidos através de diferentes técnicas de compensação. [ORREGO, 1999].

Os erros de natureza aleatória são aqueles, cuja grandeza e sinal não se repetem de forma previsível para cada medição ou observação realizada sob as mesmas condições. Os erros aleatórios derivam-se de fontes não controladas e somente podem ser avaliados estatisticamente.

Na maioria dos casos os erros aleatórios são pequenos e podem ter sinal positivo ou negativo, indistintamente. É atribuída a eles a indeterminação do resultando das medições. Assumindo a maioria das vezes, que estes erros respondem a uma distribuição normal [ORREGO, 1999; ARENCIBIA, 1999].

O erro histerético é definido como sendo um erro de natureza sistemática e pode ser observado quando avaliam-se os dois sentidos de aproximação, ida e volta, em cada um dos pontos de medição.

Segundo FRENCH & HUMPRIES (1967), um bom desenho ou o ajuste e a montagem adequada dos elementos das máquinas reduzem ou eliminam a histerese. Atualmente, isto também é possível com ajuda de programas computacionais de compensação de erros.

WECK (1984) propõe representar os resultados da medição dos erros geométricos de máquinas ferramentas e MM3C segundo as definições mostradas na figura 3.1. As curvas de erros mostradas nesta figura representam os resultados de uma calibração hipotética para um dos erros geométricos. O erro foi medido ao longo de um determinado eixo, várias vezes no sentido de ida e no sentido de volta, em um número finito de posições do carro.

Para cada posição observada nas duas direções de movimento, tem-se um erro aleatório definido como ± 2 vezes o desvio padrão da média dos dados observados nessa posição. O erro de histerese presente nestas medições é definido como sendo a diferença, em cada posição observada, entre a média dos valores lidos na direção "ida" e a dos valores lidos na direção "volta".

Figura 3.1 – Curvas de erros, resultados da calibração de qualquer erro paramétrico de uma MM3C ou de uma Máquina Ferramenta segundo a proposta de Weck (1984).

3.2. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA MM3C DO TIPO PONTE MÓVEL

A análise geométrica da estrutura de uma máquina de medir permite a avaliação individual da influência de cada um dos 21 erros geométricos e pode ser sintetizadas nas componentes, Ex, Ey e Ez, do erro volumétrico como soma das contribuições individuais na direção correspondente [DI GIACOMO, 1986].

São consideradas na análise geométrica apenas as contribuições de primeira ordem, as de segunda ordem são desprezadas por serem consideradas insignificantes (DI GIACOMO, 2006).

Apresenta-se a análise para cada direção preferencial, obtendo as componentes dos erros volumétricos nas direções X, Y e Z devido aos movimentos da ponte na direção Y, do carro sobre a ponte na direção X e ao movimento do eixo Z.

3.2.1. ANÁLISE GEOMÉTRICA NA DIREÇÃO Y

As figuras de 3.2 a 3.7 apresentam os seis erros geométricos analisados na direção Y, que são: erro de posição (escala), retilidade na direção X e Z, erros angulares PITCH, YAW e ROLL, respectivamente, apresentadas a seguir.

Figura 3.2 - Erro de posição na direção Y.

Figura 3.3– Erro de retilidade do eixo Y na direção Z.

Figura 3.4– Erro de retilidade do eixo Y na direção X.

Figura 3.5– Erro angular PITCH (Y).

Figura 3.6– Erro angular YAW (Y).

Figura 3.7 – Erro angular ROLL (Y).

3.2.2. ANÁLISE GEOMÉTRICA NA DIREÇÃO X

As figuras de 3.8 a 3.13 apresentam os seis erros geométricos analisados na direção X, que são: erro de posição (escala), retilidade na direção Y e Z, erros angulares PITCH, YAW e ROLL, respectivamente, apresentadas a seguir.

Figura 3.8 – Erro de posição na direção X.

Figura 3.9 – Erro de retilidade do eixo X na direção Z.

Figura 3.10 – Erro de retilidade do eixo X na direção Y.

Figura 3.11 - Erro angular PITCH (X).

Figura 3.12 - Erro angular ROLL (X).

3.2.3. ANÁLISE GEOMÉTRICA NA DIREÇÃO Z

As figuras de 3.14 a 3.19 apresentam os seis erros geométricos analisados na direção Z, que são: erro de posição (escala), retilidade na direção X e Y, erros angulares PITCH, YAW e ROLL, respectivamente, apresentadas a seguir.

Figura 3.13 - Erro de posição na direção Z.

Figura 3.14 - Erro de retilineidade do eixo Z na direção X.

Figura 3.15 - Erro de retilineidade do eixo Z na direção Y.

Figura 3.16 - Erro angular PITCH (Z).

Figura 3.17 - Erro angular YAW (Z).

3.2.4. Erro de perpendicularismo

Figura 3.18 - Erro de perpendicularismo XY.

Figura 3.19 - Erro de perpendicularismo XZ.

Figura 3.20 - Erro de perpendicularismo YZ.

Somando as diferentes contribuições Δ_i , em cada direção, e adicionando os erros de retilidade e posição tem-se:

$$Ex = \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y_\alpha, z) + \delta \phi_y(x_\alpha, y_\alpha, z) \cdot z + \\ + \delta \phi_y(x, y_\alpha, z_\alpha) \cdot z - \delta \phi_y(x_\alpha, y, z_\alpha) \cdot z + \delta \phi_{y0} \cdot z$$

$$E_y = \delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta y(x_\alpha, y_\alpha, z) + \delta \phi(x_\alpha, y_\alpha, z) \cdot z + \\ + \delta \phi(x, y_\alpha, z_\alpha) \cdot z - \delta \phi(x_\alpha, y, z_\alpha) \cdot z + \delta \phi(x_\alpha, y, z_\alpha) \cdot x + \delta \phi_0 \cdot x - \delta \phi_0 \cdot z$$

$$E_z = \delta z(x_\alpha, y_\alpha, z) + \delta z(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta \phi(x_\alpha, y, z_\alpha) \cdot x$$

3.3. ESTATÍSTICA FUNDAMENTAL

A Estatística, ou métodos estatísticos como é denominada algumas vezes, desempenha papel de crescente e importante em quase todas as fases da pesquisa.

Os dados experimentais são extraídos usualmente de um conjunto de observações repetidas de um dado evento ou fenômeno. Quando se dispõe de um número muito grande, tem-se uma população ou universo. Muitas vezes é impossível ou impraticável observar toda a população e por isso examina-se uma pequena parte chamada amostra (SPIEGEL, M.R., 1993).

Primeiramente, é necessário conhecer a média μ e o desvio padrão σ da população de tamanho N . No caso da população ser finita e acessível, estas estatísticas são calculadas com as expressões:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N - 1}} \quad (3.2)$$

Na expressão 3.2, o valor $N-1$, correspondente ao número de graus de liberdade para determinação da estatística σ , sofre uma

redução de uma unidade porque a média já foi calculada e aplicada na determinação do desvio-padrão.

Conhecidos os parâmetros μ e σ , a probabilidade de encontrar valores em um intervalo qualquer no eixo das abscissas é dado pela integral da curva naquele intervalo. A distribuição normal de probabilidade tem o aspecto de um sino, sendo simétrica em relação à média (μ) (figura 3.21). Desta forma, pode-se afirmar com um nível de confiança de 68,26% que o valor de uma observação está no intervalo $\mu \pm \sigma$. Este nível aumenta para 95,44% para o intervalo $\mu \pm 2\sigma$ e para 99,74% para o intervalo $\mu \pm 3\sigma$ [BARNES,1994].

Figura 3.21 - Curva de distribuição normal de probabilidades.

3.4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Na área de metrologia, um dos grandes problemas enfrentados pelos profissionais é quantificar o erro. Os erros obtidos nas medições são provocados por variações associadas ao instrumento utilizado, ao operador, às condições ambientais, entre outras.

Assim, O documento ISO: "Guide to the expression of uncertainty in measurement" (1993), cuja versão brasileira - "Guia para Expressão da Incerteza de Medição" foi publicada em 1997 e revisada em 2003, diz que quando se relata o resultado da medição de uma grandeza física, é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou em uma norma.

É, portanto, necessário que haja um procedimento prontamente implementado, facilmente compreendido e de aceitação geral para caracterizar a qualidade do resultado de uma medição, isto é, avaliar e expressar sua incerteza.

Desta forma, o valor da incerteza de medição oferece uma estimativa da influência combinada de todos os erros presentes em uma medição, que impede conhecimento exato do valor do mesurando. A incerteza é expressa geralmente, como uma faixa de valores distribuídos simetricamente em torno do valor obtido como resultado (PHILLIPS, 1995).

Mesmo após a correção de efeitos sistemáticos conhecidos, sabe-se que o resultado de uma medição é ainda tão somente, uma estimativa do valor do mesurando, pois sempre existirá uma incerteza devido aos efeitos aleatórios e à correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos [ISO-GUM, 2003].

3.4.1. CLASSIFICAÇÃO ATUAL DAS FONTES DE INCERTEZA

A recomendação INC-1 (1980) do Grupo de Trabalho sobre a Declaração de Incertezas agrupa os componentes da incerteza em duas categorias baseadas no seu método de avaliação, categorias A e B.

Estas categorias são aplicadas à incerteza e não são substitutas para os termos “incerteza aleatória” e “incerteza sistemática”.

Considera-se uma incerteza do Tipo A todas aquelas que são avaliados com o auxílio de métodos estatísticos e descreve a dispersão da série de medições (LINK, 1997).

Esta incerteza é chamada de incerteza padrão do tipo A e é obtida de uma função densidade de probabilidade derivada da observação de uma distribuição de frequência (LIRA, 2001).

Se a grandeza (q) pode ser obtida através de observações repetidas a melhor estimativa disponível da média populacional é a média aritmética $\bar{x}$ das n observações independentes (equação 3.3):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.3)$$

Sabendo-se que as observações individuais (q_k) diferem em valor devido a variações aleatórias, a variância experimental das observações, que estima a variância σ^2 da distribuição de probabilidade de x , é dada pela equação 3.4:

$$s^2(x_i) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.4)$$

A raiz quadrada da estimativa variância é denominada desvio padrão experimental e caracteriza a variabilidade dos valores x_i observados ou mais especificamente sua dispersão em torno de sua

média $\bar{x}$. Além disso, pode ser denominada incerteza padronizada tipo A.

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

Quando a estimativa de uma incerteza não é realizada por processo estatístico e sim avaliada por julgamento científico baseando-se em informações disponíveis sobre a possível variabilidade da grandeza em estudo será chamada de incerteza do tipo B. Tais informações podem ser obtidas de resultados da experiência ou do conhecimento do comportamento do instrumento, dados do fabricante, dados fornecidos por certificados de calibração e referências de manuais de instrução. (ISO-GUM, 2003).

Segundo LINK (1997), em uma avaliação do tipo B é necessário considerar a inclusão de pelo menos as incertezas originárias 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 (mensurando) 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.

É importante ressaltar que muitas vezes as informações sobre as incertezas do tipo B estabelecem intervalos de confiança, sendo necessário extrair o valor da incerteza a partir do conhecimento da distribuição de probabilidade.

A figura 3.22 ilustra esquematicamente algumas distribuições de probabilidade: a retangular, a trapezoidal, a triangular onde a média da distribuição é representado por μ_t .

Figura 3.22 - Distribuições de probabilidades.

A distribuição retangular é utilizada na ausência de qualquer informação.

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 (3.5).

$$u^2(x_i) = \frac{(a_s - a_i)^2}{12} \quad (3.5)$$

Se a diferença entre os limites, $a_s - a_i$ é designada por $2a$, então a equação (3.6) torna-se:

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{3} \Rightarrow ux_i = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3.6)$$

A distribuição com geometria trapezoidal pode ser aplicada nos casos onde é razoável considerar que os valores junto aos limites do intervalo são menos prováveis de ocorrerem que os valores próximos ao centro. Há nestes casos, a aplicação de uma distribuição trapezoidal simétrica, com a base maior do trapézio igual a $2a$ e a base menor $2\beta a$ com $0 \leq \beta \leq 1$. Se $\beta \rightarrow 1$ a distribuição trapezoidal deve se aproximar da retangular, enquanto quando $\beta=0$ a distribuição é triangular (ISO-GUM, 1997).

Assumindo que q_i tenha uma distribuição trapezoidal a variância associada é dada por:

$$u^2(x_i) = \frac{a^2(1+\beta^2)}{6} \Rightarrow u(x_i) = a\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}} \quad (3.7)$$

Agora assumindo que q_i tenha distribuição triangular a variância associada é dada pela equação (3.8):

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{6} \Rightarrow u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (3.8)$$

3.4.2. INCERTEZA PADRONIZADA POMBINADA

A medição de uma determinada grandeza Y pode ser influenciada por n outras grandezas através de uma relação funcional f .

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.9)$$

A incerteza padronizada combinada, $u_c(y)$, considerando a equação (3.9), é dada pela raiz quadrada positiva da expressão (3.10) a seguir:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (3.10)$$

onde, para cada fonte de erro representada por uma estimativa x_i , deve-se estimar primeiramente, a variância $u^2(x_i)$, cuja raiz quadrada é a incerteza $u(x_i)$.

Nesta equação, cada variância individual $u^2(x_i)$ está multiplicada pelo quadrado de uma quantidade $(\partial f / \partial x_i)$ conhecida como coeficiente de sensibilidade. O valor deste coeficiente descreve a importância ou a contribuição de uma determinada fonte de incerteza no valor final da incerteza padrão combinada. Desta forma é possível identificar as fontes de erros mais significativas.

O segundo termo da equação 3.10 expressa a contribuição extra na incerteza quando existe correlação entre duas fontes de q_i e q_j . Se as fontes de incertezas são independentes entre si, a correlação é igual a zero e este termo desaparece, a equação (3.10) se reduz a:

$$u_c^2(y) = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) u(x_i) \right]^2 \quad (3.11)$$

3.4.3. INCERTEZA EXPANDIDA

O CIPM sugere o termo incerteza expandida cujo símbolo é U para descrever o intervalo de valores dentro do qual se espera que esteja o valor verdadeiro de Y , para certo nível da confiança p . A incerteza U é

obtida, multiplicando-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência K , é dada pela expressão:

$$U = k.u_c(y) \quad (3.12)$$

O resultado de uma medição é, então, convenientemente expresso como $Y = y \pm U$, que é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando Y é y , e que $y - U$ a $y + U$ é um intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores atribuídos a Y . Tal intervalo é também expresso como $y - U \leq Y \leq y + U$.

A incerteza expandida não acrescenta nenhuma informação nova à declaração de incerteza, porém ela é uma maneira diferente de apresentar a informação previamente disponível para satisfazer requerimentos de algumas aplicações comerciais e industriais, que precisam de um intervalo de valores em torno ao resultado da medição (ISO-GUM, 2003).

Entretanto, o “Guia para a expressão da incerteza” (ISO-GUM, 2003) não especifica exatamente como a relação entre o fator de abrangência k e o nível da confiança p deve ser estabelecida.

Em geral, é comum assumir que k estará entre 2 e 3. Algumas vezes, quando se sabe que a distribuição de probabilidade é aproximadamente normal e o número de graus de liberdade de $u_c(y)$ é grande o suficiente, assume-se $k=2$ para um intervalo da confiança de 95% e $k=3$ para um intervalo com nível da confiança de 99% [ORREGO, 1999].

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO INDIRETA DE MM3C

As tendências atuais de produção demandam sistemas de medição ágeis e que apresentem alta acuracidade, sendo capazes de realizar medições da ordem de unidades de micrometros.

A proposta para calibração indireta de MM3C é apresentada neste capítulo. Na calibração de MM3C, o tempo de calibração, o custo do processo de calibração e os métodos existentes de calibrações são tópicos importantes na escolha de um procedimento eficaz.

Portanto, a calibração indireta é considerada um método bastante eficaz se comparado com o método direto, devido à redução do tempo e no custo.

O método proposto neste capítulo é a calibração indireta com a utilização de um esquadro mecânico de esferas como artefato padrão para a calibração de máquinas de medir a três coordenadas.

Para um melhor entendimento, o capítulo foi separado em quatro partes, descritas como: esquadro mecânico de esferas, modelo matemático de sintetização de erros, calibração da MM3C com o esquadro mecânico de esferas e cálculo da incerteza de medição.

4.1. ESQUADRO DE ESFERAS

O esquadro mecânico de esferas utilizado para a calibração da MM3C foi confeccionado na oficina mecânica do LAMAFE e no Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC (USP – São Carlos).

Para a calibração do esquadro mecânico de esferas, utilizou-se um ambiente com temperatura e umidade controladas, uma Máquina Universal de Medir (SIP), blocos-padrão e um apalpador basculante tipo LVDT (Tesa).

4.2. MODELO MATEMÁTICO DE SINTETIZAÇÃO DE ERROS

Para obtenção do modelo matemático de sintetização de erros da MM3C é necessário utilizar técnicas existentes de modelagem, sendo as mais conhecidas, a Análise Geométrica Estrutural, a Análise Vetorial dos Caminhos de Medição, a Análise matricial através das Transformações Homogêneas e a Análise Estatística.

Para construção do modelo matemático utilizado neste trabalho foi utilizada a técnica da análise geométrica estrutural, onde verifica-se cada erro individual nas direções preferenciais da MM3C e, pela superposição dos efeitos, são obtidas as expressões das componentes E_x , E_y e E_z do erro volumétrico. Em cada uma das expressões, os termos são reagrupados de maneira a unir somente os efeitos dos erros que modificam o posicionamento da ponta da sonda em cada direção preferencial, assim as equações tornam-se reduzidas e um Modelo Reduzido de Sintetização de Erros (MRSE) foi desenvolvido.

4.3. CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO DE ESFERAS

Os testes experimentais de calibração da máquina são realizados com o posicionamento do esquadro mecânico de esferas em múltiplas orientações determinadas pela Análise Geométrica da máquina de acordo com o MRSE obtido, medindo-se as posições relativas previamente calibradas dos centros das esferas.

4.4. CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza do resultado de uma medição pode ser avaliada por meios estatísticos, através da variação dos fatores do ambiente, tais como temperatura, umidade, instrumento de medição, habilidade do operador e a peça de trabalho. Por isso, a incerteza do resultado da medição é avaliada usando-se o modelo reduzido de sintetização de erros (MRSE). Pode-se realizar a propagação das incertezas dos erros medidos seguindo as diretrizes estabelecidas pelo Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (2003), estabelecendo assim a incerteza associada a cada componente do erro volumétrico para cada ponto coordenado dentro do volume de trabalho da máquina.

CAPÍTULO 5

DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO INDIRETA EM MM3C TIPO PONTE MÓVEL

Neste capítulo será apresentada a descrição do procedimento de calibração indireta de MM3C do tipo Ponte Móvel e para uma melhor compreensão, o capítulo está dividido em: Características construtivas e operacionais da MM3C; Descrição do esquadro de esferas; Calibração da MM3C com o esquadro de esferas; Modelo Reduzido de Sintetização de Erros (MRSE) e a Incerteza de Medição.

5.1. DESCRIÇÃO DA MM3C UTILIZADA NOS TESTES EXPERIMENTAIS

A MM3C do tipo ponte móvel utilizada nos testes experimentais está localizada 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", é composta de uma base de alumínio fundido e possui uma mesa de granito apoiado sobre três esferas e suportes em "V" com três parafusos para efetuar o nivelamento.

A MM3C pode ser observada na figura 5.1. Na máquina, o eixo de movimentação Y é formado por uma ponte que movimenta-se sobre duas guias montadas diretamente sobre a estrutura.

As duas colunas da ponte sustentam a guia que compõe o eixo X sobre a qual desloca-se, perpendicular ao eixo Y, o carro X. Este sustenta o eixo Z, que é simultaneamente perpendicular aos eixos X e Y, e o mesmo sustenta a sonda de medição.

O sistema de medição em cada eixo da máquina consiste de escalas ópticas, o sistema de leitura, baseado no princípio das Franjas de Moiré. Cada eixo possui uma escala fixa e uma escala móvel, um receptor e um emissor. O movimento entre as escalas fixa e móvel provoca uma variação da intensidade de luz que chega ao receptor. O receptor transforma essa variação luminosa em sinal elétrico, interpretada como deslocamentos.

Figura 5.1 – Máquina de Medir a Três Coordenadas (Brown & Sharp).

A tabela 5.1 resume as características e condições técnicas de operação da MM3C.

Tabela 5.1 – Características e condições técnicas da MM3C.

Dimensões	
Curso de Medição	direção X: 356 mm
	direção Y: 406 mm
	direção Z: 305 mm
Comprimento (direção X)	743 mm
Largura (direção Y)	730 mm
Altura (direção Z)	1340 mm
Requisitos Operacionais	
Temperatura de Calibração	20 °C ± 1 °C
Temperatura Operacional	10 a 40 °C
Pressão Pneumática	70 psi
Conjunto Regulador de Pressão	55 psi

5.1.1. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O Programa utilizado neste trabalho foi desenvolvido por MARQUES, A (2003) em ambiente DELPHI. Este programa foi adaptado para aquisição de dados, medidos na MM3C. O programa MaqMed 2000 consiste em diversos elementos gráficos como menus, janelas e outros, proporcionando uma melhor visualização e utilização. A interface ao usuário, referente às rotinas de medições, está apresentada no fluxograma da figura 5.2.

Figura 5.2 – Fluxograma do Programa de aquisição de dados.

O aplicativo, depois de iniciado, abre uma série de janelas e menus que conduzem o usuário a escolher a origem do sistema de coordenadas.

O procedimento para a qualificação da sonda consiste em mover os eixos da MM3C para posição inicial, ou seja, o eixo Y na frente da máquina, o eixo X no extremo esquerdo e o eixo Z totalmente recuado.

Depois de colocado nessa posição, o operador da máquina informa ao programa, através da tecla zerar réguas, que a origem foi definida (fig. 5.3).

Figura 5.3 – Tela inicial do MaqMed 2000.

O passo seguinte é a qualificação do apalpador, ou seja, determinar a dimensão do apalpador de medição (DAM) e o diâmetro da esfera da ponta do apalpador (DPA). Isso é feito através de um procedimento que utiliza uma esfera padrão com dimensões conhecidas pelo programa computacional. Os procedimentos para qualificação do apalpador podem ser vistos na figura 5.4. O usuário deve retirar a sonda e mover o eixo Z sobre a esfera padrão, informar ao programa que foi definido a posição da esfera padrão. Inserir a sonda no eixo Z da

máquina e medir a esfera padrão com no mínimo quatro pontos coordenados.

Através desses pontos foram calculados a DAM e o DPA e o programa compensará esses valores das coordenadas medidas, ou seja, o sistema de coordenadas auxiliar será transferido para o centro da ponta do apalpador de medição.

Figura 5.4 – Procedimento para qualificação do apalpador (MARQUES, 2003).

Após a qualificação do apalpador, o processo de medição pode ser iniciado. Antes da escolha do tipo de medição no menu principal (figura 5.5) escolhe-se o item "referência" para transferir o sistema de coordenadas da máquina para a peça. Gerada a "referência" deve-se escolher o tipo de medição a ser realizada (figura 5.6).

Realizada a escolha do tipo de medição, tomam-se pontos no perfil da peça, utilizando o apalpador de medição, que deve ser no mínimo a quantidade necessária para a definição da geometria. Então o programa apresenta uma tela dos resultados. Na medição da distância entre os centros de duas esferas, por exemplo, deve-se tomar pelo

menos quatro pontos na superfície de cada esfera, o método dos mínimos quadrados é aplicado para a definição do diâmetro da esfera e da posição do seu centro. Após efetuar os cálculos o aplicativo mostrará uma tela contendo os resultados, tais como: coordenadas X, Y e Z do centro de cada esfera medida, distância entre os centros das esferas e estimativa do erro de medição feita através de propagação de erros.

Figura 5.5 – Tela do Menu principal do MaqMed 2000.

Figura 5.6 – Telas para escolha da medição.

5.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DO ESQUADRO DE ESFERAS

A calibração do esquadro foi feita no laboratório de metrologia com temperatura e umidade controladas. Foram calibradas as posições relativas entre os centros das esferas, retilidade e perpendicularismo. Os resultados estão apresentados no capítulo 6.

5.2.1. DESCRIÇÃO DO ESQUADRO MECÂNICO DE ESFERAS

Na montagem do esquadro de esferas foram utilizadas duas barras de alumínio aeronáutico com dimensões 469x309,5 mm e esferas de aço cromo com 28,579 mm (1"1/8") de diâmetro, uma das barras com 9 (nove) esferas e a outra barra com 7 (sete) esferas, formando um ângulo nominal de 90° entre as faces do esquadro. As esferas foram posicionadas nas faces internas do esquadro, com uma distância nominal de 40 mm entre as esferas (figura 5.7).

Figura 5.7 – Desenho do conjunto do esquadro.

5.2.1.1. CALIBRAÇÃO DA POSIÇÃO RELATIVA ENTRE OS CENTROS DAS ESFERAS

A calibração do posicionamento das esferas para cada haste na direção preferencial foi realizada em uma máquina universal de medir, fabricada pela Societe Genevoise D'Instruments de Physique (SIP), tipo 302M, cuja resolução é de 0,0001mm.

A princípio, o esquadro de esferas foi colocado em um ambiente para estabilização térmica, permanecendo por um período de aproximadamente 12 horas à temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ com umidade relativa de $45 \pm 10\%$.

A figura 5.8 apresenta o posicionamento do esquadro de esferas na SIP para a medição das distâncias entre os centros das esferas, tal que cada distância entre esferas foi medida cinco vezes. Os valores das médias e dos desvios padrões foram calculados e usados para determinação das distâncias entre centros das esferas tidas como padrão.

Figura 5.8 – Calibração da posição na SIP.

5.2.1.2. Calibração da Retilidade do Esquadro de Esferas

A figura 5.9 apresenta o esquadro mecânico de esferas no plano XY e com seus erros de retilidade aplicados em dois planos, um no plano do esquadro e outro perpendicular ao plano do esquadro.

Os procedimentos de medição dos erros de retilidade entre os centros das esferas estão apresentados nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12.

Figura 5.9 – Posicionamento do esquadro no plano XY.

A calibração de retilidade entre as posições dos centros das esferas foi realizada no desempenho de granito da marca Mitutoyo com máximo erro de planicidade de 8 μm . Utilizou-se apalpador eletrônico da marca Tesa e um bloco-padrão da marca Starrett de grau zero.

O procedimento de medição do erro de retilidade no plano perpendicular ao esquadro XY, na direção Z da haste longa e haste curta, respectivamente, $\delta z(x_\alpha, y, z_\alpha)$ e $\delta z(x, y_\alpha, z_\alpha)$. A medição das alturas das esferas foi feita com o auxílio de um bloco-padrão posicionado sobre duas esferas. Dois pontos demarcados no bloco-padrão foram medidos com um apalpador eletrônico. Tomando-se como

referência a esfera P1 as Diferenças de alturas na direção Z foram medidas (figura 5.10).

Figura 5.10 – Montagem do esquadro no desempenho.

Seguindo o mesmo procedimento de medição, a figura 5.11 apresenta o esquema de medição do erro de retilidade no plano do esquadro, na direção X, $\delta x(x_a, y, z_a)$.

Figura 5.11 – Montagem do esquadro no desempenho.

Da mesma forma, a figura 5.12 apresenta o esquema de medição do erro de retilidade no plano do esquadro, na direção Y, $\delta y(x, y_a, z_a)$.

Figura 5.12 – Montagem do esquadro no desempenho.

5.2.1.3. Calibração de Perpendicularismo do Esquadro de esferas

O erro de perpendicularismo foi obtido pelo método da reversão. O esquadro foi medido em duas posições (figura 5.13 e 5.14). A posição direta (A) e a reversa (B) depois da reversão devem permanecer paralelas ao eixo X e aproximadamente na mesma posição.

Figura 5.13 – Método da Reversão (A).

Figura 5.14 – Método da Reversão (B).

Após as medições, encontram-se as posições X_i , Y_j dos centros das esferas e as melhores retas por mínimos quadrados, que passem pelos centros das esferas.

Na posição A do esquadro, o ângulo entre as retas, medido pela MM3C, equivale a soma do ângulo β do esquadro e o ângulo α da MM3C, conforme a expressão 5.1. Ao mudar-se a posição do esquadro para a posição B (reversa), muda-se o sinal do erro da MM3C,

mudando-se também o valor obtido para o ângulo β do esquadro, conforme a expressão 5.2.

Figura 5.15 – Método da Reversão do Esquadro.

$$\theta_1 = \alpha + \beta \quad (5.1)$$

$$\theta_2 = \alpha - \beta \quad (5.2)$$

Portanto, o erro de perpendicularismo do esquadro pode ser calculado pela expressão (5.3).

$$\beta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (5.3)$$

A seguir o erro de ortogonalidade XY da MM3C pode ser calculado pela expressão (5.4).

$$\alpha = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (5.4)$$

5.3. Procedimento de Calibração da MM3C com o Esquadro de Esferas

O método aplicado na calibração indireta da Máquina de Medir por Coordenadas utiliza um esquadro de esferas medido em cinco posições distintas dentro do volume de trabalho. As posições de calibração estão apresentadas nas Figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 onde estão indicados os erros medidos.

Na montagem do esquadro na posição M1 da Figura 5.16 a haste maior está paralela ao eixo Y com o menor braço de Abbè na direção X. As componentes medidas estão indicadas na Tabela 5.2.

Figura 5.16 - Montagem do Esquadro na Posição M1.

Tabela 5.2 – Componentes do Erro na Posição M1.

Haste	Erro Geométrico	Erros
Longa	Posição - direção Y	$\delta y(x_a, y, z_a)$
	Retilidade X direção Y	$\delta x(x_a, y, z_a)$
	Retilidade Z direção Y	$\delta z(x_a, y, z_a)$
Curta	Posição - direção X	$\delta x(x, y_a, z_a)$
	Retilidade Y direção X	$\delta y(x, y_a, z_a)$
	Retilidade Z direção X	$\delta z(x, y_a, z_a)$

Na montagem do esquadro na posição M2 mostrada na Figura 5.17 a haste maior deve estar paralela ao eixo Y, no maior braço de Abbè (X_ω) e as componentes medidas estão descritas na Tabela 5.3.

Figura 5.17 - Montagem do Esquadro na Posição M2.

Tabela 5.3 - Componentes do Erro na Posição M2.

Haste	Erro Geométrico	Erros
Longa	Posição - direção Y	$\delta y(x_\omega, y, z_a)$
	Retilidade X direção Y	$\delta x(x_\omega, y, z_a)$
	Retilidade Z direção Y	$\delta z(x_\omega, y, z_a)$
Curta	Posição - direção X	$\delta x(x, y_a, z_a)$
	Retilidade Y direção X	$\delta y(x, y_a, z_a)$
	Retilidade Z direção X	$\delta z(x, y_a, z_a)$

Na montagem do esquadro na posição M3 da figura 5.18, o esquadro foi apoiado sobre suportes apropriados, de modo que a haste maior ficasse paralela ao eixo y com o menor braço de Abbé possível. O

plano do esquadro deve estar paralelo ao plano de referência XY em Z_ω . As componentes medidas estão descritas na tabela 5.4.

Figura 5.18 - Montagem do Esquadro na Posição M3.

Tabela 5.4 - Componentes do Erro na Posição M3.

Haste	Erro Geométrico	Erros
Longa	Posição - direção Y	$\delta y(x_a, y, z_\omega)$
	Retilidade X direção Y	$\delta x(x_a, y, z_\omega)$
	Retilidade Z direção Y	$\delta z(x_a, y, z_\omega)$
Curta	Posição - direção X	$\delta x(x, y_a, z_\omega)$
	Retilidade Y direção X	$\delta y(x, y_a, z_\omega)$
	Retilidade Z direção X	$\delta z(x, y_a, z_\omega)$

Na montagem do esquadro na posição M4 da figura 5.19 a haste maior deve estar paralela ao eixo Y com o menor braço de Abbè. A

haste menor deve estar na direção perpendicular ao plano XY e as componentes medidas estão descritas na tabela 5.5.

Figura 5.19 - Montagem do Esquadro na posição M4.

Tabela 5.5 - Componentes do Erro na Posição M4.

Haste	Erro Geométrico	Erros
Longa	Posição - direção Y	$\delta y(x_a, y, z_a)$
	Retilidade X direção Y	$\delta x(x_a, y, z_a)$
	Retilidade Z direção Y	$\delta z(x_a, y, z_a)$
Curta	Posição - direção Z	$\delta z(x_a, y_a, z)$
	Retilidade X direção Z	$\delta x(x_a, y_a, z)$
	Retilidade Y direção Z	$\delta y(x_a, y_a, z)$

Na montagem do esquadro na posição M5 da figura 5.20 a haste maior deve estar paralela ao eixo X com o menor braço de Abbè. A

haste menor deve estar na direção perpendicular ao plano XY e as componentes medidas estão descritas na tabela 5.6.

Figura 5.20 - Montagem do Esquadro na posição M5.

Tabela 5.6 - Componentes do Erro na Posição M5.

Haste	Erro Geométrico	Erros
Longa	Posição - direção X	$\delta x(x, y_a, z_a)$
	Retilidade Y direção X	$\delta y(x, y_a, z_a)$
	Retilidade Z direção X	$\delta z(x, y_a, z_a)$
Curta	Posição - direção Z	$\delta z(x_a, y_a, z)$
	Retilidade X direção Z	$\delta x(x_a, y_a, z)$
	Retilidade Y direção Z	$\delta y(x_a, y_a, z)$

5.4. Modelo Reduzido de Sintetização de Erros

O modelo matemático proposto tem como objetivo descrever o comportamento dos erros geométrico nas direções X, Y e Z, em máquinas de medir a três coordenadas. O modelo matemático para o cálculo das componentes do erro volumétrico é gerado a partir da análise geométrica. A análise feita é válida somente para MM3C em pauta, pois as equações das componentes do erro dependem da distribuição dos eixos.

A figura 5.21 apresenta uma MM3C, do tipo ponte móvel, com o sistema de coordenadas de referência com origem nas posições mais recuadas de todos os eixos.

Figura 5.21 - Sistema de coordenadas de referência.

Na figura 5.22 o eixo Y da MM3C é o eixo de referência por onde o pórtico transporta os eixos X e Z. Os erros de translações e rotações indesejáveis estão apresentados.

Diante do movimento de translação na direção do eixo Y, está presente o erro de posição propriamente dito ou de escala devido às

imperfeições na construção e leitura de escala. Ao mesmo tempo deslocamentos infinitesimais indesejáveis perpendiculares à direção perpendiculares, são chamados de erros de retilineidade ou erros de posição transversal, devido às imperfeições do sistema de guias e mancais que carregam o pórtico. Os erros de rotações também estão presentes no pórtico em torno dos eixos X, Y e Z chamadas de Pitch, Roll e Yaw que para os vários braços de Abbè produzem deslocamentos nos planos de rotações.

Figura 5.22 - Análise de erros - movimentação do eixo Y.

Tabela 5.7 - Erros devido a movimentação do eixo Y.

Erro Geométrico	Direção		
	X	Y	Z
Posição propriamente dito		$\delta y(x_a, y, z_a)$	
Retilineidade	$\delta x(x_a, y, z_a)$		$\delta z(x_a, y, z_a)$
Pitch		$\delta \phi_x(x_a, y, z_a) \cdot Z$	
Yaw		$\delta \phi_z(x_a, y, z_a) \cdot X$	
Roll	$\delta \phi_y(x_a, y, z_a) \cdot Z$		$\delta \phi_y(x_a, y, z_a) \cdot X$

Da mesma forma, o movimento de translação na direção do eixo X pode ser analisado. As rotações e as translações infinitesimais indesejáveis estão indicadas na figura 5.23 e os comentários semelhantes aos já feitos no eixo Y podem ser observados. Os erros de posição propriamente ditos ou de escala, erros de retilidade e erros angulares estão sumarizados na tabela 5.8. Na movimentação do eixo X, o eixo transporta o eixo Z.

Figura 5.23 - Análise de erros - movimentação do eixo X.

Tabela 5.8 - Erros devido a movimentação do eixo X.

Erro Geométrico	Direção		
	X	Y	Z
Posição propriamente dito	$\delta x(x, y_a, z_a)$		
Retilidade		$\delta y(x, y_a, z_a)$	$\delta z(x, y_a, z_a)$
Pitch	$\delta \phi_y(x, y_a, z_a) \cdot Z$		
Yaw			
Roll		$\delta \phi_x(x, y_a, z_a) \cdot Z$	

A mesma análise geométrica é feita para o movimento do eixo Z. O movimento de translação na direção do eixo Z sofre rotações e translações indesejáveis, conforme indicações da figura 5.24 e sumarizados na tabela 5.9.

Figura 5.24 - Análise de erros - movimentação do eixo Z.

Tabela 5.9 - Erros devido a movimentação do eixo Z.

Erro Geométrico	Direção		
	X	Y	Z
Posição propriamente dito			$\delta z(x_\alpha, y_\alpha, z)$
Retilidade	$\delta x(x_\alpha, y_\alpha, z)$	$\delta y(x_\alpha, y_\alpha, z)$	
Pitch		$\delta \phi_x(x_\alpha, y_\alpha, z) \cdot z$	
Yaw	$\delta \phi_y(x_\alpha, y_\alpha, z) \cdot z$		
Roll			

A superposição de todos esses efeitos permite que sejam escritas as equações que sintetizam as componentes E_x , E_y e E_z do erro volumétrico, de acordo com as equações (5.5), (5.6) e (5.7).

➤ **Expressão da Componente E_x do Erro Volumétrico**

$$\begin{aligned} E_x = & \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y_\alpha, z) + \\ & + \delta \phi y(x_\alpha, y_\alpha, z).z + \delta \phi y(x, y_\alpha, z_\alpha).z + \\ & + \delta \phi y(x_\alpha, y, z_\alpha).z + \delta \phi y_0.z \end{aligned} \quad (5.5)$$

➤ **Expressão da Componente E_y do Erro Volumétrico**

$$\begin{aligned} E_y = & \delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta y(x_\alpha, y_\alpha, z) + \\ & + \delta \phi x(x_\alpha, y_\alpha, z).z + \delta \phi y(x, y_\alpha, z_\alpha).z + \delta \phi x(x_\alpha, y, z_\alpha).z + \\ & + \delta \phi z(x_\alpha, y, z_\alpha).x + \delta \phi z_0.x + \delta \phi x_0.z \end{aligned} \quad (5.6)$$

➤ **Expressão da Componente E_z do Erro Volumétrico**

$$\begin{aligned} E_z = & \delta z(x_\alpha, y_\alpha, z) + \delta z(x, y_\alpha, z_\alpha) + \\ & + \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta \phi y(x_\alpha, y, z_\alpha).x \end{aligned} \quad (5.7)$$

A equação de sintetização de erros (5.5) da componente E_x , adaptada à calibração com o esquadro de esferas apresenta-se como a equação (5.8).

$$\begin{aligned}
E_x = & \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y_\alpha, z) \\
& + \left[\frac{\delta x(x, y_\alpha, z_\omega) - \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (z - z_\alpha) \\
& + \left[\frac{\delta x(x_\alpha, y, z_\omega) - \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (z - z_\alpha)
\end{aligned} \tag{5.8}$$

A contribuição $\delta\phi_{y_o}.z$ do erro de perpendicularismo $\delta\phi_{y_o}$ entre os eixos X e Z na componente EX do erro volumétrico está presente no termo de erro de posição transversal $\delta x(x_\alpha, y_\alpha, z)$ do eixo Z na direção X montagem M5 que também contém a contribuição da rotação $\delta\phi_y(x_\alpha, y_\alpha, z).z$ do eixo Z em torno de Y.

As contribuições das rotações em torno do eixo Y devido a movimentos em X e Y $\delta\phi_y(x, y_\alpha, z_\alpha).z$ e $\delta\phi_y(x_\alpha, y, z_\alpha).z$ são obtidas a partir das relações lineares entre as medições dos erros de posição transversal para dois valores limites z_α e z_ω nas montagens M1 e M2.

As equações das componentes Ey e Ez do erro volumétrico também são adaptadas ao procedimento de calibração com o esquadro de esferas e os termos vinculados aos movimentos angulares são substituídos da mesma forma que a discutida anteriormente e estão.

As contribuições dos erros de perpendicularismo entre X e Y $\delta\phi_{z_o}.x$ e entre Y e Z $\delta\phi_{x_o}.z$ na componente Ey estão respectivamente presentes nos termos de erros de posição

transversal $\delta y(x, y_\alpha, z_\alpha)$ do eixo X, na direção Y (M1) e $\delta y(x_\alpha, y_\alpha, z)$ do eixo Z na direção Y (M4). Esta última contém também a contribuição da rotação $\delta\phi_x(x_\alpha, y_\alpha, z) \cdot z$ de Z em torno de X.

As contribuições das rotações em torno de X, Y e Z respectivamente $\delta\phi_x(x_\alpha, y, z_\alpha) \cdot z$, $\delta\phi_y(x, y_\alpha, z_\alpha) \cdot z$ e $\delta\phi_z(x_\alpha, y, z_\alpha) \cdot x$ na componente E_y são obtidas a partir das relações lineares, entre os erros medidos nas posições de montagem M1 e M3 para os dois primeiros termos, e M1 e M2 para o terceiro. As medições são realizadas na direção Y para os dois valores limites de coordenadas z_α , z_ω e x_α , x_ω . A equação (5.6) fica assim resumida:

$$\begin{aligned}
 E_y = & \delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta y(x_\alpha, y_\alpha, z) \\
 & + \left[\frac{\delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) - \delta y(x, y_\alpha, z_\omega)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (z - z_\alpha) \\
 & + \left[\frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\alpha, y, z_\omega)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (z - z_\alpha) \\
 & + \left[\frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\omega, y, z_\alpha)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (x - x_\alpha)
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Na direção Z a contribuição da rotação de Y em torno de Y $\delta\phi_y(y) \cdot x$ modifica a coordenada Z na proporção calculada a partir dos deslocamentos medidos nas montagens M1 e M2 para valores limites x_α e x_ω . A equação (5.7) fica:

$$E_z = \delta z(x_\alpha, y_\alpha, z) + \delta z(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha) + \left[\frac{\delta z(x_\omega, y, z_\alpha) - \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha)}{(x_\omega - x_\alpha)} \right] \cdot (x - x_\alpha) \quad (5.10)$$

Estas são as equações do modelo reduzido proposto. As entradas são os erros medidos com o esquadro de esferas em posições definidas no volume de trabalho. As saídas são os erros sintetizados em quaisquer posições desse volume.

5.5. Estimativa da Incerteza de Medição

A qualidade dos resultados obtidos nos testes experimentais é tão importante quanto os próprios resultados, assim sendo, surge a necessidade de se estimar as incertezas de medição como forma de expressar a qualidade dos resultados obtidos.

As incertezas de medição são obtidas através da aplicação da Lei de Propagação de Incertezas para as equações das componentes E_x , E_y e E_z do erro volumétrico.

Entretanto, em todas as equações, observa-se a presença de grandezas que, por sua vez, são calculadas a partir de medições realizadas utilizando o artefato padrão, o esquadro mecânico de esferas. Assim sendo, é necessário realizar os cálculos dessas grandezas.

Os valores das variáveis, nas medições dimensionais, tanto são influenciados pela resolução do instrumento quanto por fatores do ambiente, tais como: temperatura, umidade, vibrações externas. Embora a influência desses fatores contribua para a incerteza das

medições, muitas vezes não necessitam ser corrigidas, devido à ordem da grandeza (magnitude) requerida.

Serão utilizadas tabelas para facilitar a apresentação dos cálculos utilizados para a estimativa das incertezas de medição. Nas tabelas serão apresentadas as equações das grandezas medidas, considerando todos os fatores que influenciam a medição: o tipo de medição, no caso de medição tipo A; o tamanho da amostra; o número de graus de liberdade efetivos; a distribuição de probabilidade; a propagação das incertezas e os coeficientes de sensibilidade.

➤ **Estimativa da Incerteza de Medição na Determinação da Componente Ex do Erro Volumétrico**

A equação reduzida para o cálculo da componente E_x do erro volumétrico é representada na equação (5.11).

$$\begin{aligned}
 E_x = & \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y_\alpha, z) \\
 & + \left[\frac{\delta x(x, y_\alpha, z_\omega) - \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (z - z_\alpha) \\
 & + \left[\frac{\delta x(x_\alpha, y, z_\omega) - \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (z - z_\alpha)
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Para a estimativa da incerteza de medição da componente E_x do erro volumétrico, aplica-se a lei da propagação de incertezas na equação (5.11), e tem-se a tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Parâmetros para Determinar a Incerteza da Medição das Distâncias entre os Centros das Esferas.

Coeficiente de sensibilidade do erro volumétrico E_x em relação à variável $v_i \left(\frac{\partial E_x}{\partial v_i} \right)$	
$\frac{\partial E_x}{\partial \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha)}$	$= 1 - \frac{z - z_\alpha}{z_\omega - z_\alpha}$
$\frac{\partial E_x}{\partial \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha)}$	$= 1 - \frac{z - z_\alpha}{z_\omega - z_\alpha}$
$\frac{\partial E_x}{\partial \delta x(x_\alpha, y_\alpha, z)}$	$= 1$
$\frac{\partial E_x}{\partial \delta x(x, y_\alpha, z_\omega)}$	$= \frac{z - z_\alpha}{z_\omega - z_\alpha}$
$\frac{\partial E_x}{\partial \delta x(x_\alpha, y, z_\omega)}$	$= \frac{z - z_\alpha}{z_\omega - z_\alpha}$
$\frac{\partial E_x}{\partial z}$	$= \frac{\delta x(x, y_\alpha, z_\omega) - \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta x(x_\alpha, y, z_\omega) - \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha)}{(z_\omega - z_\alpha)}$
$\frac{\partial E_x}{\partial z_\alpha}$	$= \delta x(x, y_\alpha, z_\omega) - \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha) \left[\frac{1}{(z_\alpha - z_\omega)} + \frac{z - z_\alpha}{(z_\alpha - z_\omega)^2} \right] +$ $+ \delta x(x_\alpha, y, z_\omega) - \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha) \left[\frac{(z - z_\alpha)}{(z_\alpha - z_\omega)} + \frac{z - z_\alpha}{(z_\alpha - z_\omega)^2} \right]$
$\frac{\partial E_x}{\partial z_\omega}$	$= \delta x(x, y_\alpha, z_\omega) - \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha) \left[\frac{z - z_\alpha}{(z_\omega - z_\alpha)} + \frac{z - z_\alpha}{(z_\alpha - z_\omega)^2} \right] +$ $+ \delta x(x_\alpha, y, z_\omega) - \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha) \left[\frac{(z - z_\alpha)}{(z_\omega - z_\alpha)} + \frac{z - z_\alpha}{(z_\alpha - z_\omega)^2} \right]$

► **Estimativa da Incerteza de Medição na Determinação da Componente E_y do Erro Volumétrico**

A equação reduzida para o cálculo da componente E_y do erro volumétrico é reapresentada na equação (5.12).

$$\begin{aligned}
 E_y = & \delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) + \delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta y(x_\alpha, y_\alpha, z) \\
 & + \left[\frac{\delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) - \delta y(x, y_\alpha, z_\omega)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (z - z_\alpha) \\
 & + \left[\frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\alpha, y, z_\omega)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (z - z_\alpha) \\
 & + \left[\frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\omega, y, z_\alpha)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right] \cdot (x - x_\alpha)
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

Para a estimativa da incerteza de medição da componente E_y do erro volumétrico, aplica-se a lei da propagação de incertezas na equação (5.12), e tem-se a tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Parâmetros para Determinar a Incerteza dos Deslocamentos Calculados.

Coeficiente de sensibilidade do erro volumétrico E_y em relação à variável $v_i \left(\frac{\partial E_y}{\partial v_i} \right)$	
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x_\alpha, y, z_\alpha)}$	$= 1 - \left[\frac{z - z_\alpha}{z_\omega - z_\alpha} + \frac{x - x_\alpha}{z_\omega - z_\alpha} \right]$
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x, y_\alpha, z_\alpha)}$	$= 1 - \frac{z - z_\alpha}{z_\omega - z_\alpha}$
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x_\alpha, y_\alpha, z)}$	$= 1$

Continuação da tabela 5.11

$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x, y_\alpha, z_\omega)} = \frac{z - z_\alpha}{z_\omega - z_\alpha}$	
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x_\alpha, y, z_\omega)} = \frac{z - z_\alpha}{z_\omega - z_\alpha}$	
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x_\omega, y, z_\alpha)} = \frac{x - x_\alpha}{z_\omega - z_\alpha}$	
$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \left[\frac{\delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) - \delta y(x, y_\alpha, z_\omega)}{(z_\omega - z_\alpha)} + \frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\alpha, y, z_\omega)}{(z_\omega - z_\alpha)} \right]$	
$\frac{\partial E_y}{\partial z_\alpha} = \left[-\frac{\delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) - \delta y(x, y_\alpha, z_\omega)}{(z_\omega - z_\alpha)} - \frac{z - z_\alpha}{(z_\omega - z_\alpha)^2} \right] +$ $+ \left[-\frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\alpha, y, z_\omega)}{(z_\omega - z_\alpha)} - \frac{z - z_\alpha}{(z_\omega - z_\alpha)^2} \right] +$ $+ \left[-\frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\omega, y, z_\alpha)}{(z_\alpha - z_\omega)^2} \right] (x - x_\alpha)$	
$\frac{\partial E_y}{\partial z_\omega} = \left[\frac{\delta y(x, y_\alpha, z_\alpha) - \delta y(x, y_\alpha, z_\omega)}{(z_\alpha - z_\omega)^2} \right] (z - z_\alpha) +$ $+ \left[\frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\alpha, y, z_\omega)}{(z_\alpha - z_\omega)^2} \right] (z - z_\alpha) +$ $+ \left[\frac{\delta y(x_\alpha, y, z_\alpha) - \delta y(x_\omega, y, z_\alpha)}{(z_\alpha - z_\omega)^2} \right] (x - x_\alpha)$	

► **Estimativa da Incerteza de Medição na Determinação da Componente Ez do Erro Volumétrico**

A equação reduzida para o cálculo da componente E_z do erro volumétrico é reapresentada na equação (5.13).

$$E_z = \delta z(x_\alpha, y_\alpha, z) + \delta z(x, y_\alpha, z_\alpha) + \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha) + \left[\frac{\delta z(x_\omega, y, z_\alpha) - \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha)}{(x_\omega - x_\alpha)} \right] \cdot (x - x_\alpha) \quad (5.13)$$

Para a estimativa da incerteza de medição da componente E_z do erro volumétrico, aplica-se a lei da propagação de incertezas na equação (5.13), e tem-se a tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Parâmetros para Determinar a Incerteza da Medição de Deslocamentos utilizando o Esquadro.

Coeficiente de sensibilidade do erro volumétrico E_z em relação à variável $v_i \left(\frac{\partial E_z}{\partial v_i} \right)$	
$\frac{\partial E_z}{\partial \delta z(x_\alpha, y_\alpha, z)}$	= 1
$\frac{\partial E_z}{\partial \delta z(x, y_\alpha, z_\alpha)}$	= 1
$\frac{\partial E_z}{\partial \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha)}$	= $1 - \frac{x - x_\alpha}{x_\omega - x_\alpha}$
$\frac{\partial E_z}{\partial \delta z(x_\omega, y, z_\alpha)}$	= $\frac{x - x_\alpha}{x_\omega - x_\alpha}$
$\frac{\partial E_z}{\partial x}$	= $\frac{\delta z(x_\omega, y, z_\alpha) - \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha)}{(x_\omega - x_\alpha)}$
$\frac{\partial E_z}{\partial x_\alpha}$	= $\left[\frac{\delta z(x_\omega, y, z_\alpha) - \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha)}{(x_\alpha - x_\omega)^2} \right] (x - x_\alpha)$
$\frac{\partial E_z}{\partial x_\omega}$	= $\delta z(x_\omega, y, z_\alpha) - \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha) \left[\left(\frac{1}{x_\alpha - x_\omega} \right) + \left(\frac{x - x_\alpha}{(x_\alpha - x_\omega)^2} \right) \right]$

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é destinado à apresentação dos resultados dos testes experimentais realizados durante o desenvolvimento do trabalho.

Conforme exposto no capítulo 5, o método aplicado na calibração indireta da Máquina de Medir por Coordenadas utiliza um esquadro de esferas que foi medido em cinco posições distintas dentro do volume de trabalho. Assim, os resultados aqui apresentados estão divididos em duas partes. A primeira contempla os resultados da calibração do esquadro e a segunda contém os resultados da calibração da MM3C.

Os resultados apresentados relativos à calibração do esquadro estão dispostos da seguinte forma: em primeiro lugar estão aqueles da calibração das posições relativas entre as esferas realizadas na Máquina Universal de Medir (SIP), seguidos da calibração do erro de retilineidade entre os centros das esferas em dois planos e depois o erro de perpendicularismo entre as hastes.

A apresentação dos resultados da calibração da MM3C está dividida em cinco partes aqui chamadas de montagens M1, M2, M3, M4 e M5, de acordo com as estratégias de medição já apresentadas em detalhes no Capítulo 5.

6.1. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO ESQUADRO

6.1.1. CALIBRAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE OS CENTROS DAS ESFERAS DO ESQUADRO

As Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam os resultados da calibração das distâncias entre os centros das esferas nas hastes do esquadro realizadas na Máquina Universal de Medir (SIP). Foram realizados cinco ciclos de medições de cada distância entre esferas. As distâncias medidas são aquelas entre as esferas de ordem 1 e ordem $n+1$ como pode ser observado nas duas primeiras colunas das tabelas 6.1 e 6.2.

Analisando os valores apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2 pode-se notar que há diferenças entre os valores medidos e a distância nominal utilizada no projeto do esquadro. Entretanto, as diferenças observadas não têm nenhuma influência no procedimento de calibração da máquina, uma vez que os valores de distâncias utilizadas são aqueles calibrados (SIP). Atribui-se essas diferenças ao processo de fabricação dos furos no esquadro e à colagem das esferas nas hastes.

Tabela 6.1 – Médias das distâncias medidas entre esferas e Desvios Padrões.

Haste Longa - SIP			
Esferas		Média (mm)	Desvio Padrão (2σ) (mm)
1	2	39,9751	0,00078
1	3	79,9802	0,00031
1	4	119,9720	0,00074
1	5	159,9693	0,00110
1	6	199,9600	0,00040
1	7	239,9475	0,00031
1	8	279,9416	0,00112
1	9	319,9189	0,00095

Tabela 6.2 – Médias das distâncias medidas entre esferas e Desvios Padrões.

Haste Curta - SIP			
Esferas		Média (mm)	Desvio Padrão (2σ) (mm)
1	2	39,9650	0,0078
1	3	79,9752	0,0054
1	4	119,9760	0,0070
1	5	159,9444	0,0058
1	6	199,9546	0,0070
1	7	239,9292	0,0085

6.1.2. CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE RETILINEIDADE DO ESQUADRO MECÂNICO DE ESFERAS

Na medição dos erros de retilineidade observados a partir da reta ideal formada pelos centros das esferas do esquadro, foi utilizado um desempenho como referência e um apalpador eletrônico para as

medições das diferenças de posicionamento transversal entre os centros das esferas, conforme procedimento descrito no Capítulo 5.

O procedimento de medição do erro de retilidade entre os centros das esferas foi aplicado em dois planos, um no plano do esquadro e outro perpendicular ao plano do esquadro. A figura 6.1 apresenta o esquema de medição do erro de retilidade no plano perpendicular ao esquadro XY, na direção Z da haste longa e haste curta. A medição das alturas das esferas foi feita com o auxílio de um bloco-padrão posicionado sobre duas esferas. Dois pontos demarcados no bloco-padrão foram medidos com um apalpador eletrônico. Tomando-se como referência a esfera P1 as diferenças de alturas na direção Z foram medidas.

Figura 6.1 – Esquema de calibração do erro de retilidade entre esferas, no plano perpendicular ao esquadro, na direção Z.

A figura 6.2 apresenta o esquema de medição do erro de retilidade no plano do esquadro, na direção X. A medição das alturas das esferas foi feita com o auxílio de um bloco-padrão posicionado sobre duas esferas. Dois pontos demarcados no bloco-padrão foram medidos com um apalpador eletrônico. Tomando-se como referência a esfera P1 as diferenças de alturas na direção X foram medidas.

Figura 6.2 – Esquema de calibração do erro de retilidade entre esferas, no plano do esquadro, na direção X.

A figura 6.3 apresenta o esquema de medição do erro de retilidade no plano do esquadro, na direção Y. A medição das alturas das esferas foi feita com o auxílio de um bloco-padrão posicionado sobre duas esferas. Dois pontos demarcados no bloco-padrão foram medidos com um apalpador eletrônico. Tomando-se como referência a esfera P1 as diferenças de alturas na direção Y foram medidas.

Figura 6.3 – Esquema de calibração do erro de retilidade entre esferas, no plano do esquadro, na direção Y.

A Figura 6.4 apresenta a curva de calibração do erro de retilidade entre os centros das esferas do esquadro medidos na direção perpendicular ao plano XY, ou seja, no plano formado pelas hastes do esquadro aqui também chamado de plano do esquadro.

No gráfico estão apresentados os valores médios e também os desvios-padrão com um nível de confiança igual a 95,44% ($\pm 2\sigma$) calculados a partir das cinco medições realizadas. Tomando-se como referência a esfera 1, pode-se dizer a partir do gráfico do erro de retilidade na direção Z da haste longa, que estes variam entre 21 e -16 μm . Vale lembrar que estes valores serão descontados durante a calibração da máquina, por isso ressalta-se a excelente repetibilidade observada nos testes.

Figura 6.4 – Erro de Retilidade na direção Z da haste longa.

A Figura 6.5 apresenta o erro de retilidade na direção X da haste longa ainda medidos no plano do esquadro. Com a esfera número 1 como referência os valores observados variam entre -84 e 26 μm e diminuem à medida que os valores das coordenadas "Y" aumentam.

Estes valores não têm influência na calibração da máquina, pois são erros sistemáticos que não são corrigidos. Ressalta-se por fim a excelente repetibilidade dos resultados.

Figura 6.5 – Erro de Retilidade na direção X da haste longa.

Da mesma maneira foram realizadas medições perpendiculares ao plano do esquadro, na direção Z para a haste curta. O gráfico da Figura 6.6 apresenta o erro de retilidade na direção Z da haste curta. Com a esfera número 1 como referência os valores observados variam entre 35 e 4 μm .

Figura 6.6 – Erro de Retilidade na direção Z da haste curta.

A Figura 6.7 apresenta o erro de retilidade na direção Y da haste curta. Os valores observados variam entre 95 e 20 μm . Na posição 40 mm verifica-se um aumento significativo do erro de retilidade atingindo o valor de 95 μm . Atribui-se a esse valor ao processo de furação e colagem da esfera.

Figura 6.7 – Erro de Retilidade na direção Y da haste curta.

Os testes de calibração do erro de posição e do erro de retilidade apresentaram componentes aleatórias muito pequenas e erros sistemáticos atingindo valores relativamente grandes, entretanto, cabe lembrar que estes erros sistemáticos não têm nenhuma influência no procedimento de calibração da Máquina de Medir por Coordenadas.

6.1.3. RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO DESVIO DE PERPENDICULARISMO DO ESQUADRO MECÂNICO DE ESFERAS

As tabelas 6.3 e 6.4 apresentam respectivamente os valores médios das posições dos centros das esferas e os coeficientes das retas de mínimos quadrados para as posições 1 e reversa. A equação 6.1

apresenta o erro de perpendicularismo do esquadro. Foi utilizado o método da reversão para a calibração do esquadro mecânico de esferas, conforme procedimento descrito no capítulo 5. Os testes foram realizados na própria máquina de medir a três coordenadas.

Tabela 6.3 – Valores médios das posições dos centros das esferas, posição 1 e reversa.

Posição 1				Reversa			
Haste Longa		Haste Curta		Haste Longa		Haste Curta	
Esferas	Média Yc (mm)	Esferas	Média Xc (mm)	Esferas	Média Yc (mm)	Esferas	Média Xc (mm)
1	230,745	1	50,673	1	235,058	1	50,654
2	230,715	2	50,702	2	235,083	2	50,692
3	230,780	3	50,599	3	235,020	3	50,592
4	230,860	4	50,523	4	234,943	4	50,521
5	230,894	5	50,489	5	234,911	5	50,495
6	230,968	6	50,425	6	234,834	6	50,434
7	231,003	7	50,327	7	234,795	7	50,342
8	231,087			8	234,686		

Onde:

Yc: Correspondem as posições dos centros das esferas da haste longa na direção do eixo Y.

Xc: Correspondem as posições dos centros das esferas da haste curta na direção do eixo X.

Tabela 6.4 – Coeficientes das retas ajustadas pelos pontos medidos.

Posição 1				Reversa			
Haste Longa		Haste Curta		Haste Longa		Haste Curta	
a_{L1}	b_{L1}	a_{C1}	b_{C1}	a_{L2}	b_{L2}	a_{C2}	b_{C2}
0,001193	-0,0229	-0,00152	0,043452	-0,00138	0,0510	-0,00138	0,044619

Onde:

a_{L1} : Coeficiente angular da reta de mínimos quadrados ajustadas pelos centros das esferas da haste longa.

a_{C1} : Coeficiente angular da reta de mínimos quadrados ajustadas pelos centros das esferas da haste curta.

b_{L1} : Coeficiente linear da reta de mínimos quadrados ajustadas pelos centros das esferas da haste longa.

b_{C1} : Coeficiente linear da reta de mínimos quadrados ajustadas pelos centros das esferas da haste curta.

A tabela 6.5 apresenta os ângulos θ_1 e θ_2 , obtidos pelo método da reversão na Máquina de Medir.

Tabela 6.5 – Cálculo dos coeficientes angulares da posição 1 e reversa.

Posição 1		Reversa	
θ_1	$a_{L1} + a_{C1}$	θ_2	$a_{L2} + a_{C2}$
θ_1	-0,0003259	θ_2	-0,0000037

O erro de perpendicularismo do esquadro mecânico de esferas no plano XY pode ser calculado utilizando a equação 5.3 aqui reproduzida na equação 6.1.

$$\beta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (6.1)$$

$$\beta = -0,000161 \text{ rad}$$

$$\beta = -33,2''$$

O erro de ortogonalidade da máquina de medir por coordenadas no plano XY pode ser calculado utilizando a equação 5.4 aqui reproduzida na equação 6.2.

$$\alpha = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (6.2)$$

$$\alpha = -0,000165 \text{ rad}$$

$$\alpha = -34,0''$$

6.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C

Nas subseções seguintes estão apresentados os resultados da calibração indireta da máquina de medir por coordenadas. Estes resultados foram obtidos a partir da medição da posição relativa entre os centros das esferas do esquadro nas direções X, Y e Z. Foram realizadas medições em 5 montagens dentro do volume de trabalho da máquina, aqui chamados M1, M2, M3, M4 e M5, conforme exposto no capítulo 5.

Os gráficos apresentados contêm as curvas de erros da máquina de medir por coordenadas, obtidas a partir da diferença entre as posições verdadeiras calibradas do esquadro e as posições medidas pela máquina de medir por coordenadas.

6.2.1. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M1

Na calibração da MM3C com o esquadro medido na posição de montagem M1, o esquadro é posicionado na mesa da máquina, isto é, no plano XY com a haste longa paralela ao eixo Y com o menor braço de Abbè possível X_0 e a haste curta orientada na direção do eixo X.

A figura 6.8 apresenta a contribuição $\delta_x(x_a, y, z_a)$, 2º e 5º termos da equação 5.8. As coordenadas do centro da primeira esfera foram adotadas como referência.

Analisando o gráfico da figura 6.8 pode-se observar que o erro máximo de retilidade na direção X devido a movimento em Y, em valor absoluto, é de aproximadamente 9 μm nas posições 80 e 160 mm.

Figura 6.8 – Erro de retilidade na direção X devido a movimento em Y.

A figura 6.9 apresenta a curva de erro de retilidade $\delta_y(x, y_a, z_a)$, medidos na haste menor no plano XY. Os erros da máquina de medir variam entre -21 μm e 1 μm . Cabe ressaltar que o erro de perpendicularismo $\delta\phi_{z_o}$ entre os eixos X e Y está presente no termo de erro de retilidade $\delta_y(x, y_a, z_a)$ na direção Y devido aos movimentos do eixo X medidos em M1. Esta contribuição está presente no 2º e 4º termos da equação 5.9.

Figura 6.9 – Erro de retilidade na direção Y devido a movimento em X.

A figura 6.10 apresenta a curva de erro de posição na direção Y, no plano XY, devido a movimento em Y. O erro de posição $\delta y(x_a, y, z_a)$ é o 1º e o 5º termos da equação 5.9. Os valores dos erros medidos variam entre -4,9 μm e -25,9 μm gerando uma curva linearmente decrescente.

Figura 6.10 – Erro de posição na direção Y medidos em M1.

A figura 6.11 apresenta a curva do erro de posição na direção X, no plano XY, devido a movimento em X. O erro de posição $\delta x(x, y_a, z_a)$

ocupa o 1º e o 4º termos da equação 5.8. Os valores dos erros medidos variam entre 7 μm e -21,6 μm .

Figura 6.11 – Erro de posição na direção X medidos em M1.

A figura 6.12 apresenta a curva do erro de retilidade na direção Z devido a movimento em X medidos em M1. O erro de retilidade $\delta_z(x, y_\alpha, z_\alpha)$ é o 2º termo da equação 5.10. Os valores dos erros medidos variam entre -28 μm e 13 μm .

Figura 6.12 – Erro de retilidade na direção Z devido a movimento em X.

6.2.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M2

Na calibração da MM3C com o esquadro medido na posição de montagem M2, o esquadro é posicionado no plano XY, estando a haste longa paralela ao eixo y com o maior braço de Abbé X_ω . A haste curta deve ser orientada na direção do eixo X.

A figura 6.13 apresenta a contribuição $\delta_z(x_\omega, y, z_\alpha)$, 3º e 4º termo da equação 5.10. A influência do erro angular $\delta\phi_y(x_\alpha, y, z_\alpha)$ está presente nesta contribuição e sabe-se que as contribuições nas posições intermediárias podem ser obtidas a partir das relações lineares entre os erros medidos nas posições de montagem M1 e M2. As medições são realizadas com movimento em Y para dois limites de coordenadas X_α e X_ω . A coordenada zero no gráfico apresentado foi adotada como referência.

Analisando o gráfico da figura 6.13 pode-se observar que o erro máximo de retilidade na direção Z devido a movimento em Y, em valor absoluto, é de 8 μm na posição 240 mm.

Figura 6.13 – Erro de retilidade na direção Z devido a movimento em Y.

A figura 6.14 apresenta a curva de erro de posição na direção Y, no plano XY, devido a movimento em Y. O erro de posição $\delta_y(x_\omega, y, z_\alpha)$,

6º termo da equação 5.9, contém a influência do erro angular $\delta\Phi_z(x_\alpha, y, z_\alpha).x$. A contribuição em posições intermediária pode ser obtido a partir das relações lineares entre os erros medidos nas posições de montagem M1 e M2. As medições são realizadas na direção Y para dois limites de coordenadas X_α e X_ω . Observam-se valores de erros decrescentes ao longo do eixo até $(-58,2 \mu\text{m})$.

Figura 6.14 – Erro de posição na direção Y medidos em M2.

6.2.3. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M3

Na calibração da MM3C com o esquadro medido na montagem M3, o esquadro é posicionado paralelamente ao plano XY, com o eixo totalmente recuado Z_ω , estando a haste longa paralela ao eixo y com o menor braço de Abbé X_α e a haste curta orientada na direção do eixo X.

A figura 6.15 apresenta a curva de erro de posição na direção X, devido a movimento em X, medida em M3. O erro de posição $\delta_x(x, y_\alpha, z_\omega)$, 4º termo da equação 5.8, contém a influência do erro angular

$\delta\Phi_y(x, y_a, z_a) \cdot x$. A contribuição em posições intermediária pode ser obtida a partir das relações lineares entre os erros medidos nas posições de montagem M1 e M3. As medições são realizadas na direção X para dois limites de coordenadas Z_a e Z_ω . Analisando o gráfico da figura 6.15 pode-se observar que os valores das posições medidas variam entre $-3,5 \mu\text{m}$ e $-37,6 \mu\text{m}$.

Figura 6.15 – Erro de posição na direção X.

A figura 6.16 apresenta a curva do erro de posição na direção Y, no plano XY, devido a movimento em Y. O erro de posição $\delta y(x_a, y, z_\omega)$, 5º termo da equação 5.9, contém as influências do erro angular $\delta\Phi_x(x_a, y, z_a)$. A contribuição nas posições intermediárias é obtida a partir das relações lineares entre os erros medidos nas posições de montagem M1 e M3. As medições são realizadas na direção Y para dois limites de coordenadas Z_a e Z_ω . Os valores dos erros medidos variam entre $2 \mu\text{m}$ e $-17 \mu\text{m}$.

Figura 6.16 – Erro de posição na direção Y.

A figura 6.17 apresenta a curva de erro de retilidade na direção X, devido a movimento em Y, medidos na posição de montagem M3. O erro de retilidade $\delta x(x_\alpha, y, z_\omega)$, 5º termo da equação 5.8, contém os efeitos do erro angular $\delta \phi_y(x_\alpha, y, z_\alpha)$. A contribuição nas posições intermediárias pode ser obtida a partir das relações lineares entre os erros medidos nas posições de montagem M1 e M3. As medições são realizadas na direção Y para dois limites de coordenadas Z_α e Z_ω . Os valores dos erros medidos variam em torno de 10 μm nas posições 120, 160 e 200 mm.

Figura 6.17 – Erro de retilidade na direção X devido a movimento em Y.

A figura 6.18 apresenta o gráfico com a curva do erro de retilidade na direção Y devido a movimento em X medidos na posição de montagem M3. O erro de retilidade $\delta_y(x, y_\alpha, z_\omega)$ está aplicado no 4º termo da equação 5.9. O erro angular $\delta\phi_x(x, y_\alpha, z_\alpha).x$ é obtido a partir das relações lineares entre os erros medidos nas posições de montagem M1 e M3. As medições são realizadas na direção X para dois limites de coordenadas Z_α e Z_ω . Os valores dos erros medidos variam entre $-16 \mu\text{m}$ e $9 \mu\text{m}$.

Figura 6.18 – Erro de retilidade na direção Y devido a movimento em X.

6.2.4. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M4

Na calibração da máquina na posição de montagem M4, a haste maior do esquadro deve ficar paralela ao eixo Y, no menor braço de Abbé possível. A haste menor do esquadro deve permanecer na direção

perpendicular ao plano XY em X_a . O plano do esquadro é coincidente com o plano ZY em X_a .

A figura 6.19 apresenta a curva do erro de retilidade $\delta_y(x_a, y_a, z)$, e os valores dos erros medidos variam entre $-18 \mu\text{m}$ e $8 \mu\text{m}$.

O erro de perpendicularismo $\delta\phi_{x_o}$ entre os eixos Y e Z está presente no termo de erro de retilidade $\delta_y(x_a, y_a, z)$ na direção Y devido a movimento do eixo Z medidos em M4 é o 3º termo da equação 5.9.

Figura 6.19 – Erro de retilidade na direção Y devido a movimento em Z.

A figura 6.20 apresenta a curva de erro de posição na direção Z, devido a movimento em Z, medida em M4. O erro de posição $\delta_z(x_a, y_a, z)$ é o 1º termo da equação 5.10. Analisando o gráfico da figura 6.20 pode-se observar valores decrescentes ao longo do eixo até $-34 \mu\text{m}$.

Figura 6.20 – Erro de posição na direção Z.

A figura 6.21 apresenta o gráfico com a curva do erro de retilidade na direção Z devido a movimento em Y medidos na posição de montagem M4. O erro de retilidade $\delta z(x_\alpha, y, z_\alpha)$ está aplicado nos 3º e 4º termos da equação 5.10. Os valores dos erros medidos variam entre -23 μm e -82 μm .

Figura 6.21 – Erro de retilidade na direção Z devido a movimento em Y.

6.2.5. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C COM O ESQUADRO MEDIDO NA POSIÇÃO M5

Na calibração da máquina na posição de montagem M5, conforme procedimento descrito no capítulo 5, o esquadro é posicionado na mesa da máquina, isto é, perpendicular ao plano do eixo XY. A haste longa deve ficar paralela ao eixo X, no menor braço de Abbè enquanto a haste curta deve permanecer na direção Z.

Observando o gráfico da figura 6.21, tem-se o erro de retilidade na direção X, devido a movimento em Z. Observa-se que os valores ao longo do eixo mantêm decrescentes até $-27 \mu\text{m}$.

A contribuição $\delta\phi_{y_o}$ do erro de perpendicularismo entre os eixos X e Z, da componente E_x do erro volumétrico, está presente no termo de erro $\delta_x(x_a, y_a, z)$, 3º termo da equação 5.8.

Figura 6.22 – Erro de retilidade na direção X devido a movimento em Z.

Como pode ser observado em cada uma das montagens M1, M2, M3, M4 e M5, foram realizadas seis medições individuais totalizando 30 medições das posições relativas entre centros das esferas nas direções

X, Y e Z. Entretanto, estão apresentadas neste trabalho apenas aquelas medições cujos resultados são estritamente necessários para completar as equações de sintetização das componentes E_x , E_y e E_z do modelo reduzido. Os outros resultados, embora analisados, não serão aqui apresentados.

Abaixo, a tabela 6.6 apresenta um exemplo de sintetização das componentes volumétricas E_x , E_y e E_z para as coordenadas do volume de trabalho $X=40$ mm, $Y=120$ mm e $Z=80$ mm. Como pode ser observado, a máquina com resolução de $2\text{ }\mu\text{m}$ apresenta erros sistemáticos da ordem de $18\text{ }\mu\text{m}$. Observe que estes erros sistemáticos são passíveis de correção.

Tabela 6.6 – Equações de sintetização das componentes E_x , E_y e E_z do modelo reduzido.

	Equações de Sintetização						Erro (mm)
E_x	$\delta_x(x, y_a, z_a)$	$\delta_x(x_a, y, z_a)$	$\delta_x(x_a, y_a, z)$	$\delta_x(x, y_a, z_w)$	$\delta_x(x_a, y, z_w)$		-0,015
	0,007	0,001	-0,016	-0,002	0,009		
E_y	$\delta_y(x_a, y, z_a)$	$\delta_y(x, y_a, z_a)$	$\delta_y(x_a, y_a, z)$	$\delta_y(x, y_a, z_w)$	$\delta_y(x_a, y, z_w)$	$\delta_y(x_w, y, z_a)$	0,018
	-0,012	-0,013	-0,008	-0,005	-0,007	-0,004	
E_z	$\delta_z(x_a, y_a, z)$	$\delta_z(x, y_a, z_a)$	$\delta_z(x_a, y, z_a)$	$\delta_z(x_w, y, z_a)$			-0,011
	0,0028	-0,003	-0,010	-0,001			

Abaixo as tabelas 6.7, 6.8 e 6.9 apresentam as parcelas dos erros geométricos nas equações descritas no capítulo 5. Foram determinados os valores da incerteza às componentes E_x , E_y e E_z . Os valores de incerteza apresentados indicam que em qualquer ponto do volume de trabalho da máquina as componentes do erro volumétrico apresentam valores de incerteza próximos de $9,22$, $5,68$ e $5,62\text{ }\mu\text{m}$, respectivamente.

Tabela 6.7 – Incerteza associada às componentes do Erro Volumétrico Ex.

$U^2 Ex = \sum \left(\frac{\partial Ex}{\partial v_i} \right)^2 . u_{v_i}^2$	
$\frac{\partial Ex}{\partial \delta x(x, y_\alpha, z_\alpha)}$	$= 32 \mu m^2$
$\frac{\partial Ex}{\partial \delta x(x_\alpha, y, z_\alpha)}$	$= 0,08 \mu m^2$
$\frac{\partial Ex}{\partial \delta x(x_\alpha, y_\alpha, z)}$	$= 49 \mu m^2$
$\frac{\partial Ex}{\partial \delta x(x, y_\alpha, z_\omega)}$	$= 0,04 \mu m^2$
$\frac{\partial Ex}{\partial \delta x(x_\alpha, y, z_\omega)}$	$= 0,04 \mu m^2$
$\frac{\partial Ex}{\partial z}$	$= 5,43.10^{-11} \mu m^2$
$\frac{\partial Ex}{\partial z_\alpha}$	$= 5,53.10^{-5} \mu m^2$
$\frac{\partial Ex}{\partial z_\omega}$	$= 4 \mu m^2$
UEx	$= 9,22 \mu m$

Tabela 6.8 - Incerteza associada às componentes do Erro Volumétrico E_y .

$U^2 E_y = \sum \left(\frac{\partial E_y}{\partial v_i} \right)^2 u_{v_i}^2$	
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x_\alpha, y, z_\alpha)}$	$= 0,13 \mu m^2$
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x, y_\alpha, z_\alpha)}$	$= 26,31 \mu m^2$
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x_\alpha, y_\alpha, z)}$	$= 2,25 \mu m^2$
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x, y_\alpha, z_\omega)}$	$= 1,15 \mu m^2$
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x_\alpha, y, z_\omega)}$	$= 2,26 \mu m^2$
$\frac{\partial E_y}{\partial \delta y(x_\omega, y, z_\alpha)}$	$= 0,17 \mu m^2$
$\frac{\partial E_y}{\partial z}$	$= 4,98.10^{-9} \mu m^2$
$\frac{\partial E_y}{\partial z_\alpha}$	$= 1,29.10^{-6} \mu m^2$
$\frac{\partial E_y}{\partial z_\omega}$	$= 1,6.10^{-9} \mu m^2$
$U E_y$	$= 5,68 \mu m$

Tabela 6.9 - Incerteza associada às componentes do Erro Volumétrico Ez.

$U^2 E_z = \sum \left(\frac{\partial E_z}{\partial v_i} \right)^2 u_{v_i}^2$	
$\frac{\partial E_z}{\partial \delta z(x_\alpha, y_\alpha, z)}$	$= 4 \mu m^2$
$\frac{\partial E_z}{\partial \delta z(x, y_\alpha, z_\alpha)}$	$= 25 \mu m^2$
$\frac{\partial E_z}{\partial \delta z(x_\alpha, y, z_\alpha)}$	$= 0,74 \mu m^2$
$\frac{\partial E_z}{\partial \delta z(x_\omega, y, z_\alpha)}$	$= 0,89 \mu m^2$
$\frac{\partial E_z}{\partial x}$	$= 9,84.10^{-4} \mu m^2$
$\frac{\partial E_z}{\partial x_\alpha}$	$= 1,91.10^{-5} \mu m^2$
$\frac{\partial E_z}{\partial x_\omega}$	$= 0,94 \mu m^2$
$U E_z$	$= 5,62 \mu m$

Capítulo 7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho apresentou-se um procedimento de calibração indireta para Máquina de Medir por Coordenadas através de um esquadro mecânico de esferas. Para tanto, o esquadro mecânico de esferas foi calibrado conforme procedimentos descritos no capítulo 5. A calibração da MM3C foi realizada através do posicionamento do artefato em múltiplas orientações com objetivo de avaliar o maior número de parcelas de erros em uma única medição. As parcelas de erros foram definidas a partir da observação das equações reduzidas do modelo obtido pela análise geométrica.

Das avaliações realizadas, as seguintes conclusões podem ser enumeradas:

- O número de posições de medição durante a calibração com o esquadro mecânico de esferas é bem menor, o esquadro é posicionado em 5 orientações dentro do volume do trabalho, enquanto a barra de esferas, em 20 posições.
- O esquadro de esferas é leve e fácil de manipular, dá uma resposta eficiente a um dos principais problemas para artefatos do tipo placa que são relativamente pesados e de difícil manipulação.

- O programa computacional desenvolvido por MARQUES, A. (2003) atendeu às expectativas, é fácil de ser operado e os resultados são apresentados de forma clara, como pode ser observado nos resultados apresentados no capítulo 6.
- As equações de sintetização das componentes E_x , E_y e E_z do modelo reduzido possuem 5, 6 e 4 termos respectivamente, enquanto as equações de sintetização de E_x , E_y e E_z , possuem 8, 9 e 4 termos respectivamente. Portanto, as equações do modelo reduzido de sintetização de erros (MRSE) possuem um número menor de termos e diminui a propagação de incerteza no cálculo dos erros da MM3C.
- Relativamente a custo de fabricação, pode-se observar que as barras de esferas são aqueles artefatos que apresentam menor custo, seguido pela barra de furos, esquadro mecânico de esferas, placas de esferas e de furos e interferômetro laser.

Durante o desenvolvimento deste trabalho algumas discussões e observações foram feitas e diferentes propostas para trabalhos futuros foram sugeridas. Algumas estão delineadas a seguir:

- Construir um novo esquadro mecânico de esferas em fibra de carbono e esferas de cerâmica reduzindo o peso do aparato, aumentando a rigidez e limitando deformações térmicas.
- Realizar o cálculo da incerteza de medição considerando as influências das condições ambientais
- Modificação do método de calibração do esquadro mecânico de esferas, fazendo a calibração de posição das esferas antes da montagem das hastes.

Referências Bibliográficas

ABACKERLI, A. Perfil do Uso das Máquinas de Medir por Coordenadas no Brasil. Máquinas & Metais, Novembro 2000.

ANSI/ASME B 89.4.1(1997). Methods For Performance Evaluation Of Coordinate Measuring Machines. The American Society Of Mechanical Engineers.

ARENCIBIA, R.V. Equacionamento das Componentes do Erro Volumétrico em Máquinas de Medir a Três Coordenadas. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos, 1999.

ASME B 89.1.12M, "Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines". 1990.

BOSCH, J. A. (1995). Evolution of Measurement. Coordinate Measuring Machines and Systems, editor Bosch, J. A., pub. Marcel Dekker, cap.1, p. 18.

BROWN & SHARPE DEA. (2004). Bravo Catalog. Disponível em: <http://www.dea.it/download/en/cat/Bravo_English.pdf>. Acesso em 07 de outubro de 2008.

BURDEKIN, M. S.; VOUTSADOPOULOS, C. (1981). Computer Aided Calibration of the Geometric Errors of Multi-axis Coordinate Measuring Machines. Proc. Instn. Mech. Engrs, v. 195, p. 231 – 239.

CARDOZA, J.A.S. (1995) Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas. 209p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos.

CAUCHICK-MIGUEL, P., KING, K., DAVIS, J. CMM verification: a survey. Measurement, vol. 17, /1/pp1-16, 1996.

DI GIACOMO, B. (1986) Computer Aided Calibration and Hybrid Compensation of Geometric Errors in Coordinate Measuring Machine. Tese. University of Manchester Institute of Science and Technology.

DI GIACOMO, B. (2006) A expressão da Incerteza de Medição por Coordenadas. Tese (Livre-Docência). Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos.

FRENCH, D., HUMPHRIES, S.H. (1967). "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.

INMETRO (2007). *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. 4. ed. revisada. Rio de Janeiro.

ISO GUM (2003). *Guia para a expressão da incerteza de medição*: Terceira Edição Brasileira do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Edição Revisada em agosto de 2003, Rio de Janeiro.

ISO 10360-2 (2001). INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM) – Part 2 MMCs used for measuring size, 2001.

KUNZMANN, H. WÄLDELE, F., NI, J. (1995). Accuracy Enhancement. In: Bosch, J. A. Coordinate measuring Machines and Systems. New York. Marcel Dekker, Inc.

LINK, W. (1997) Metrologia Mecânica. Expressão da Incerteza de Medição. PROGRAMA RH METROLOGIA.

LIRA, F.A. (2001). *Metrologia na indústria*. Editora Érica, São Paulo. 248p.

MARQUES, A. (2003). Uma interface eletrônica e computacional para medições a três coordenadas. 150p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ORREGO, R. M. M.; DI GIACOMO, B.; ABACKERLY, Á.J. Fontes de erros em metrologia a três coordenadas: considerações gerais. Ciência e Tecnologia, Piracicaba, v. 8, n. 16, p. 43-56, 2000.

ORREGO, R.M.M.(1999). Método de Calibração Direta para Máquinas de Medir a Três Coordenadas 175p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlo-USP, São Carlos.

PEGGS, G. N. Creating a standards infrastructure for coordinate measurement technology in the U.K. Annals of the CIRP vol. 38, 1989.

PEGGS, G.N. Traceability for Co-ordinate Measurement Technology. 27th International Matador Conference, 1990.

PHILLIPS, S.D. (1995). Performance evaluations, In: BOSCH, J. A. (Ed.) Coordinate measuring machines and systems, New York, Marcel Dekker, Inc.

RENISHAW (2007). Disponível em: < WWW.renishaw.com >. Acesso em 10 de junho de 2008.

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

SPIEGEL, M.R. (1993). Estatística. 3ª ed. São Paulo: Makron Books, 1993.

TRAPET, E.(2009). Disponível em:<WWW.trapet.de/page3.html>. Acesso em 20 de janeiro de 2009.

TRAPET, E.; WÄLDELE, F. (1991). Asseguramiento de la calidad para máquinas de medir por coordenadas. PTB- Physikalish Technishe Bundesanstalt. Seminario en el Centro Espanõl de Metrologia, 17 al 21 de junho.

WECK, M. (1984). Handbook of machine tools – v.4. Metrological analysis and performance tests. London: John Wiley and Sons.

APÊNDICE 1 - Resultados dos testes experimentais

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO ESQUADRO

RESULTADOS DE MEDIÇÃO DA POSIÇÃO

Tabela 1 - Médias e Desvios Padrões para os valores medidos na SIP.

Haste Longa - SIP			
Esferas		Média (mm)	Desvio Padrão (2σ)
1	2	39,9751	0,00078
1	3	79,9802	0,00031
1	4	119,9720	0,00074
1	5	159,9693	0,00110
1	6	199,9600	0,00040
1	7	239,9475	0,00031
1	8	279,9416	0,00112
1	9	319,9189	0,00095

Tabela 2 - Médias e Desvios Padrões para os valores medidos na SIP.

Haste Curta - SIP			
Esferas		Média (mm)	Desvio Padrão (2σ)
1	2	39,9650	0,0078
1	3	79,9752	0,0054
1	4	119,9760	0,0070
1	5	159,9444	0,0058
1	6	199,9546	0,0070

1	7	239,9292	0,0085

RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE

Figura 6.2 - Erro de Retilidade na direção Z da haste longa.

Figura 6.3 - Erro de Retilidade na direção X da haste longa.

Figura 6.4 - Erro de Retilidade na direção Z da haste curta.

Figura 6.5 - Erro de Retilidade na direção Y da haste curta.

RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE PERPENDICULARISMO

Tabela 3 – Valores médios de Yc e Xc, posições 1 e reversa.

Posição 1				Reversa			
Haste Longa		Haste Curta		Haste Longa		Haste Curta	
Esferas	Média Yc (mm)	Esferas	Média Xc (mm)	Esferas	Média Yc (mm)	Esferas	Média Xc (mm)
1	230,745	1	50,673	1	235,058	1	50,654
2	230,715	2	50,702	2	235,083	2	50,692
3	230,780	3	50,599	3	235,020	3	50,592
4	230,860	4	50,523	4	234,943	4	50,521
5	230,894	5	50,489	5	234,911	5	50,495
6	230,968	6	50,425	6	234,834	6	50,434
7	231,003	7	50,327	7	234,795	7	50,342
8	231,087			8	234,686		

Tabela 4 - Cálculo do ângulo entre as hastes

Posição 1				Reversa			
Haste Longa		Haste Curta		Haste Longa		Haste Curta	
a _{L1}	b _{L1}	a _{C1}	b _{C1}	a _{L2}	b _{L2}	a _{C2}	b _{C2}
0,001193	-0,0229	-0,00152	0,043452	-0,00138	0,0510	-0,00138	0,044619
θ ₁	a _{L1} + a _{C1}			θ ₂	a _{L2} + a _{C2}		
θ ₁	-0,0003259			θ ₂	-0,0000037		

$$\beta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}$$

$$\beta = -0,000161 \text{ rad}$$

$$\beta = -33,2''$$

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MM3C**RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO ESQUADRO NA POSIÇÃO M1**

Figura 6 – Erro de Retilidade na direção X devido a movimento em Y medidos em M1.

Figura 7 - Erro de Retilidade na direção Y devido a movimento em X medidos em M1.

Figura 8 - Erro de posição na direção Y - M1.

Figura 9 - Erro de posição na direção X - M1.

RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO ESQUADRO NA POSIÇÃO M2

Figura 10 - Erro de Retilidade na direção Z devido a movimento em X medidos em M2.

Figura 11 - Erro de Retilidade na direção Z devido a movimento em Y medidos em M2.

Figura 12 – Erro de posição na direção Y – M2

RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO ESQUADRO NA POSIÇÃO M3

Figura 13 – Erro de posição na direção X – M3.

Figura 14 – Erro de posição na direção Y – M3.

Figura 15 - Erro de Retilidade na direção X devido a movimento em Y medidos em M3.

Figura 6.16 - Erro de Retilidade na direção Y devido a movimento em X medidos em M3.

RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO ESQUADRO NA POSIÇÃO M4

Figura 6.17 - Erro de Retilidade na direção Y devido a movimento em Z medidos em M4.

RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO ESQUADRO NA POSIÇÃO M5

Figura 18 - Erro de Retilidade na direção X devido a movimento em Z medidos em M5.