VANESSA APARECIDA DE OLIVEIRA ROSA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DOS MÉTODOS DE AJUSTE UTILIZADOS NAS MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2016

VANESSA APARECIDA DE OLIVEIRA ROSA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DOS MÉTODOS DE AJUSTE UTILIZADOS NAS MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

UBERLÂNDIA – MG

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R788a
2016

Rosa, Vanessa Aparecida de Oliveira, 1984-
Avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste utilizados nas máquinas de medir por coordenadas. / Vanessa Aparecida de Oliveira Rosa. - 2016.
194 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Engenharia Mecânica - Teses 2. Métodos de ajuste - Teses. 3. Coordenadas - Teses. I. Arencibia, Rosenda Valdés II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecária: Ana Carla Cardoso CRB-6/3147

“Se buscares a sabedoria como a prata e como a tesouros escondidos a procurares, então, entenderás o temor do Senhor e acharás o conhecimento de Deus. Porque o Senhor dá a sabedoria, e da Sua boca vem a inteligência e o entendimento.”

Bíblia Sagrada. Provérbios 2:4-6

DEDICATÓRIA

À Deus, pela oportunidade e força. À minha querida família, pelo carinho, compreensão e estímulo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre me guiar em todos os caminhos, e ter-me concedido força e perseverança para enfrentar mais este grande desafio.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia, pela orientação, pelos valiosos conhecimentos transmitidos e por estar sempre à disposição para que o trabalho fosse realizado com êxito.

Aos professores Dr. Sinésio Domingues Franco, da Universidade Federal de Uberlândia, Dr. Antônio Piratelli-Filho, da Universidade de Brasília, e Dr. Roberto Hideaki Tsunaki, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, por disponibilizarem as máquinas de medir por coordenadas para realização das medições.

Aos técnicos Luiz Carlos Neves, do Laboratório de Metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos, e Tarsis de Oliveira Queiroz, do Laboratório de Metrologia da Universidade de Brasília, pelo auxílio na execução das medições.

Aos colegas e técnicos do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, pelo apoio e contribuição direta no trabalho desenvolvido, especialmente aos colegas Leandro Carvalho Pereira, Jonas Bertholdi e José Eduardo Silveira Leal.

Ao Prof. Dr. Éder Costa, que contribuiu na realização dos testes de usinagem.

Aos colegas e técnicos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem.

À minha família maravilhosa, por estar sempre presente em todos os momentos da minha vida e acreditar em mim: ao meu esposo Eudes, pelo amor e incentivo; ao meu filho Gustavo, pelo carinho e compreensão; aos meus pais, Peron e Aparecida, pelo grande amor incondicional; aos meus irmãos, Rodrigo e Virgílio, pela amizade sempre sincera. Aos meus queridos sobrinhos, Rayron, Lívia, Rafael e Miguel.

ROSA, V. A. O. **Avaliação do Desempenho Metrológico dos Métodos de Ajuste Utilizados nas Máquinas de Medir por Coordenadas**. 2016. 194 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Neste trabalho foi avaliado o desempenho metrológico dos métodos de ajuste (mínimos quadrados, mínimo circunscrito, máximo inscrito e mínima zona) utilizados nos *softwares* dedicados às máquinas de medir por coordenadas (MMCs). Para tanto, foi desenvolvido, calibrado e aplicado um artefato-padrão, denominado Placa de Furos para Avaliação dos Métodos de Ajuste (PLAFAMA). Este artefato consiste em uma placa retangular de aço inoxidável AISI 304, com doze furos cilíndricos usinados com diferentes diâmetros nominais (10 mm, 15 mm, 25 mm e 35 mm) e graus de tolerância-padrão (IT4, IT7 e IT9). O desempenho dos métodos de ajuste foi avaliado em quatro máquinas (Zeiss, Hexagon, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM). Para tanto, o artefato foi posicionado no volume de trabalho das máquinas e o diâmetro dos furos e o desvio de circularidade foram obtidos por meio dos quatro métodos de ajuste. A análise de variância foi aplicada para investigar se havia diferenças estatisticamente significativas entre os valores médios fornecidos por cada método. Para efetuar múltiplas comparações entre os níveis do fator método de ajuste foi aplicado o teste de Tukey. A incerteza associada à medição foi avaliada de acordo com as recomendações do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM). Os resultados obtidos indicaram que a metodologia proposta para avaliação do desempenho dos métodos de ajuste baseada na PLAFAMA mostrou-se apropriada, podendo ser utilizada por operadores e fabricantes para esta finalidade. Observou-se que há diferenças significativas entre os valores de diâmetro obtidos pelos diferentes métodos de ajuste, sendo estas mais acentuadas para os métodos mínimo circunscrito e máximo inscrito. Notou-se também que os métodos mínimos quadrados e mínima zona apresentaram o melhor desempenho para a MMC Zeiss. Por sua vez, para as MMCs Hexagon e Mitutoyo BR o método mínimo circunscrito se mostrou superior. Todavia, o método máximo inscrito é o mais recomendado para medições na MMC Mitutoyo QM. O método mínima zona forneceu o menor valor de desvio de circularidade para as máquinas Zeiss, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM. Por sua vez, o método mínimo circunscrito exibiu os valores máximos.

Palavras-chave: mínimos quadrados; mínimo circunscrito; máximo inscrito; mínima zona.

ROSA, V. A. O. **Evaluation of Metrological Performance of Fitting Methods Used in Coordinate Measuring Machines**. 2016. 194 f. Doctoral Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

In this work, was evaluated the metrological performance of fitting methods (least squares, minimum circumscribed, maximum inscribed and minimum zone) used in CMM software. For this, was developed, calibrated and applied an artefact, called Holes Plate for Evaluation of Fitting Methods. The artefact is a rectangular plate of stainless steel AISI 304, with twelve cylindrical holes manufactured with nominal diameters (10 mm, 15 mm, 25 mm and 35 mm) and degrees of tolerance standard (IT4, IT7 and IT9). The performance of fitting methods was evaluated in four machines (Zeiss, Hexagon, Mitutoyo BR and Mitutoyo QM). The artefact was placed at one position on the work volume of the machines. The diameter of the holes and the circularity deviation were obtained by the four fitting methods. To investigate whether there were significant differences between the average values supplied by each method, the variance analysis was applied. To make multiple comparisons between levels of the fitting method factor, the Tukey test was applied. The expanded measurement uncertainty was assessed according to the recommendations of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). The results indicated that the proposed methodology for evaluating the performance of fitting methods based on PLAFAMA was appropriate, and that it can be used by operators and manufacturers for this purpose. It was observed that there were significant differences between the diameter values obtained by different fitting methods. These differences were more significant for the minimum circumscribed and maximum inscribed methods. It was also noted that the least squares and minimum zone methods showed the best performance for the MMC Zeiss. In turn, for CMMs Hexagon and Mitutoyo BR, the minimum circumscribed method was superior. However, the maximum inscribed method was the most suitable for measurements in CMM Mitutoyo QM. The minimum zone method gave the minimum circularity deviation value for CMMs Zeiss, Mitutoyo BR and Mitutoyo QM. In turn, the minimum circumscribed method exhibited the maximum values.

Keywords: least squares; minimum circumscribed; maximum inscribed; minimum zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Medição de diferentes peças em uma MMC (MITUTOYO, 2013)..... 2

Figura 1.2 – Artefatos-padrão: (a) barra de esferas (BAL-TEC, 2013); (b) placa de esferas (BAL-TEC, 2013); (c) padrão passo-a-passo (MITUTOYO, 2013); (d) barra de furos (ZIRONDI, 2001)..... 3

Figura 1.3 – Fatores de influência que afetam a incerteza de medição com MMC (Adaptado de Phillips, 2011)..... 5

Figura 2.1 – Princípio de medição da máquina de medir por coordenadas (Adaptado de Pereira, 2011)..... 7

Figura 2.2 – Principais tipos de MMC (PEREIRA, 2011)..... 8

Figura 2.3 – Círculo ajustado por (a) mínimos quadrados, (b) mínima zona, (c) máximo inscrito e (d) mínimo circunscrito..... 11

Figura 2.4 – Representação da zona de tolerância para o desvio de circularidade, considerando uma seção transversal (a) (ISO 1101, 2012)..... 12

Figura 2.5 – Diagrama de causa-e-efeito das principais fontes de erro na medição com MMC (WECKENMANN; GEWANDE, 1999)..... 16

Figura 2.6 – Os seis erros geométricos para o eixo X de uma MMC (DI GIACOMO, 1986)..... 18

Figura 2.7 – Erros de perpendicularidade de uma MMC (DI GIACOMO, 1986)..... 19

Figura 2.8 – Sistema de apalpação por contato (RENISHAW, 2015)..... 20

Figura 2.9 – Princípio de funcionamento de um sistema de apalpação por contato (RENISHAW, 2015)..... 21

Figura 2.10 – Diferentes geometrias substitutas obtidas na medição de um círculo de três lóbulos, apalpando três pontos em diferentes posições (PHILLIPS, 2011)..... 27

Figura 2.11 – Geometrias substitutas apalpando três pontos, distribuídos de maneiras diferentes (PHILLIPS, 2011)..... 28

Figura 2.12 – Cadeia de definições em que se insere a especificação dimensional e geométrica do produto (ALMACINHA, 2006)..... 30

Figura 2.13 – Ilustração da diferença entre erro e incerteza de medição (PHILLIPS, 1995)..... 31

Figura 2.14 – Distribuição normal..... 34

Figura 2.15 – Distribuição retangular (BIPM et al., 2008). Modificada..... 35

Figura 2.16 – Distribuição triangular (BIPM et al., 2008). Modificada..... 36

Figura 3.1 – Anéis-padrão de aço e peças de alumínio medidos na MMC Mitutoyo BR. 44

Figura 3.2 – MMC tipo ponte móvel do fabricante Mitutoyo, modelo BR-M443..... 44

Figura 3.3 – Posições de medição dos anéis-padrão no volume de trabalho da máquina (coordenada Z igual a 6,000 mm)..... 45

Figura 3.4 – Bloco de um compressor hermético, com a indicação dos furos do cilindro e do mancal..... 47

Figura 3.5 – Porcentagem de ocorrência dos diferentes tipos de tolerâncias em peças da indústria automobilística alemã (PORATH, 2005)..... 48

Figura 3.6 – Rotina implementada no Matlab® R2008a para as simulações..... 49

Figura 3.7 – Desenho técnico do artefato-padrão PLAFAMA..... 50

Figura 3.8 – Desenho em 3D da PLAFAMA..... 52

Figura 3.9 – MMC tipo ponte móvel do fabricante Carl Zeiss, modelo Contura G2..... 53

Figura 3.10 – Posicionamento do sistema de coordenadas de referência na MMC Carl Zeiss..... 54

Figura 3.11 – Planos de medição do desvio de cilindricidade dos furos da PLAFAMA... 55

Figura 3.12 – Indicação da nomenclatura das faces laterais da PLAFAMA..... 55

Figura 3.13 – MMC tipo ponte móvel do fabricante Hexagon, modelo Croma..... 56

Figura 3.14 – Posicionamento do sistema de coordenadas de referência na MMC Mitutoyo BR..... 57

Figura 3.15 – Máquina de medir por coordenadas, modelo QM-353..... 58

Figura 4.1 – Valores de diâmetros obtidos na medição dos anéis-padrão de valor convencional (a) 15,996 mm e (b) 40,000 mm..... 63

Figura 4.2 – Valores do erro sistemático ao variar a posição de medição e o diâmetro dos anéis-padrão, para os métodos: (a) LSC; (b) MZC; (c) MCC; (d) MIC. 64

Figura 4.3 – Medição do erro de perpendicularidade entre os eixos X e Y da MMC Mitutoyo BR utilizando um esquadro de aço..... 65

Figura 4.4 – Efeito do erro de perpendicularidade na medição dos anéis-padrão. Valores de erro expressos em µm..... 67

Figura 4.5 – Valores de diâmetro obtidos na medição dos anéis-padrão de valor convencional (a) 15,996 mm e (b) 40,000 mm..... 68

Figura 4.6 – Valores de diâmetros obtidos nas medições das peças..... 68

Figura 4.7 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos (a) anéis-padrão e (b) peças de alumínio..... 70

Figura 4.8 – Representação das zonas de especificação, de incerteza e de conformidade..... 72

Figura 4.9 – Valores de diâmetros obtidos pelos quatros métodos de ajuste na medição das peças e valores do diâmetro mínimo (Dmin) e máximo (Dmax) da zona de conformidade..... 72

Figura 4.10 – Valores de desvio de circularidade dos anéis-padrão e das peças..... 73

Figura 4.11 – Valores do diâmetro (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal, usinados em seis blocos de compressor hermético..... 75

Figura 4.12 – Valores do desvio de circularidade (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal, usinados em seis blocos de compressor hermético..... 76

Figura 4.13 – Artefato-padrão PLAFAMA..... 79

Figura 4.14 – Valores de diâmetro médio obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss..... 82

Figura 4.15 – Valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC Zeiss..... 83

Figura 4.16 – Representação das zonas de especificação e de conformidade dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss..... 84

Figura 4.17 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss..... 86

Figura 4.18 – Valores de diâmetro médio obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, na MMC Hexagon..... 88

Figura 4.19 – Representação das zonas de especificação e de conformidade dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Hexagon.... 89

Figura 4.20 – Valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC Hexagon..... 90

Figura 4.21 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Hexagon..... 92

Figura 4.22 – Valores de diâmetro médio obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, na MMC Mitutoyo BR..... 93

Figura 4.23 – Valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC Mitutoyo BR..... 94

Figura 4.24 – Representação das zonas de especificação e de conformidade dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo BR..... 95

Figura 4.25 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo BR..... 97

Figura 4.26 – Valores de diâmetro médio obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, na MMC Mitutoyo QM..... 98

Figura 4.27 – Valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC Mitutoyo QM..... 99

Figura 4.28 – Representação das zonas de especificação e de conformidade dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo QM..... 100

Figura 4.29 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo QM..... 102

Figura 4.30 – Valores médios de desvio de circularidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss..... 104

Figura 4.31 – Valores médios de desvio de circularidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Hexagon..... 105

Figura 4.32 – Valores médios de desvio de circularidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo BR..... 106

Figura 4.33 – Valores médios de desvio de circularidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo QM..... 107

Figura 4.34 – Valores de desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC (a) Zeiss, (b) Hexagon, (c) Mitutoyo BR e (d) Mitutoyo QM..... 108

Figura 4.35 – Indicação da nomenclatura das faces laterais da PLAFAMA..... 115

Figura 4.36 – Representação das zonas de especificação, de incerteza e de conformidade..... 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros de entrada utilizados nas simulações..... 49
Tabela 3.2 – Valores de tolerância dimensional e geométrica da PLAFAMA..... 51
Tabela 3.3 – Informações para avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada..... 61
Tabela 4.1 – Resultados obtidos na medição do ângulo entre os eixos X e Y da MMC. 66
Tabela 4.2 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro dos anéis-padrão e das peças de alumínio..... 69
Tabela 4.3 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade dos anéis-padrão e das peças de alumínio..... 74
Tabela 4.4 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro (a) do furodo cilindro e (b) do furo do mancal..... 76
Tabela 4.5 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal..... 77
Tabela 4.6 – Valores médios de diâmetro e incerteza expandida obtidos na calibração da PLAFAMA (probabilidade de abrangência de 95%)..... 80
Tabela 4.7 – Porcentagem da redução da zona de especificação dimensional dos furos medidos na MMC Zeiss..... 85
Tabela 4.8 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro efetuadas na MMZeiss..... 85
Tabela 4.9 – Porcentagem da redução da zona de especificação dimensional dos furos medidos na MMC Hexagon..... 90
Tabela 4.10 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro efetuadas na MMC Hexagon..... 91
Tabela 4.11 – Porcentagem da redução da zona de especificação dimensional dos furos medidos na MMC Mitutoyo BR..... 96
Tabela 4.12 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro efetuadas na MMC Mitutoyo BR..... 96
Tabela 4.13 – Porcentagem da redução da zona de especificação dimensional dos furos medidos na MMC Mitutoyo QM..... 101
Tabela 4.14 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro dos furos da PLAFAMA, na MMC Mitutoyo QM..... 101
Tabela 4.15 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade efetuadas na MMC Zeiss..... 109
Tabela 4.16 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade efetuadas na MMC Hexagon..... 110
Tabela 4.17 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade efetuadas na MMC Mitutoyo BR..... 111

Tabela 4.18 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade efetuadas na MMC Mitutoyo QM..... 112
Tabela 4.19 – Análise comparativa do desempenho dos métodos de ajuste na medição do diâmetro..... 114
Tabela 4.20 – Informações para avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada..... 117

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANOVA	Análise de Variância
ANSI	*American National Standards Institute*
ASME	*American Society of Mechanical Engineers*
BIPM	*Bureau International des Poids et Mesures*
CC	Informações retiradas do certificado de calibração
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DP	Distribuição de probabilidade
EM	Erro de medição
GD&T	*Geometrical Dimensioning and Tolerancing*
GL	Número de graus de liberdade
GPS	*Geometric Product Specification*
GUM	*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	*International Organization for Standardization*
IT	Grau de tolerância-padrão
LMD	Laboratório de Metrologia Dimensional
LS	*Least squares*
LSC	*Least squares circle*
MC	*Minimum circunscribed*
MCC	*Minimum circunscribed circle*
MI	*Maximum inscribed*
MIC	*Maximum Inscribed Circle*
MMC	Máquina de medir por coordenadas
MMCs	Máquinas de medir por coordenadas
MQ	Mínimos quadrados
MZ	*Minimum zone*
MZC	*Minimum zone circle*
NBR	Norma Brasileira
NIST	*National Institute of Standards and Technology*
NPL	*National Physical Laboratory*
PLAFAMA	Placa de Furos para Avaliação dos Métodos de Ajuste
PTB	*Physikalisch Technische Bundesanstalt*
QM	Quadrado médio
RBC	Rede Brasileira de Calibração
SQ	Soma de quadrados
TA	Tipo de avaliação
VC	Valor convencional

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de expansão térmica linear
$\overline{\alpha}$	Média aritmética dos valores de ângulo, calculada para os *n* ciclos de medição
α_E	Coeficiente de expansão térmica linear do material das escalas da máquina
α_{Pe}	Coeficiente de expansão térmica linear do material da peça
δT	Variação da temperatura durante as medições
ΔE_A	Correção associada ao erro de apalpamento
ΔIC_{ESQ}	Correção associada à incerteza volumétrica associada à calibração do esquadro
ΔIC_{MMC}	Correção associada à incerteza volumétrica da calibração da MMC
ΔR	Correção associada à resolução da MMC
$\Delta s(D)$	Variabilidade associada aos valores do diâmetro
$\Delta s(D_{CIR})$	Variabilidade associada aos valores do desvio de circularidade
$\Delta s(D_H)$	Variabilidade associada aos valores do diâmetro do furo
ΔT	Afastamento da temperatura ambiente em relação a 20 °C
θxy	Ângulo formado entre os eixos *Y* e Y_0
θxz	Ângulo formado entre a projeção do eixo Z_0 no plano *XZ* e o eixo *Z*
θyz	Ângulo formado entre a projeção do eixo Z_0 no plano *YZ* e o eixo *Z*
μ	Média populacional
σ	Desvio-padrão populacional
a	Seção transversal
C_i	Coeficiente de sensibilidade
$c_i(x_i)$	Coeficiente de sensibilidade referente a cada fonte x_i
D	Diâmetro do círculo
D_{CIRC}	Desvio de circularidade
D_H	Diâmetro do furo
D_i	Distância de cada ponto P_i até o centro do circulo
Dmax	Diâmetro máximo
Dmin	Diâmetro mínimo
D_{Pmax}	Distância do ponto máximo
D_{Pmin}	Distância do ponto mínimo
E_A	Erro de apalpamento
E_{per}	Efeito do erro de perpendicularidade
Ev	Erro volumétrico
Ex	Componente *x* do erro volumétrico
Ey	Componente *y* do erro volumétrico
Ez	Componente *z* do erro volumétrico
F	Variância
$IC_{MMC(X)}$	Incerteza da calibração da coordenada *X*
$IC_{MMC(y)}$	Incerteza da calibração da coordenada *Y*
$IC_{MMC(z)}$	Incerteza da calibração da coordenada *Z*
I_T	Incerteza da calibração do termômetro
k	Fator de abrangência

L	Valor da coordenada correspondente
L_0	Valor médio de diâmetro
L_i	Média aritmética dos valores da coordenada *X*, *Y* ou *Z* indicados pela MMC
me	Mensurando
n	Número de elementos da amostra
N	Número de variáveis de entrada
p	Probabilidade de significância
P_c	Centro do círculo
Perp(yz)	Perpendicularidade entre os eixos *Y* e *Z*
Perp(xy)	Perpendicularidade entre os eixos *X* e *Y*
Perp(xz)	Perpendicularidade entre os eixos *X* e *Z*
P_i	Ponto apalpado
Pitch(x)	Rotação do carro *X* em torno do eixo *Y*
Pitch(y)	Rotação do carro *Y* em torno do eixo *X*
Pitch(z)	Rotação do carro *Z* em torno do eixo *X*
P_{max}	Ponto máximo
P_{min}	Ponto mínimo
Pos(x)	Posição do eixo X
Pos(y)	Posição do eixo Y
Pos(z)	Posição do eixo Z
r	Raio do círculo
R	Resolução
$r(x_i, x_j)$	Coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j
R_H	Raio do círculo ajustado
R_{MMC}	Resolução da MMC
Roll(x)	Rotação do carro X em torno do eixo X
Roll(y)	Rotação do carro Y em torno do eixo Y
Roll(z)	Rotação do carro Z em torno do eixo Z
R_T	Resolução do termômetro
Rx(y)	Retitude do carro X na direção do eixo Y
Rx(z)	Retitude do carro X na direção do eixo Z
Ry(x)	Retitude do carro Y na direção do eixo X
Ry(z)	Retitude do carro Y na direção do eixo Z
Rz(x)	Retitude do carro Z na direção do eixo X
Rz(y)	Retitude do carro Z na direção do eixo Y
s	Desvio-padrão experimental
t	Menor distância radial entre dois círculos concêntricos
T	Temperatura
tang α	Tangente do ângulo *α*
U	Incerteza expandida
u	Incerteza-padrão
U(Cal)	Incerteza expandida declarada no certificado de calibração
u(x)	Incerteza-padrão da variável *x*
$u(x_i)$	Incerteza-padrão referente a cada fonte x_i
$u(y_i)$	Incerteza-padrão referente a cada fone y_i
$u_c(y)$	Incerteza-padrão combinada da variável de saída
$u_i(y)$	Contribuição de incerteza
$u_{xi}(y)$	Componente de incerteza do mensurado referente a cada fonte x_i
v_{ef}	Graus de liberdade efetivos
v_i	Número de graus de liberdade de cada variável de entrada
X_0	Eixo *X* como referência

x_c	Coordenada *x* do centro do círculo P_c
x_i	Coordenada *x* do ponto P_i
X_i	Variáveis de entrada
Y	Variável de saída (mensurando)
Y_0	Eixo *Y* como referência
Yaw(x)	Rotação do carro X em torno do eixo Z
Yaw(y)	Rotação do carro Y em torno do eixo Z
Yaw(z)	Rotação do carro Z em torno do eixo Y
y_c	Coordenada *y* do centro do círculo P_c
y_i	Coordenada *y* do ponto P_i
Z_0	Eixo *Z* como referência
z_c	Coordenada z do centro do círculo P_c
z_i	Coordenada z do ponto P_i

SUMÁRIO

RESUMO..... v
ABSTRACT..... vi
LISTA DE FIGURAS..... vii
LISTA DE TABELAS..... xi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS..... xiii
LISTA DE SÍMBOLOS..... xiv
SUMÁRIO..... xvii

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO..... 1
1.1. Objetivo geral..... 4
1.2. Objetivos específicos..... 4
1.3. Justificativa..... 4

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 6
2.1. Princípio de funcionamento das MMCs..... 6
2.2. Principais métodos de ajuste utilizados na determinação das geometrias substitutas..... 9
2.3. Fontes e tipos de erros na medição com MMCs..... 15
2.3.1. Erros geométricos..... 17
2.3.2. Erros do sistema de apalpação..... 19
2.3.3. Erros do software..... 22
2.3.4. Erros termicamente induzidos..... 23
2.3.5. Erros dinâmicos..... 24
2.3.6. Erros derivados da peça..... 25
2.3.7. Erros derivados da estratégia de medição..... 26
2.3.8. Erros derivados do operador..... 29
2.4. Especificações dimensionais e geométricas do produto..... 29
2.5. Incerteza de medição..... 30
2.5.1. Definição do mensurando e identificação das grandezas de influência..... 32
2.5.2. Obtenção do modelo matemático..... 33

2.5.3. Avaliação da incerteza-padrão de cada grandeza de influência..... 33
2.5.3.1. Avaliação do Tipo A da incerteza-padrão..... 34
2.5.3.2. Avaliação do Tipo B da incerteza-padrão..... 35
2.5.4. Avaliação da incerteza-padrão combinada..... 37
2.5.5. Avaliação da incerteza expandida..... 38
2.5.5.1. Cálculo das componentes de incerteza..... 39
2.5.5.2. Cálculo dos graus de liberdade efetivos..... 39
2.5.5.3. Determinação do fator de abrangência..... 40
2.5.6. Apresentação do resultado de medição..... 41
2.6. Delineamento de experimentos..... 41

CAPÍTULO III – METODOLOGIA..... 43
3.1. Testes preliminares: avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste e da MMC Mitutoyo BR na medição do diâmetro e do desvio de circularidade 43
3.2. Projeto do artefato-padrão..... 47
3.3. Fabricação e calibração do artefato-padrão PLAFAMA..... 51
3.4. Aplicação do artefato-padrão PLAFAMA para avaliação dos métodos de ajuste em MMCs..... 52
3.5. Avaliação da incerteza de medição..... 59
3.5.1. Incerteza associada às coordenadas X, Y e Z dos pontos apalpados..... 59
3.5.2. Incerteza associada à distância entre dois pontos..... 60
3.5.3. Incerteza associada ao diâmetro do furo..... 60
3.5.4. Incerteza associada aos desvios de circularidade e de cilindricidade..... 60
3.5.5. Avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada..... 61

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 62
4.1. Resultados dos testes preliminares..... 62
4.1.1. Resultados da avaliação do comportamento metrológico da MMC Mitutoyo BR..... 62
4.1.2. Resultados da avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste na medição do diâmetro..... 67
4.2. Resultados da fabricação e calibração do artefato-padrão PLAFAMA..... 79
4.3. Resultados da aplicação do artefato-padrão PLAFAMA para avaliação dos métodos de ajuste em MMCs..... 80
4.3.1. Resultados da medição do diâmetro na MMC Zeiss..... 81
4.3.2. Resultados da medição do diâmetro na MMC Hexagon..... 87
4.3.3. Resultados da medição do diâmetro na MMC Mitutoyo BR..... 93
4.3.4. Resultados da medição do diâmetro na MMC Mitutoyo QM..... 98
4.3.5. Resultados da medição do desvio de circularidade..... 103

4.4. Análise comparativa do desempenho dos métodos de ajuste na medição do diâmetro..... 112
4.5. Metodologia proposta para avaliação dos métodos de ajuste implementados em MCCs utilizando o artefato-padrão PLAFAMA..... 114
4.5.1. Medição do diâmetro e do desvio de circularidade..... 115
4.5.2. Avaliação da incerteza de medição..... 116
4.5.3. Avaliação dos resultados..... 117

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES..... 119

CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 121

CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 122

ANEXOS..... 129
Anexo I – Certificado de calibração MMC Mitutoyo BR..... 130
Anexo II – Certificado de calibração anel-padrão de VC 15,996 mm..... 134
Anexo III – Certificado de calibração anel-padrão de VC 40,000 mm..... 135
Anexo IV – Certificado de calibração máquina universal de medir comprimentos..... 136
Anexo V – Certificado de calibração termohigrômetro digital Instrutherm..... 141
Anexo VI – Certificado de calibração MMC Zeiss..... 143
Anexo VII – Certificado de calibração termohigrômetro digital EPTEC..... 152
Anexo VIII – Certificado de calibração MMC Hexagon..... 153
Anexo IX – Certificado de calibração MMC Mitutoyo QM..... 156
Anexo X – Certificado de calibração termohigrômetro digital TFA..... 160
Anexo XI – Certificado de calibração esquadro de aço Mitutoyo..... 163
Anexo XII – Certificado de calibração artefato-padrão PLAFAMA..... 165

APÊNDICES..... 169
Apêndice I – Desenho técnico do artefato-padrão PLAFAMA..... 169
Apêndice II – Resultados da medição do desvio de cilindricidade na MMC Zeiss..... 171
Apêndice III – Resultados da medição do desvio de posição, desvio de retitude, desvio de perpendicularidade e desvio de paralelismo medidos na MMC Zeiss..... 173

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A época contemporânea, caracterizada por grandes descobertas científicas, acelerado desenvolvimento tecnológico e uma economia cada vez mais globalizada, trouxe a evolução dos processos produtivos. O caráter global das relações comerciais, a competitividade e a busca por maiores parcelas no mercado levaram os países a investirem na procura de novas tecnologias, com o objetivo de aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos. Como consequência, máquinas modernas de usinagem e inovação nos processos de fabricação foram incorporados gradativamente ao mundo industrializado, onde os produtos são fabricados com tolerâncias cada vez mais estreitas e em maiores quantidades. Assim, surgiu a necessidade de integrar a estes sistemas meios de controle de qualidade mais rápidos, precisos, flexíveis e confiáveis.

Neste contexto, as Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs) apresentam-se como sistemas de medição eficazes para satisfazerem estas necessidades. Estas máquinas representam o que de mais avançado há em sistemas de medição utilizados no campo da metrologia dimensional, para efetuar o controle dimensional e geométrico de peças. As MMCs permitem a medição dos mais variados tipos de peças, como engrenagens, revestimentos de aeronaves, módulos de satélite e turbinas, entre outros (Fig. 1.1).

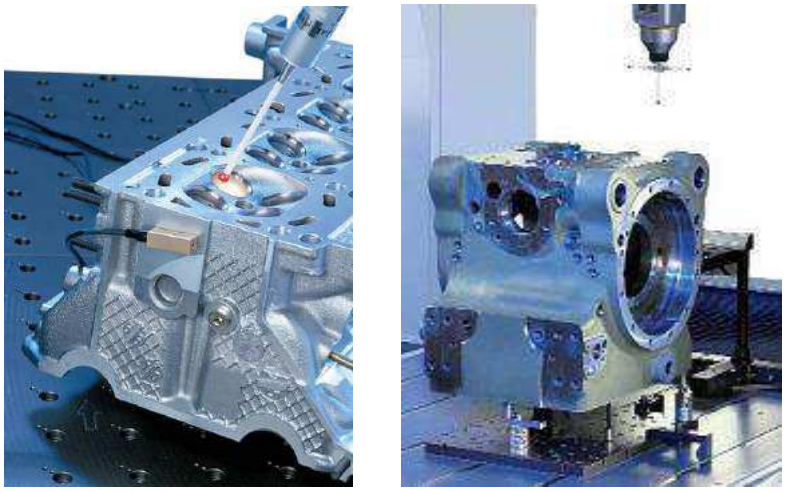


Figura 1.1 – Medição de diferentes peças em uma MMC (MITUTOYO, 2013).

As MMCs representam fisicamente um sistema de coordenadas cartesiano, em que pontos discretos são apalpados na superfície da peça por meio de um sensor. Um *software* dedicado armazena as coordenadas *X*, *Y* e *Z* destes pontos e, a partir delas, determina as geometrias substitutas por meio de diferentes métodos de ajuste.

Dentre estes métodos, Phillips (2011) e Shakarji (2011) apontam que os mais aplicados são: mínimos quadrados (*least squares – LS*), mínimo circunscrito (*minimum circunscribed – MC*), máximo inscrito (*maximum inscribed – MIC*) e mínima zona (*minimum zone – MZ*). No entanto, os autores destacam que estes métodos podem fornecer resultados consideravelmente distintos na medição de peças que apresentam desvios de forma significativos.

Dos métodos de ajuste citados acima, o dos mínimos quadrados é o mais utilizado, uma vez que, por ser matematicamente mais simples, não necessita de recursos computacionais avançados para implementação. Ainda, apresenta baixa sensibilidade à presença de pontos extremos (*outliers*) e é aplicável para ajuste da maioria das geometrias substitutas. Porém, ao longo dos anos, observou-se que em muitas aplicações práticas este método não fornece resultados adequados (HOPP, 1993; PHILLIPS, 2011; SHAKARJI, 2011).

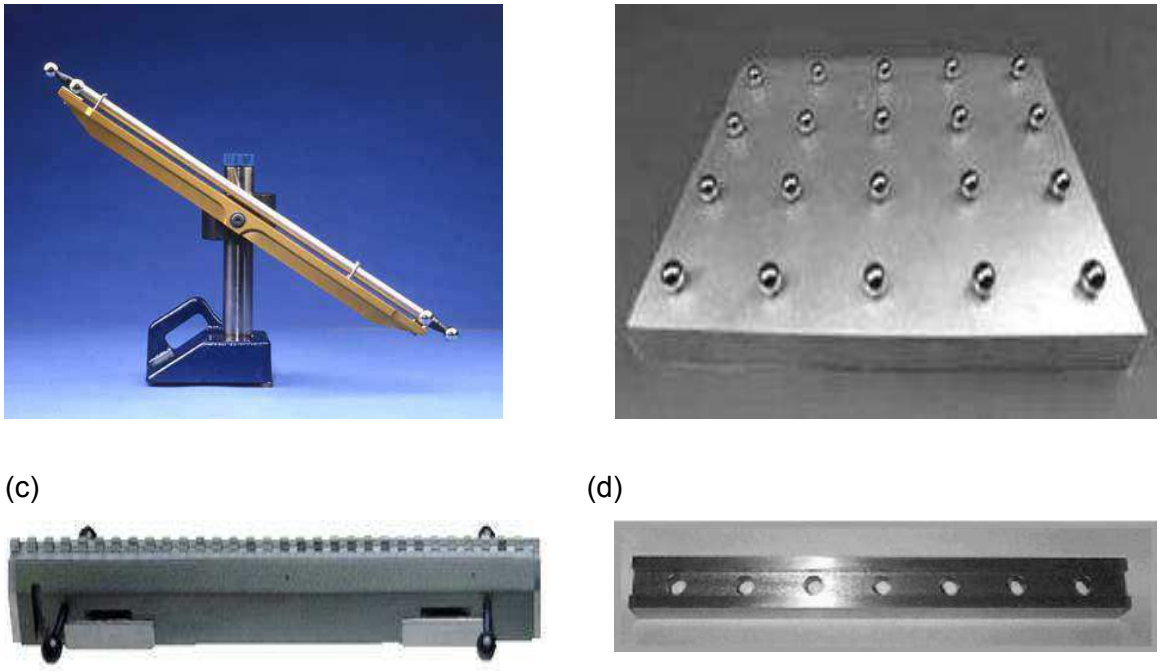
Neste sentido, Weckenmann e Hartmann (2013) ressaltam que o método de ajuste selecionado deve ser orientado à funcionalidade da peça, sendo apropriados para tal os métodos mínimo circunscrito, máximo inscrito ou mínima zona. No entanto, uma desvantagem destes métodos é que as geometrias substitutas são estabelecidas a partir de um número pequeno de pontos, sendo, portanto, mais sensíveis à *outliers*. Ainda, podem demandar alta densidade de pontos para uma representação consistente do mensurando. Desta forma, Weckenmann et al. (1995) destaca que é importante entender e quantificar a

diferença entre os valores fornecidos pelos métodos de ajuste, a fim de que decisões coerentes sejam tomadas.

Os artefatos-padrão até então desenvolvidos têm como características construtivas elevada exatidão dimensional e geométrica. Deste modo, os resultados fornecidos são similares para todos os métodos de ajuste e para todas as geometrias. Ainda, a tendência de projetar e fabricar artefatos-padrão virtuais isentos de desvios de forma macro-geométricos (PIRATELLI-FILHO; FERNANDES; ARENCIBIA, 2012; GONZÁLES-MADRUGA et al., 2013; PATIÑO et al., 2014) impossibilita, ainda mais, a avaliação do desempenho dos diferentes métodos de ajuste.

Atualmente, para a calibração das MMCs são utilizados artefatos-padrão de diversas formas e dimensões, sendo os principais: padrão barra de esferas, padrão placa de esferas, padrão de círculos, padrão passo-a-passo, padrão barra de furos e padrão volumétrico tetraédrico. A Figura 1.2 apresenta alguns deles.

(a) (b)



(c) (d)

Figura 1.2 – Artefatos-padrão: (a) barra de esferas (BAL-TEC, 2013); (b) placa de esferas (BAL-TEC, 2013); (c) padrão passo-a-passo (MITUTOYO, 2013); (d) barra de furos (ZIRONDI, 2001).

No procedimento de calibração, por meio da máquina são medidas as dimensões do artefato pré-calibrado em determinadas posições e orientações dentro do volume de trabalho da mesma. O erro é calculado como a diferença entre o valor médio obtido durante a medição do padrão na máquina e o valor convencional.

Todos os artefatos citados têm sido amplamente estudados por muitos pesquisadores, com o objetivo de obter-se um novo padrão que reúna as principais vantagens dos já existentes. Entretanto, não foram encontrados trabalhos que visem o projeto e fabricação de um artefato-padrão que permita avaliar o desempenho dos métodos de ajuste, no sentido de determinar os erros associados a estes, bem como suas vantagens, desvantagens e limitações de uso.

Pelo exposto, a seguir é apresentado o objetivo geral e os objetivos específicos da presente tese.

1.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho metrológico dos métodos de ajuste (mínimos quadrados, mínimo circunscrito, máximo inscrito e mínima zona) utilizados nos softwares para determinação das geometrias substitutas em máquinas de medir por coordenadas.

1.2. Objetivos específicos

- Projetar, fabricar e calibrar um artefato-padrão que permita avaliar o desempenho metrológico dos métodos de ajuste mínimos quadrados, mínimo circunscrito, máximo inscrito e mínima zona;
- Desenvolver uma metodologia de avaliação do desempenho metrológico destes métodos de ajuste, utilizando o artefato-padrão fabricado;
- Identificar os limites de uso destes métodos de ajuste, suas vantagens e desvantagens, com o intuito de minimizar os erros de medição.

1.3 Justificativa

As máquinas de medir por coordenadas trouxeram para o campo da metrologia dimensional significativa versatilidade, reduzindo expressivamente o tempo de medição quando comparadas com os instrumentos convencionais. No entanto, a complexidade destas máquinas em termos construtivos, operacionais e de processamento de dados resulta em uma série de fatores que levam ao surgimento de erros, que podem comprometer a qualidade dos resultados das medições.

Dentre estes erros, aqueles provenientes da estrutura física da máquina (erros geométricos), do sistema apalpador e os termicamente induzidos têm sido exaustivamente estudados, e técnicas têm sido propostas e implementadas para compensar seus efeitos.

Para esta finalidade, pode-se citar a utilização de materiais mais estáveis termicamente (como o Zerodur®), sistemas de compensação de erros, bem como melhoria da qualidade dimensional e geométrica dos elementos mecânicos das MMCs.

Os erros relacionados ao *software* também têm sido alvo de estudos, principalmente aqueles provenientes da implementação incorreta dos algoritmos de ajuste, responsáveis por fornecerem as geometrias substitutas. Neste sentido, Phillips (2011) ressalta a importância do algoritmo de ajuste na obtenção da geometria substituta e na incerteza associada à medição. Este autor classifica os fatores de influência que levam à incerteza de medição com MMCs em cinco categorias principais: *hardware*, peça, estratégia de medição, seleção e implementação do algoritmo (Fig. 1.3).

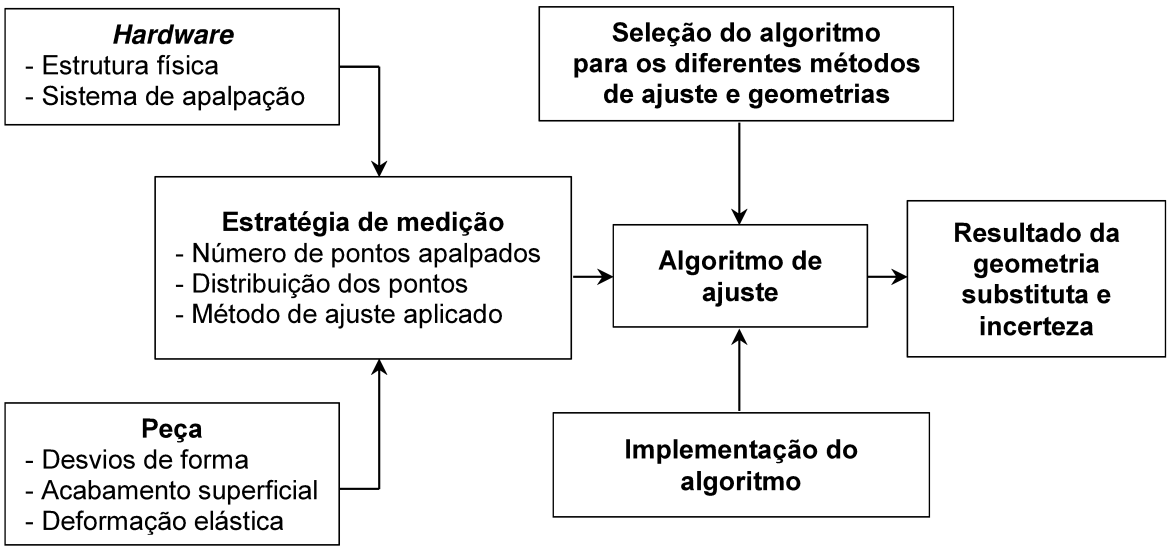


Figura 1.3 – Fatores de influência que afetam a incerteza de medição com MMCs (Adaptado de Phillips, 2011).

No entanto, observa-se escassez de pesquisas que tratem dos erros relacionados à estratégia de medição, especificamente quanto à escolha do método de ajuste a ser utilizado na determinação das geometrias substitutas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre medição com máquinas de medir por coordenadas. Inicialmente, é mostrado o princípio de funcionamento destas máquinas, e os principais métodos de ajuste utilizados na determinação das geometrias substitutas. Posteriormente, são expostos conceitos sobre erros na medição com MMCs, destacando-se as principais fontes e tipos de erros. Em seguida, versa-se sobre as especificações dimensionais e geométricas do produto, e a importância da definição de estratégias de medição coerentes com as tolerâncias especificadas. Por fim, são apresentados os principais conceitos relacionados ao tema incerteza de medição.

2.1. Princípio de funcionamento das MMCs

As MMCs representam fisicamente um sistema de coordenadas cartesiano, em que pontos discretos são apalpados na superfície da peça por meio de um sensor. Um *software* dedicado armazena as coordenadas *X*, *Y* e *Z* destes pontos e, a partir delas, determina as geometrias substitutas por meio de diferentes métodos de ajuste. Dentre estas geometrias podem-se citar ponto, linha, plano, círculo, cilindro, cone, esfera, bem como as relações entre as mesmas (tais como: distância ponto-ponto, distância ponto-plano, ângulo, entre outras) e os valores de desvios geométricos de forma, orientação e posição. A Figura 2.1 ilustra o princípio de medição de uma MMC.

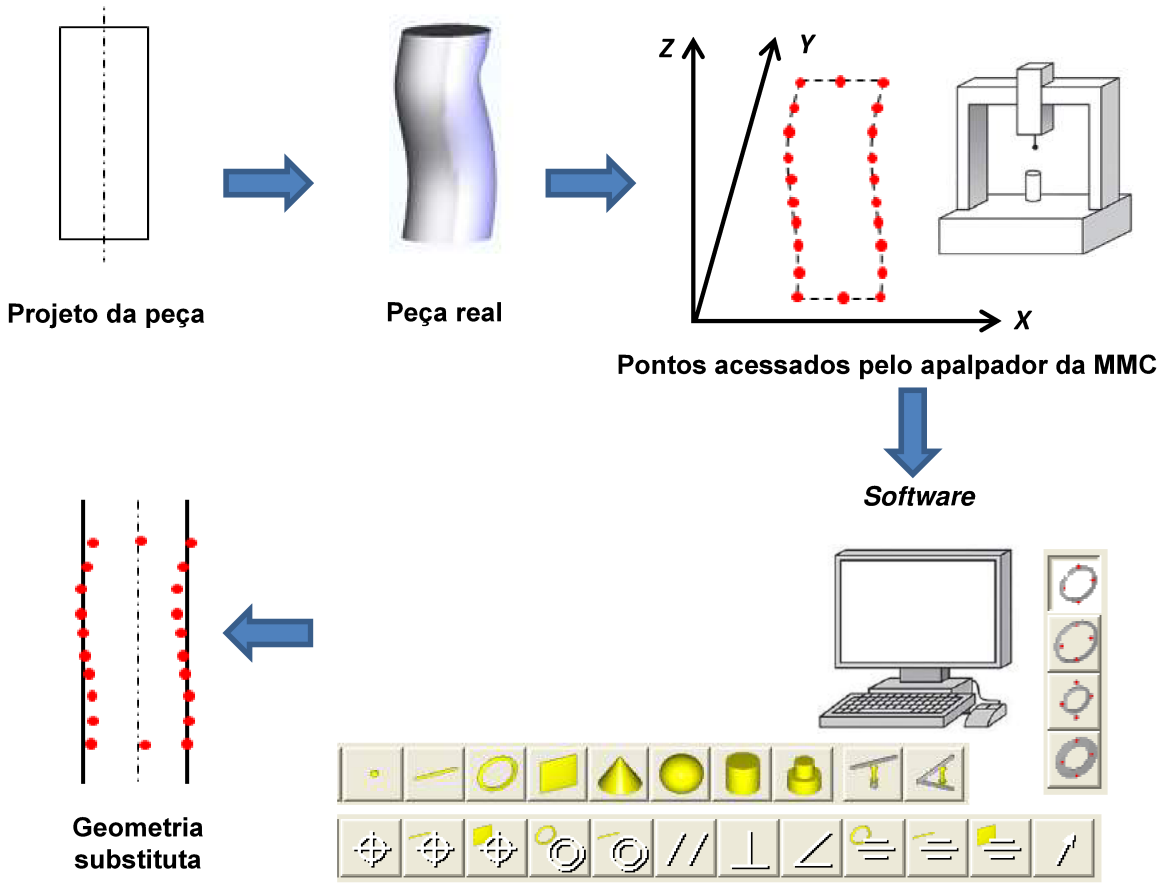


Figura 2.1 – Princípio de medição da máquina de medir por coordenadas (Adaptado de Pereira, 2011).

Embora o princípio de funcionamento das MMCs seja único, quanto à estrutura física há diferenças entre elas. A norma americana ASME B89.4.1 (ASME, 1997) classifica as MMCs de acordo com a estrutura mecânica das mesmas. Para Pereira (2011), os tipos mais importantes e comuns no mercado são: ponte móvel, ponte fixa, cantilever, braço horizontal e pórtico (Fig. 2.2).

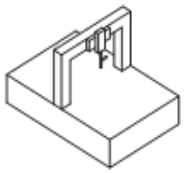
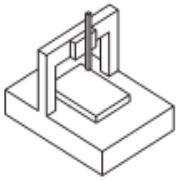
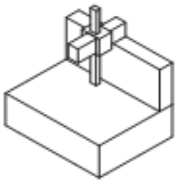
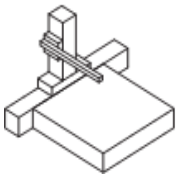
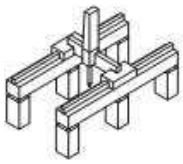
	Ponte móvel	Ponte Fixa	Cantilever	Braço Horizontal	Pórtico
Estrutura					
Aplicações gerais	X	X	X	X	
Elevada exatidão	X	X			
Peças grandes				X	X

Figura 2.2 – Principais tipos de MMC (PEREIRA, 2011).

Dentre os tipos apresentados na Fig. 2.2, a configuração ponte móvel é a mais utilizada na indústria, e permite a medição de peças de pequenas a médias dimensões, com uma incerteza relativamente baixa. Esta máquina consiste basicamente em uma mesa fixa, onde a peça a ser medida é apoiada, e uma ponte móvel, que permite movimentar o sensor ao longo de três eixos coordenados. Uma das vantagens deste modelo é que a máquina possui duas colunas de apoio, o que reduz o efeito de flexão do eixo horizontal (MORSE, 2011; PEREIRA, 2011).

Já as máquinas de medir do tipo ponte fixa são dotadas de uma mesa móvel, e esta é considerada um eixo de deslocamento da máquina. Esta possui, ainda, uma ponte rígida unida à base da máquina. De acordo com Pereira (2011), destaca-se como vantagem deste modelo a rigidez de sua estrutura. No entanto, a reduzida velocidade de operação e a ocorrência de flexões na mesa são as suas principais desvantagens. Para Morais (2012), esta configuração de MMC é uma das mais exatas e precisas comercializadas atualmente.

O modelo cantilever possui como característica uma mesa fixa e um braço que se movimenta, sendo este o eixo vertical que carrega a sonda de medição. Este tipo de máquina permite uma boa acessibilidade à peça, e também a medição de peças com maior massa sem afetar a exatidão. Porém, como desvantagem destaca-se a flexão do eixo *Y* (PEREIRA, 2011).

Por sua vez, a estrutura aberta da configuração do tipo braço horizontal permite acesso direto à peça, o que facilita significativamente o carregamento e o descarregamento das mesmas. Ainda, as MMCs horizontais podem ser integradas como um componente da linha de produção automatizada, tais como no controle das carrocerias no setor de automóveis. Estas maquinas possuem um longo curso de medição em seu eixo de maior

deslocamento, e possibilitam a medição a altas velocidades. No entanto, a maior desvantagem desta configuração é a baixa exatidão (PEREIRA, 2011).

Por fim, o tipo pórtico é projetado com uma estrutura de grande rididez para evitar deformações, de forma que a massa das peças medidas não ocasione distorções na estrutura e, consequentemente, gere erros de medição. Este tipo de configuração de MMCs é aplicado para medição de peças de grandes dimensões e tolerâncias estreitas, devido ao seu grande volume de trabalho e alta exatidão (MORAIS, 2012).

Diante do exposto, a escolha da estrutura mecânica envolve questões como exatidão, flexibilidade, tempo do ciclo de medição e custo. Di Giacomo (1986) destaca ainda que o detalhamento da estrutura mecânica da máquina é extremamente importante no desenvolvimento de uma formulação matemática para o equacionamento do erro volumétrico, uma vez que as equações do erro mudam de acordo com a estrutura analisada.

2.2. Principais métodos de ajuste utilizados na determinação das geometrias substitutas

Dentre os métodos matemáticos de ajuste utilizados na determinação das geometrias substitutas, os mais comumente empregados na medição por coordenadas são: mínimos quadrados, mínimo circunscrito, máximo inscrito e mínima zona. No entanto, estes diferentes métodos de ajuste produzem resultados consideravelmente distintos, principalmente quando se medem peças que apresentam desvios de forma significativos (PHILLIPS, 2011; SHAKARJI, 2011).

A relevância deste assunto foi levantada na década de 80 (WALKER, 1988). Na época, estudos apontaram que determinados métodos de ajuste, utilizados pelos *softwares* dedicados às MMCs, não calculavam os parâmetros dos desvios de forma e posição como estabelecido pela norma ANSI Y14.5M-1982, atual ASME Y14.5M-2009 (ASME, 2009).

Desde então, o método dos mínimos quadrados tem sido o mais utilizado no contexto industrial. Porém, ao longo dos anos foram identificados problemas com o desempenho deste método, uma vez que em muitas aplicações práticas ele não fornece resultados adequados (WALKER, 1988; HOPP, 1993; PHILLIPS, 2011; SHAKARJI, 2011).

Neste sentido, Weckmann, Knauer e Killmaier (2001) destacam que o algoritmo de ajuste a ser adotado na determinação da geometria substituta deve ser adequado do ponto de vista funcional, de forma a representar corretamente o mensurando conforme definido pelas especificações geométricas avaliadas. Ou seja, é a funcionalidade da característica

que define o método de ajuste a ser utilizado. Neste caso, os métodos de ajuste mais adequados são o mínimo circunscrito, o máximo inscrito ou a mínima zona.

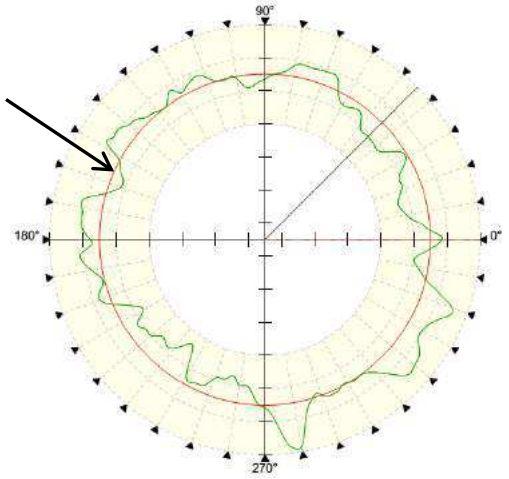
No entanto, uma desvantagem que decorre da matemática utilizada por estes métodos de ajuste é que as geometrias substitutas são estabelecidas a partir de um número pequeno de pontos extremos. Por este motivo, estes ajustes são mais sensíveis à *outliers*. Ainda, estes métodos podem demandar alta densidade de pontos para uma representação consistente da característica avaliada (PHILLIPS, 2011).

Cabe ressaltar que a incerteza associada à determinação desses pontos influi nos parâmetros que definem a geometria substituta. Portanto, a avaliação pelos métodos máximo inscrito, mínimo circunscrito e mínima zona é severamente afetada pela presença de erros de medição e valores atípicos (PIEKAR, 2006).

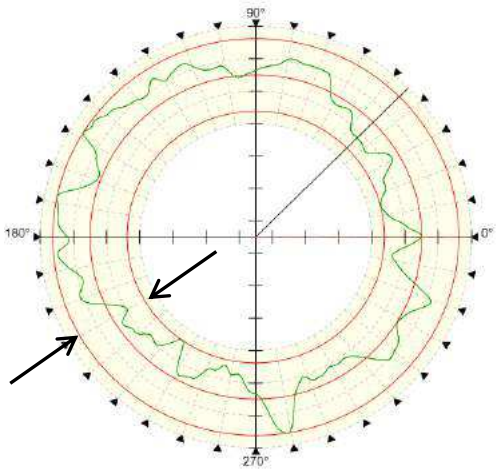
Esta problemática pode ser observada na medição do desvio de circularidade. Neste caso, para a obtenção da geometria substituta é necessário ajustar um círculo aos *n* pontos apalpados por meio de um dos métodos (Fig. 2.3):

- círculo dos mínimos quadrados (LSC – *Least Squares Circle*): consiste em calcular o centro de uma circunferência, de tal modo que a soma dos quadrados das distâncias dos pontos apalpados até a circunferência seja mínimo (Fig. 2.3a).
- círculo da mínima zona (MZC – *Minimum Zone Circle*): determina dois círculos concêntricos, com a menor distância radial, que limitam todos os pontos apalpados (Fig. 2.3b).
- círculo máximo inscrito (MIC – *Maximum Inscribed Circle*): o maior círculo que pode ser ajustado pelos três pontos apalpados que possuem a menor distância com relação ao centro da circunferência (Fig. 2.3c).
- círculo mínimo circunscrito (MCC – *Minimum Circunscribed Circle*): o menor círculo que pode ser ajustado pelos três pontos apalpados mais distantes do centro da circunferência (Fig. 2.3d).

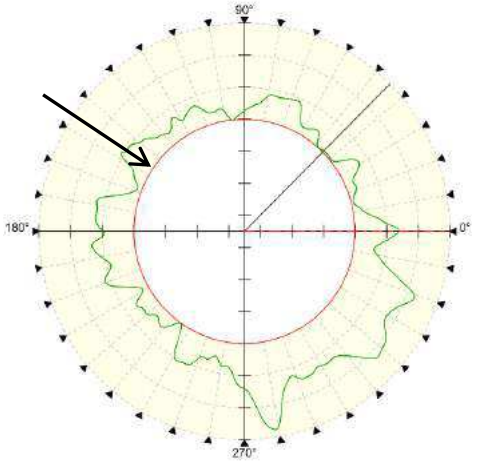
(a) LSC



(b) MZC



(c) MIC



(d) MCC

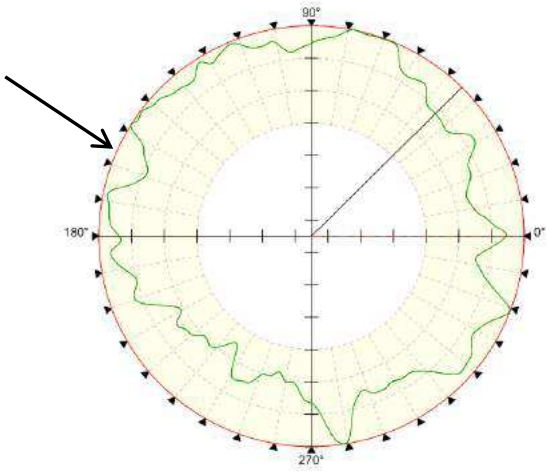


Figura 2.3 – Círculo ajustado por (a) mínimos quadrados, (b) mínima zona, (c) máximo inscrito e (d) mínimo circunscrito.

Como pode-se observar na Fig. 2.3, diferentemente do que acontece quando aplicado o método dos mínimos quadrados, as geometrias substitutas criadas pelos métodos mínima zona, máximo inscrito e mínimo circunscrito são estabelecidas a partir de um número limitado de pontos. Phillips (2011) destaca que os erros associados à obtenção das coordenadas *X*, *Y* e *Z* destes pontos influenciam significativamente na incerteza final da medição.

Diversas normas internacionais que visam a determinação de tolerâncias estipulam a utilização de métodos de ajuste específicos para obtenção das geometrias substitutas. Na determinação de desvios de forma, o método da mínima zona é aquele em conformidade com a norma ISO 1101 (ISO, 2012), que apresenta em seu Anexo B exemplos de como avaliar os desvios de forma obtidos e compará-los à zona de tolerância. No caso particular

do desvio de circularidade, este estará dentro da tolerância especificada quando a distância entre dois círculos concêntricos, com a menor distância radial (*t*) entre si, for menor ou igual ao valor da tolerância (Fig. 2.4).

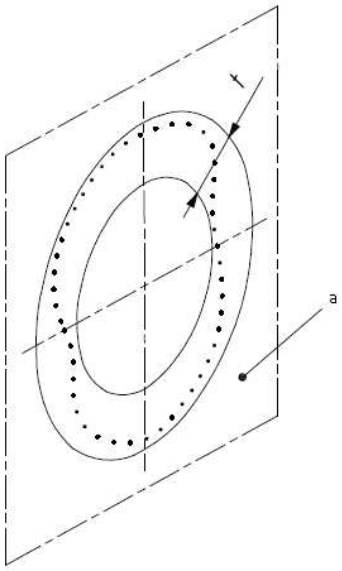


Figura 2.4 – Representação da zona de tolerância para o desvio de circularidade, considerando uma seção transversal (*a*) (ISO 1101, 2012).

O método de otimização matemática por mínimos quadrados consiste em encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados, com o intuito de minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (tais diferenças são chamadas de resíduos). Na medição com MMC, os resíduos são dados pela diferença de cada ponto medido em relação ao elemento geométrico ajustado.

Em particular, para a obtenção da geometria substituta na medição do diâmetro de um furo, é necessário ajustar um círculo aos (*n*) pontos apalpados na superfície da peça. Neste caso, o método dos mínimos quadrados consiste em calcular o centro de uma circunferência, de tal modo que a soma dos quadrados das distâncias dos pontos amostrados até a circunferência seja mínima.

Durante a medição, o programa da máquina armazena as coordenadas *X*, *Y* e *Z* dos pontos apalpados, projetando-os em um plano. A seguir, o raio (*r*) e as coordenadas do centro do círculo (x_c, y_c) que melhor se ajusta aos (*n*) pontos projetados no plano *XY* são determinados, como apresentado na Eq. (2.1) (SATO, 2002).

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2 \tag{2.1}$$

Para estimar as coordenadas do centro e o raio do círculo, deve-se minimizar a expressão dada pela Eq. (2.2).

$$\begin{aligned}&\sum \varepsilon_i^2 = \sum (r_i^2 - r^2)^2 = \\ &\sum \left[-2 \cdot x_i \cdot x_c - 2 \cdot y_i \cdot y_c + \left(x_i^2 + y_i^2\right) + \left(x_c^2 + y_c^2 - r^2\right)\right]^2\end{aligned} \tag{2.2}$$

Fazendo as mudanças de variáveis indicadas nas Eq. (2.3) a (2.5), pode-se reescrever a Eq. (2.2) de forma linear, como apresentado na Eq. (2.6).

$$a = -2 \cdot x_c \tag{2.3}$$

$$b = -2 \cdot y_c \tag{2.4}$$

$$c = x_c^2 + y_c^2 - r^2 \tag{2.5}$$

$$MQ = \sum \left[a \cdot x_i + b \cdot y_i + \left(x_i^2 + y_i^2\right) + c \right]^2 \tag{2.6}$$

Os coeficientes de mínimos quadrados (MQ) são determinados derivando parcialmente com relação às variáveis *a*, *b* e *c* e igualando a zero, como apresentado nas Eq. (2.7) a (2.9).

$$\frac{\partial MQ}{\partial a} = 2 \cdot \sum \left[a \cdot x_i + b \cdot y_i + \left(x_i^2 + y_i^2\right) + c \right] \cdot (x_i) = 0 \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial MQ}{\partial b} = 2 \cdot \sum \left[a \cdot x_i + b \cdot y_i + \left(x_i^2 + y_i^2\right) + c \right] \cdot (y_i) = 0 \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial MQ}{\partial c} = 2 \cdot \sum \left[a \cdot x_i + b \cdot y_i + \left(x_i^2 + y_i^2\right) + c \right] \cdot 1 = 0 \tag{2.9}$$

Na forma matricial, tem-se o sistema linear apresentado na Eq. (2.10).

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \cdot y_i & \sum x_i \\ \sum x_i \cdot y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum \left(x_i^3 + x_i \cdot y_i^2\right) \\ -\sum \left(x_i^2 \cdot y_i + y_i^3\right) \\ -\sum \left(x_i^2 + y_i^2\right) \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

Utilizando as notações representadas nas Eq. (2.11) a (2.18), tem-se que a solução do sistema de equações normais, Eq. (2.10), é dada pelas Eq. (2.19) a (2.21).

$$D = \sum x_i^2 \cdot \sum y_i - \sum x \cdot \sum x_i \cdot y_i \tag{2.11}$$

$$E = -\sum x_i \cdot y_i \cdot \left[-\sum \left(x_i^3 + x_i \cdot y_i^2\right)\right] + \sum x^2 \cdot \left[-\sum \left(x_i^2 \cdot y_i + y_i^3\right)\right] \tag{2.12}$$

$$F = \sum x_i^2 \cdot \sum y_i^2 - \left(\sum x_i \cdot y_i\right)^2 \tag{2.13}$$

$$G = \sum x_i^2 \cdot \left[-\sum \left(x_i^2 + y_i^2\right)\right] - \sum x_i \cdot \left[-\sum \left(x_i^3 + x_i \cdot y_i^2\right)\right] \tag{2.14}$$

$$H = N \cdot \sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2 \tag{2.15}$$

$$c = \left(D \cdot E - F \cdot G\right) \div \left(D^2 - H \cdot F\right) \tag{2.16}$$

$$b = \left(G - H \cdot c\right) \div D \tag{2.17}$$

$$a = -\left[\left(\sum x_i\right) \cdot c + \left(\sum x_i \cdot y_i\right) \cdot b + \sum \left(x_i^3 + x_i \cdot y_i^2\right)\right] \div \sum x_i^2 \tag{2.18}$$

Calculados os coeficientes de mínimos quadrados, são determinados os parâmetros do círculo a ser ajustado. Tais expressões são apresentadas nas Eq. (2.19) a (2.21).

$$x_c = \frac{-a}{2} \tag{2.19}$$

$$y_c = \frac{-b}{2} \tag{2.20}$$

$$r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 - c} \tag{2.21}$$

Em seguida é calculada a distância (D_i) de cada ponto apalpado (P_i) até o centro do circulo (P_c), identificando quais os pontos mais (P_{max}) e menos (P_{min}) afastados do ponto (P_c), como apresentado na Eq. (2.22).

$$D_{Pi} = D\left(P_c, P_i\right) = \sqrt{\left(x_i - x_c\right)^2 + \left(y_i - y_c\right)^2 + \left(z_i - z_c\right)^2} \tag{2.22}$$

Onde: (x_c, y_c, z_c) e (x_i, y_i, z_i) são as coordenadas dos pontos (P_c) e (P_i), respectivamente.

O desvio de circularidade é dado pela diferença entre as distâncias máxima (D_{Pmax}) e mínima (D_{Pmin}), Eq. (2.23).

$$D_{CIRC} = D_{P\,max} - D_{P\,min} \tag{2.23}$$

Por sua vez, para a determinação do círculo por mínima zona, do círculo máximo inscrito e do círculo mínimo circunscrito, Barczak (1996) destaca que são utilizados diversos algoritmos heurísticos, algoritmos de aproximação linear e algoritmos baseados em geometria computacional.

Megiddo (1983) propôs um algoritmo para encontrar o menor círculo circunscrito por programação linear. Jywe, Liu e Chen (1999) desenvolveram modelos matemáticos para selecionar pontos de controle exatos a fim de avaliar a solução analítica do MCC e do MIC, por meio de equações algébricas lineares simultâneas. Huang (1999) apresenta um algoritmo utilizando diagramas de Voronoi como uma solução exata para a determinação do MZC. Shakarji e Clement (2004) descreve o algoritmo de referência desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) para a determinação do MCC, do MIC e do MZC, baseado no algoritmo de otimização recozimento simulado. Goch e Lübke (2008) propuseram uma modificação no algoritmo Chebyshev para o cálculo do MCC e do MIC. Feng et al. (2013) implementaram um algoritmo baseado em otimização combinatória para determinação do MCC.

2.3. Fontes e tipos de erros na medição com MMCs

Na literatura, os erros na medição com MMCs são geralmente agrupados de acordo com as suas fontes (HOCKEN et al., 1977; BURDEKIN; VOUTSADOPOULOS, 1981; DI GIACOMO, 1986; ELSHENNAWY; HAM, 1990; CARDOZA, 1995; WECKENMANN; KNAUER, 1998; ORREGO; DI GIACOMO; ABACKERLI, 2000; WILHELM; HOCKEN; SCHWENKE, 2001; PHILLIPS, 2011), sendo que uma das formas de classificação mais difundida considera quatro grupos principais, relacionados a: (1) equipamento; (2) ambiente; (3) peça; (4) operador e estratégia de medição (Fig. 2.5).

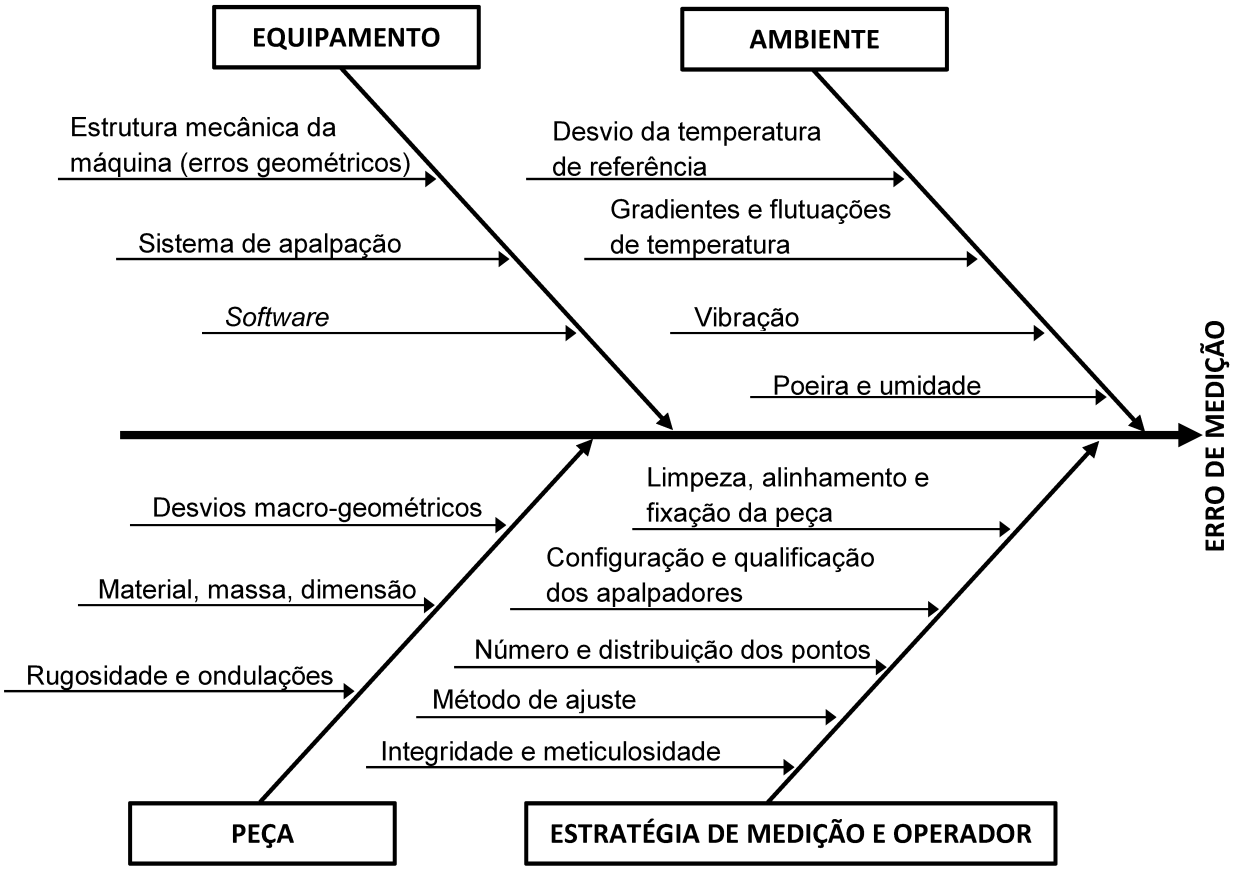


Figura 2.5 – Diagrama de causa-e-efeito das principais fontes de erro na medição com MMCs (WECKENMANN; GEWANDE, 1999).

Como apresentado na Fig. 2.5, os efeitos das diferentes fontes de erros presentes em uma MMC se interagem e afetam diretamente os valores das coordenadas dos pontos que definem as geometrias substitutas. Esta é a particularidade que torna extremamente complexa a análise dos erros e da incerteza de medição com MMC, pois cada ponto coordenado é influenciado de maneira diferente (ORREGO, DI GIACOMO, ABACKERLI, 2000; PHILLIPS, 2011).

Ainda de acordo com a classificação apresentada na Fig. 2.5, os erros concernentes ao primeiro grupo (equipamento) são derivados de fatores de influência intrínsecos às MMCs, enquanto que aqueles originados pelos demais grupos são independentes da máquina, pois resultam de condições externas a ela, como a temperatura, a peça e o operador.

A seguir, são apresentados e discutidos os principais erros na medição com MMCs.

2.3.1. Erros geométricos

A estrutura de uma MMC é composta por três guias de deslizamento de alta qualidade, cada qual destinada a materializar um grau de liberdade de um sistema de coordenadas cartesiano (ABACKERLI; ORREGO, 2001), sendo permitido apenas um movimento unidimensional ao longo de cada um desses eixos. Este movimento é descrito baseado na cinemática do corpo rígido (HOCKEN et al., 1977), que considera que um corpo rígido no espaço possui seis graus de liberdade, correspondentes a três movimentos de translação e três movimentos de rotação.

No entanto, quando um carro se desloca sobre uma guia linear, este não se move somente em uma única direção, mas sofrerá movimentos indesejáveis nas direções não preferenciais, originando os denominados erros geométricos (BURDEKIN; VOUTSADOPOULOS, 1981; HOCKEN et al., 1993; SCHWENKE et al., 2008). Estes erros se combinam de forma complexa por todo o volume de trabalho da máquina, gerando o denominado erro volumétrico.

Os erros geométricos geralmente são devidos a imperfeições na geometria dos componentes individuais que formam a estrutura da máquina, bem como do desalinhamento dos eixos, resultante de limitações na manufatura e na montagem, além do desgaste de seus componentes. Abackerli e Orrego (2001) consideram também que esses erros ocorrem em função de folgas das guias de deslizamento da máquina, necessárias para que exista o movimento relativo entre suas partes.

Os erros geométricos são classificados como erros translacionais, ou de deslocamento, e erros rotacionais, ou angulares. Segundo a norma B89.4.10360.2 (ASME, 2008), durante o movimento de um carro em uma determinada direção, como por exemplo na direção *X* (Fig. 2.6), a leitura na escala do eixo *X* não indica o valor exato do deslocamento experimentado pelo carro, originando o denominado erro de posição, que caracteriza a limitação da máquina de se posicionar ao longo da direção preferencial de movimento. Este é tido como um grau de liberdade adicional na direção do movimento. Para Abackerli e Orrego (2001), a dificuldade de posicionamento é típica dos mecanismos de deslocamento, aparecendo sempre nas diversas máquinas, em maior ou menor intensidade. Por tal motivo, também chamados de erros de escala.

Já os movimentos de translação não desejados que o carro *X* experimenta nas direções dos eixos *Y* e *Z* são os denominados erro de retitude na direção *Y*, devido à translação no eixo *X*, e erro de retitude na direção *Z*, devido à translação no eixo *X*, respectivamente.

Os outros três são erros angulares ou de rotação, que representam movimentos rotacionais indesejáveis em torno de cada um dos três eixos de referência. São chamados

de *roll*, se este for em torno do eixo *X* (*roll* de *X*), *pitch*, se em torno do eixo *Y* (*pitch* de *X*), e *yaw* quando for em torno do eixo *Z* (*yaw* de *Z*). Estes erros rotacionais, assim como os erros de retitude nos planos *XY* e *XZ*, representam graus de liberdade adicionais em direções diferentes às do movimento preferencial.

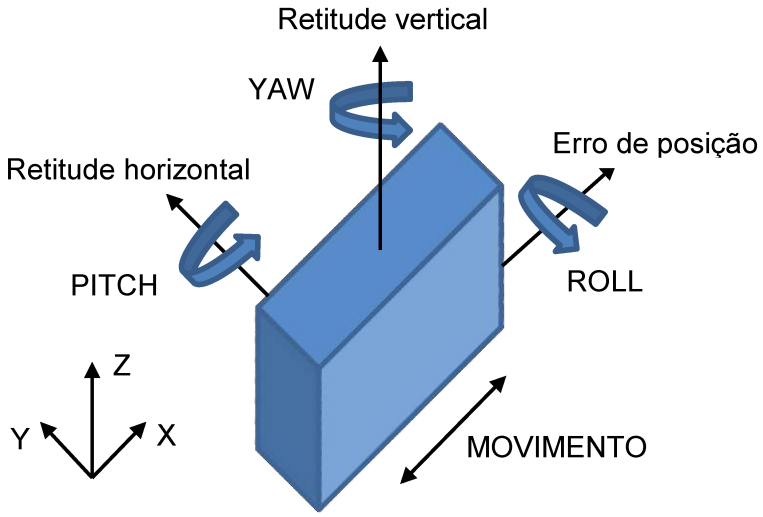


Figura 2.6 – Os seis erros geométricos para o eixo *X* de uma MMC (DI GIACOMO, 1986).

A partir da Fig. 2.6 tem-se que durante a translação de um dos carros ocorrem seis erros geométricos, sendo um erro de posição, dois erros de retitude e três erros de rotação, totalizando dezoito erros geométricos para aquelas máquinas com o número de eixos igual a três. Somam-se a estes outros três erros decorrentes da impossibilidade da montagem de três eixos perfeitamente ortogonais, gerando os erros de perpendicularidade entre os eixos da máquina, como apresentado na Fig. 2.7.

Tomando-se o eixo *X* como referência, $X = X_0$, define-se como erro de perpendicularidade entre X_0 e Y_0 o ângulo formado entre os eixos *Y* e Y_0 (θxy). O erro de perpendicularidade entre os eixos *X* e *Z* é dado pelo ângulo formado entre a projeção do eixo Z_0 no plano *XZ* e o eixo *Z* (θxz). Por fim, o erro de perpendicularidade entre os eixos *Y* e *Z* será o ângulo formado entre a projeção do eixo Z_0 no plano *YZ* e o eixo Z (θyz).

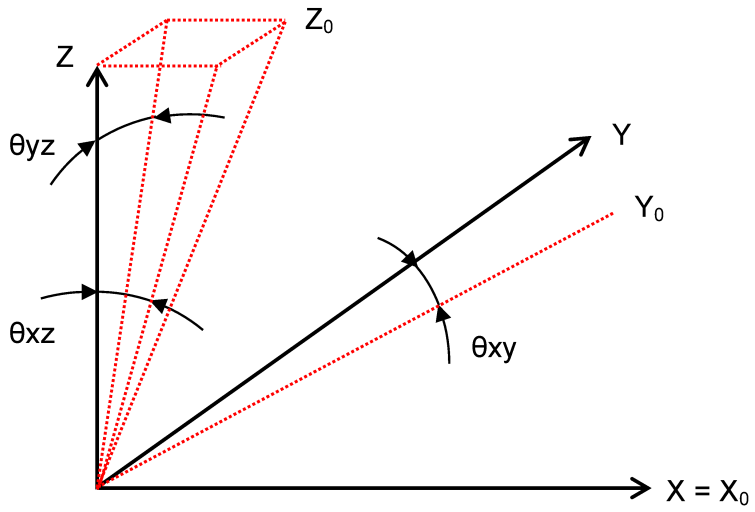


Figura 2.7 – Erros de perpendicularidade de uma MMC (DI GIACOMO, 1986).

Portanto, tem-se um total de 21 erros geométricos que influenciam o desempenho das MMCs. O resultado da combinação destes erros nas direções preferenciais *X*, *Y* e *Z* origina as componentes do erro volumétrico *Ex*, *Ey* e *Ez*, respectivamente. Conhecidas estas componentes, o erro volumétrico, denotado de *Ev*, pode ser calculado pela Eq. (2.24).

$$Ev = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \tag{2.24}$$

Com o objetivo de estimar a grandeza e o comportamento das componentes do erro volumétrico, para sua posterior compensação, diferentes ferramentas matemáticas são usadas para modelar os mesmos. Dentre elas destacam-se as transformações homogêneas (HOCKEN et al., 1977), a análise estatística (GUYE, 1978), a análise vetorial (ZHANG et al., 1985) e a análise geométrica (VALDÉS, 1999).

Phillips (2011) destaca que os erros angulares (*pitch*, *roll* e *yaw*) e os erros de perpendicularidade aumentam diretamente em magnitude e proporção em função do comprimento de medição. Logo, a orientação e posição do mensurando são importantes, uma vez que, se inadequadas, podem maximizar os efeitos destes erros geométricos.

2.3.2. Erros do sistema de apalpação

No que diz respeito aos erros relacionados ao sistema de apalpação, estes são provenientes das suas características elétricas, cinemáticas e dinâmicas (ESTLER et al., 1996).

Os sistemas de apalpação dividem-se basicamente em dois tipos: por contato e sem contato. No tipo por contato, normalmente a ponta de medição é acoplada a um apalpador, que por sua vez é acoplado a um cabeçote indexador (Fig. 2.8). Dependendo do modelo da MMC, a apalpação pode ser efetuada no modo ponto a ponto e/ou no modo varredura (*scanning*).

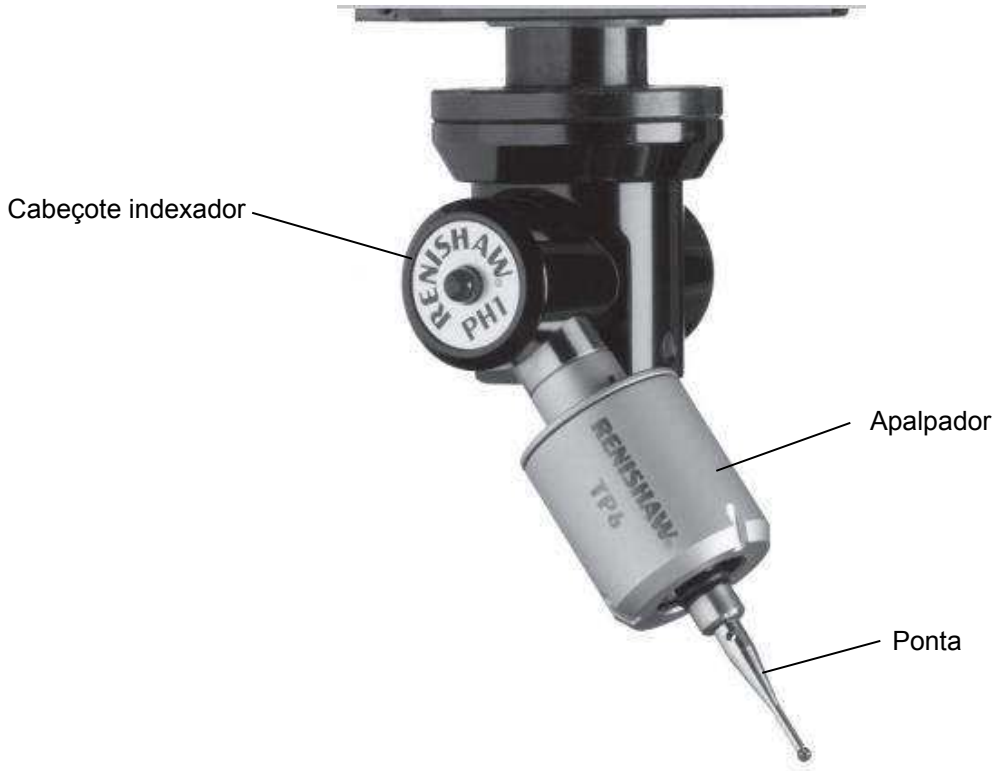


Figura 2.8 – Sistema de apalpação por contato (RENISHAW, 2016).

O princípio de funcionamento dos apalpadores por contato da Renishaw, empresa líder de mercado em sensores para MMC, consiste em uma placa articulada, que é pressionada contra três pontos de apoio através de uma mola de compressão helicoidal (Fig. 2.9). Os pontos de apoio funcionam como contatos elétricos, de modo que quando a placa articulada é deflexionada, o circuito elétrico altere as suas características e faça com que a interface do apalpador envie um sinal para o controle da MMC. Após este sinal, a esfera de apalpação deve ser retirada do contato com a superfície, de modo que a mesma retorne à posição inicial (RENISHAW, 2016).

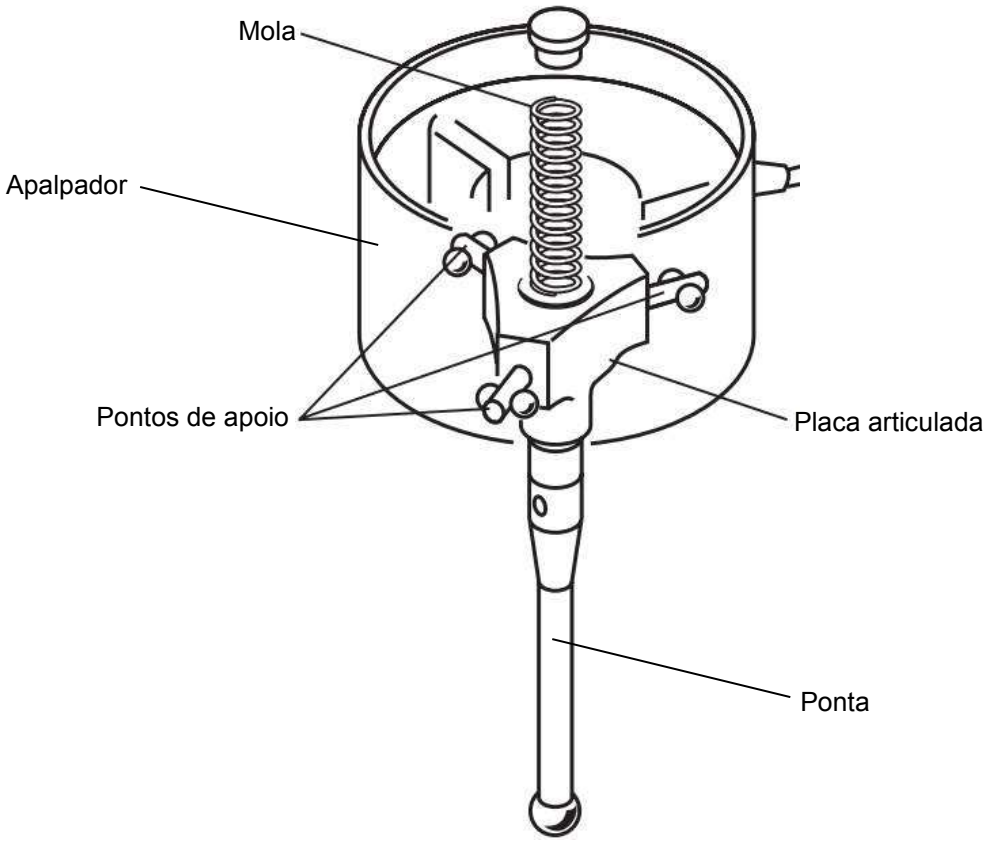


Figura 2.9 – Princípio de funcionamento de um sistema de apalpação por contato (RENISHAW, 2016).

Durante a medição, a haste do sensor sofre uma flexão significativa, devido à força de apalpação mínima para acionamento da mola. Desta forma, a deflexão da haste do apalpador, no momento do contato com a peça, é uma fonte de erro e pode depender de parâmetros como velocidade de apalpação, distância de posicionamento em relação à peça, bem como da magnitude da força de contato (PIRATELLI-FILHO, 1997; ESTLER et al., 1997; MIGUEL; KING; ABACKERLI, 2003).

Quanto à velocidade de apalpação, tem-se que altas velocidades fazem com que o apalpador sofra uma menor flexão antes de ser acionada a mola, diminuindo a parcela sistemática do erro. Por outro lado, a parcela aleatória (repetibilidade do sistema de apalpação) aumenta consideravelmente com a velocidade. Existem valores recomendados pelos fabricantes de MMCs para estes parâmetros (PHILLIPS, 2011).

O modo de medição por *scanning* consiste no deslizamento do sensor ao longo de uma trajetória definida, sem afastá-lo da superfície da peça. Durante todo o percurso, as coordenadas de um número significativo de pontos são obtidas continuamente. No entanto, a medição por *scanning* é influenciada pelo comportamento dinâmico do sistema de apalpação e também pelo comportamento tribológico do conjunto sensor-peça. Quando se

realiza medição por *scanning* é conveniente evitar hastes longas, para minimizar a vibração mecânica e a flexão da haste. O uso de baixas velocidades de deslocamento também é recomendado para minimizar os efeitos dinâmicos (MAY, 2007).

Quanto ao comportamento tribológico, deve-se considerar o desgaste da ponta devido ao atrito com a superfície da peça. O material mais comumente utilizado nas pontas de medição é o rubi (óxido de alumínio), o qual apresenta uma forte afinidade química com o alumínio, podendo danificar o sensor. Para a medição de peças de alumínio, são recomendadas pontas de medição de nitreto de silício ou carboneto de tungstênio. No caso de peças de ferro fundido, pode ocorrer desgaste excessivo por abrasão das pontas de medição de rubi, sendo aconselhável o óxido de zircônio (ARENHART, 2010).

2.3.3. Erros do software

Os principais erros provenientes dos *softwares* são devidos à implementação incorreta dos algoritmos de ajuste, responsáveis por fornecerem a geometria substituta.

Esta problemática tem sido alvo de diversas pesquisas ao longo dos anos. Diferentes algoritmos têm sido desenvolvidos com o objetivo de implementar os métodos de ajuste na determinação destas geometrias (MURTHY, 1986; CHOU, WOO, POLLOCK, 1994; SAMUEL, SHUNMUGAM, 2000; HUANG, 2001; ZHU, DING, XIONG, 2003; SHAKARJI, CLEMENT, 2004; WEN, XIA, ZHAO, 2006; GOCH, LÜBKE, 2008; XIUMING, ZHAOYAO, 2009; GADELMAWLA, 2010; SUI, ZHANG, 2012; FENG et al., 2013; ZHANG et al., 2013). Por sua vez, os fabricantes também desenvolvem algoritmos para determinação das geometrias substitutas e os implementam em seus *softwares*.

Embora já reconhecido por diversos estudiosos que o *software* da MMC pode ser uma fonte crítica de erros, a maioria dos usuários aceita sem questionamentos os resumos gráficos e estatísticos fornecidos por este, mesmo não possuindo certificados de validação dos algoritmos implementados (SHAKARJI; CLEMENT, 2004). Phillips (2011) destaca que se estes algoritmos não forem implementados corretamente, podem gerar erros de ajuste e numéricos capazes de invalidar o resultado das medições. Para Weckenmann et al. (1995) e Flack (2001), a simples diferença de utilizar um ou outro algoritmo pode resultar em um erro da mesma ordem de grandeza que o erro de medição da própria MMC.

Outro ponto importante a ser destacado é que ainda não existem especificações internacionalmente aceitas para estabelecer a integridade dos algoritmos implementados nos *softwares* (PHILLIPS, 2011).

Neste sentido, para avaliar o comportamento dos valores fornecidos pelo *software*, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST) desenvolveu um *software*, o *NIST Testing Algorithm* (ATS), que tem por objetivo auxiliar na avaliação do desempenho do método de mínimos quadrados durante o ajuste de diferentes formas geométricas. O *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), instituto nacional de metrologia da Alemanha, desenvolveu *softwares* de referência para a criação de elementos geométricos substitutos, permitindo a comparação dos resultados de diferentes fabricantes em relação aos valores padronizados. Estas instituições fornecem certificados de validação dos algoritmos, informando os máximos erros obtidos em relação aos seus algoritmos de referência.

Ainda, o *National Physical Laboratory* (NPL), instituto nacional de metrologia do Reino Unido, através do projeto *Software Support for Metrology*, desenvolveu algoritmos para criação de dados de referência, que permitem testar diferentes funcionalidades de *softwares* metrológicos, sem precisar de um *software* para medição padrão.

Shakarji e Clement (2004) avaliaram o desempenho do método de mínimos quadrados, mínima zona, mínimo circunscrito e máximo inscrito, e observaram que os resultados obtidos eram significativamente diferentes quando comparados com aqueles fornecidos por outros algoritmos usados no meio industrial.

2.3.4. Erros termicamente induzidos

As MMCs são sensíveis às mudanças das condições ambientais e, como consequência, os valores dos erros individuais não permanecem fixos. De acordo com a NBR NM-ISO 1 (ABNT, 1997) as medições de comprimento devem ser efetuadas a temperatura ambiente de 20 °C, definida internacionalmente como a temperatura padrão ou de referência. Quando esta temperatura é alterada acontecem variações nos comprimentos das escalas de medição, na peça a ser medida e na estrutura da máquina de medir em sentido geral, devido ao fenômeno de dilatação e ao efeito dos gradientes térmicos. Valdés (2003) destaca que a distribuição não uniforme da temperatura altera os valores dos erros geométricos.

As principais fontes de erros térmicos na medição com MMCs podem ser resumidas como (BRYAN; DOIRON, 2011):

- temperatura ambiente, que pode variar em função da presença de fontes de luz, da temperatura externa e da proximidade do calor gerado por outras máquinas;
- sistemas de condicionamento de ar;

- calor do corpo humano, uma vez que o calor das pessoas próximas à MMC, e a manipulação desta e das peças sem o devido isolamento térmico, provocam variações de temperatura na peça e na máquina;
- calor gerado pela própria MMC, devido ao atrito nas guias e mancais e também a motores e sistemas eletrônicos encarregados de produzir os movimentos dos carros (para máquinas automáticas);
- memória térmica, isto é, quando ocorre uma mudança no ambiente, cada elemento de um sistema de medição necessita de um período de tempo para "esquecer" as condições ambientais anteriores, durante as quais podem ter modificado temporariamente suas respectivas geometrias.

Outro fator importante que deve ser considerado é que os componentes da máquina podem ser fabricados de materiais distintos e, portanto, terem diferentes coeficientes de expansão térmica. Assim, quando a máquina e a peça são submetidas à temperatura diferente de 20 ºC se expandem desigualmente, originando os denominados erros de expansão diferencial. Embora esses erros possam ser corrigidos, Bryan (1990) destaca que estas correções não são exatas. Isto porque os coeficientes de expansão térmica utilizados nos cálculos são, geralmente, valores tabelados que não correspondem exatamente aos coeficientes de expansão térmica reais dos materiais utilizados na fabricação das escalas e da peça, e também devido à presença de erros nos sistemas de medição da temperatura.

No entanto, o desenvolvimento de novos materiais com baixos coeficientes de dilatação tem contribuído para minimizar os efeitos térmicos em MMCs. O uso de sensores de temperatura, distribuídos nas escalas, na estrutura da máquina e também na peça, permite obter informações sobre as variações da temperatura em tempo real, possibilitando a utilização de modelos matemáticos cada vez mais complexos e efetivos. Estas soluções de engenharia tem ampliado consideravelmente a robustez das máquinas quando instaladas diretamente no chão de fábrica (PIEKAR, 2006).

Assim, o uso de sistemas eficientes de controle de temperatura, como também de materiais suficientemente homogêneos quanto a suas propriedades de expansão térmica, minimizam ou permitem controlar de certa forma os efeitos dos gradientes de temperatura (BRYAN; DOIRON, 2011).

2.3.5. Erros dinâmicos

Na medição com MMCs estão presentes efeitos dinâmicos, que originam os denominados erros dinâmicos. Estes efeitos podem ser inerentes à movimentação dos eixos, guias e mancais, ou provenientes de fontes externas. No primeiro caso, os erros

dinâmicos surgem devido à ação da velocidade e da aceleração durante o movimento das partes móveis da estrutura da máquina no decorrer das medições, e principalmente das características elétricas, cinemáticas e mecânicas do sistema de apalpação (JINWEN; YANLING, 2011).

Segundo Jinwen e Yaling (2011), o uso intensivo de MMCs na indústria e laboratórios de medição exige a redução do tempo de medição. Em máquinas com sistema de apalpação no modo *scanning*, por exemplo, a velocidade e aceleração da sonda podem alcançar até 700 mm/s e 2000 mm/s^2, respectivamente. Porém, os autores ressaltam que os altos valores destes parâmetros influenciam significativamente na qualidade da medição, sendo que a melhoria da eficiência resulta muitas vezes em detrimento da exatidão e precisão do resultado obtido.

No que diz respeito às fontes externas de vibração, entre as mais comuns encontram-se aquelas causadas pela presença de máquinas-ferramenta, compressores de ar, equipamentos de ventilação, rodovias e ferrovias, ruídos acústicos nas proximidades da MMC (PEREIRA; NI, 2011). Neste sentido, para minimizar o efeito deste tipo de vibração, deve-se isolar a MMC, apoiando-a em suportes com isolamento externo. Porém, mesmo assim é impossível obter uma fundação totalmente isenta da influência das vibrações, fazendo-se necessário garantir que o resíduo ainda presente das vibrações atenda os limites estabelecidos pelos fabricantes de MMCs (ORREGO; DI GIACOMO; ABACKERLI, 2000).

2.3.6. Erros derivados da peça

Concernente à peça a ser medida, são normalmente considerados fatores de influência as propriedades termomecânicas do material (coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade), a massa, a dimensão, o acabamento superficial e, ainda, os desvios de forma.

As peças de baixa dureza, por exemplo, podem sofrer deformações elásticas ou permanentes ao entrarem em contato com a esfera da sonda de medição, modificando as coordenadas dos pontos apalpados. Ainda, o material da peça pode apresentar afinidade química com o material do sensor, podendo levar ao desprendimento do material da peça e este, por sua vez, ficar aderido na ponta (MAY, 2007).

Outro ponto importante é que, devido ao fato da peça sujeita a medição estar posicionada sobre o desempeno, é preciso procurar uma distribuição adequada da sua massa, evitando concentração de tensões e deformações da estrutura da máquina.

As irregularidades microgeométricas da superfície da peça a ser medida também afetam os resultados das medições. A influência da rugosidade das peças pode ser diminuída pela escolha adequada do diâmetro da ponta de medição (RENISHAW, 2016).

Quanto aos desvios de forma macrogeométricos da peça, estratégias de amostragem inadequadas podem resultar em erros de medição significativos. A falta de informações sobre o processo de fabricação e os desvios de forma da peça favorecem a geração de estratégias de medição inadequadas (MAY, 2007). Phillips (2011) destaca ainda que quando os desvios de forma apresentam magnitude comparável à repetibilidade do processo de medição, diferentes estratégias de medição levam a resultados significativamente distintos.

May (2007) propôs um método, apoiado em simulação computacional, que permite ao metrologista obter uma estimativa confiável da parcela de incerteza de medição concernente à interação entre a peça e a estratégia de medição.

Por fim, outras falhas na superfície da peça, tais como rebarbas, riscos, partículas impregnadas, também contribuem para gerar erros de medição.

2.3.7. Erros derivados da estratégia de medição

A estratégia de medição é definida em função de três decisões principais por parte do operador: número de pontos apalpados, distribuição dos pontos na superfície da peça e escolha do método de ajuste.

Segundo Phillips (2011), o número e a distribuição dos pontos apalpados na superfície da peça têm influência direta na determinação da geometria substituta. Isto pode ser justificado porque esses dois fatores estão interligados, diretamente, com a efetividade das aproximações feitas pelos métodos de ajuste escolhidos para definir as geometrias. Para Weckenmann, Heinrichowski e Mordhorst (1991), o efeito da seleção de uma estratégia de medição pode ter grande contribuição na incerteza de medição.

Uma vez que a maioria das estratégias de medição emprega um número relativamente pequeno de pontos para determinar a geometria substituta, deve-se considerar que este resultado é baseado em informações incompletas da geometria real da peça. A Fig. 2.10 apresenta o resultado de duas medições de uma característica circular com desvio de forma de três lóbulos, usando o mesmo número de pontos apalpados, porém em diferentes posições.

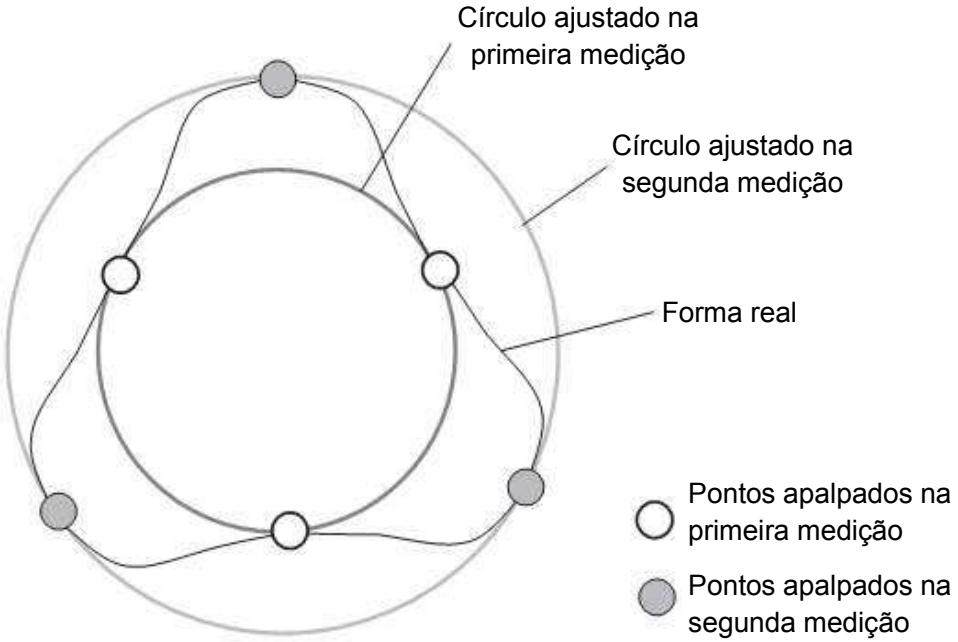


Figura 2.10 – Diferentes geometrias substitutas obtidas na medição de um círculo de três lóbulos, apalpando três pontos em diferentes posições (PHILLIPS, 2011).

Pode-se observar na Fig. 2.10, que as estratégias de medição resultam em círculos ajustados com diâmetros diferentes. A variação no resultado é consequência das informações incompletas do mensurando sendo fornecidas para o algoritmo de ajuste, devido ao número finito de pontos apalpados (PHILLIPS, 2011).

Quanto à distribuição dos pontos na superfície da peça, relacionada à sensibilidade do algoritmo para determinar a geometria substituta, algumas estratégias de medição podem aumentar o erro introduzido em cada ponto de medição, ao passo que outras estratégias podem reduzi-lo, como exemplificado na Fig. 2.11. Nesta figura, a estratégia de medição 2 fornece uma geometria substituta com erro de medição maior que a estratégia de medição 1.

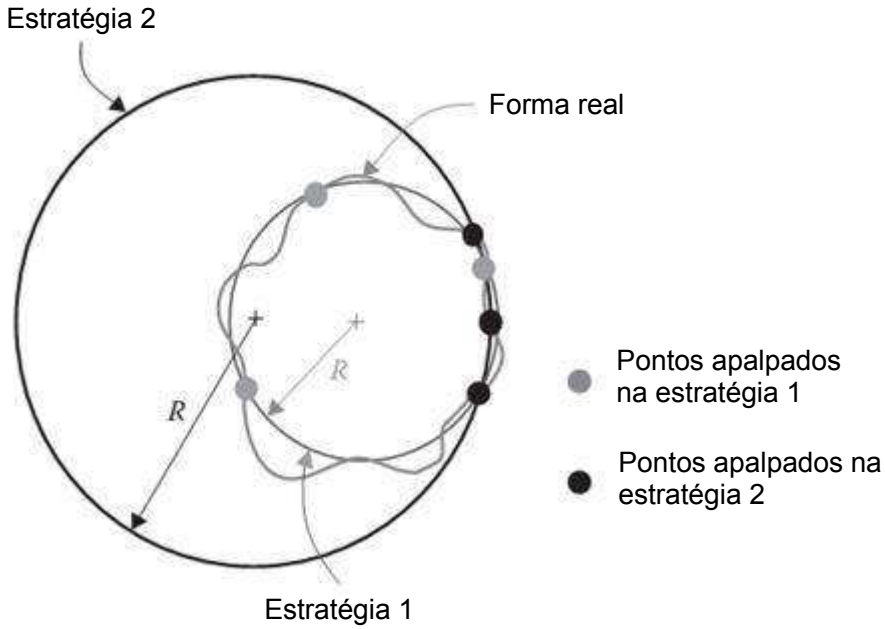


Figura 2.11 – Geometrias substitutas apalpando três pontos, distribuídos de maneiras diferentes (PHILLIPS, 2011).

De acordo com Hocken, Raja e Uppliappan (1993), na maioria das vezes os erros causados pelo número inadequado de pontos apalpados são menores quando se utilizam 50 ou mais pontos para definir a geometria substituta. No entanto, no cenário atual do processo de inspeção, é necessário que as peças sejam medidas o mais rápido possível. Assim, surge a necessidade de otimizar a estratégia de medição, com a finalidade de minimizar os erros a ela associados e o volume de dados a serem coletados e analisados, bem como o tempo e os custos envolvidos.

Ao longo dos anos, diferentes autores realizaram estudos na tentativa de resolver esse problema. Para tanto, diversas metodologias foram utilizadas, destacando-se o uso da simulação computacional (HOCKEN et al., 1993; WECKENMAN et al., 1995; RAGHUNANDAN; RAO, 2008; RAJAMOHAN; SHUNMUGAM; SAMUEL, 2011).

Wecknmann et al. (1995) utilizaram a simulação computacional para determinar o número de pontos necessários na avaliação do diâmetro de um furo com desvio de forma de três lóbulos. Os resultados mostraram que o aumento do número de pontos resulta na convergência dos diâmetros obtidos para cada algoritmo de ajuste utilizado. Do mesmo modo, a repetibilidade dos resultados aumenta.

Chan, King e Stout (1996) investigaram a influência da estratégia na medição de seções circulares com MMC, com o objetivo de determinar a relação entre o número de pontos medidos e os resultados fornecidos pelo *software*. Os autores concluíram que o

efeito da estratégia de medição no resultado depende do tipo de ajuste utilizado na determinação da geometria substituta.

2.3.8. Erros derivados do operador

É importante salientar que a estratégia a ser adotada para medir uma peça é determinada tomando como base o conhecimento e a experiência do operador da MMC e, por isto, este desempenha papel fundamental na redução das fontes de incerteza. Cabe a ele executar as seguintes tarefas no processo de medição (ARENHART, 2010):

- definição dos procedimentos de preparação, como limpeza, tempo de estabilização térmica e fixação da peça;
- escolha de parâmetros como diâmetro da ponta e comprimento da haste do apalpador, número e distribuição dos pontos;
- definição da estratégia de avaliação, como eliminação de *outliers* e escolha do método para ajuste da geometria substituta;
- validação do processo de medição, como análise estatística e avaliação da incerteza de medição.

Desta forma, é de extrema importância que o operador seja capacitado e qualificado, uma vez que este é também considerado uma fonte de erro na medição com MMC. Esta capacitação deve abranger não apenas os aspectos operacionais de manusear a máquina e seu *software,* mas também os aspectos metrológicos envolvidos, como: conhecimento do principio de funcionamento da MMC, das fontes de erros e de estratégias para minimizá-los; conhecimentos estatísticos e capacidade de avaliar a incerteza de medição dos resultados obtidos.

2.4. Especificações dimensionais e geométricas do produto

A especificação dimensional e geométrica é a etapa do projeto do produto em que se estabelece o campo das variações admissíveis (tolerâncias) de um conjunto de características de uma dada peça, que satifazem os requisitos necessários ao desempenho funcional desta (ALMACINHA, 2006).

A especificação dimensional e geométrica interessa-se pela superfície da peça e insere-se em uma cadeia que vai desde a necessidade funcional até ao resultado da medição (Fig. 2.12).



Figura 2.12 – Cadeia de definições em que se insere a especificação dimensional e geométrica do produto (ALMACINHA, 2006).

Para especificar e expressar de forma adequada as características geométricas do produto, fez-se necessário o desenvolvimento de uma linguagem padronizada, que considerasse a simbologia para indicação gráfica e o seu significado no desenho técnico (SOUSA; WANDEK, 2008). Essa linguagem foi amplamente difundida no meio industrial como GD&T (*Geometrical Dimensioning and Tolerancing*), suportada pela ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), e GPS (*Geometric Product Specification*), suportada pela ISO (*International Organization for Standardization*) (ALBERTIN; SOARES JÚNIOR; SILVA, 2011).

As duas linguagens são usadas em conjunto com as normas de tolerância dimensional (ISO 286-1 (2010) e ISO 286-2 (2010); ABNT NBR 6158 (1995)) e geométrica (ISO 1101 (2012); ABNT NBR 6409 (1997)), o que permite ao projetista comunicar as características importantes da peça, de forma clara e sem ambiguidade para a fabricação e inspeção (FLACK; BEVAN, 2005).

É na etapa da inspeção, ou verificação, que o metrologista determina se a superfície real de uma peça está conforme o campo de variações admissíveis que foi especificado. A conformidade é então determinada através da comparação do resultado da medição da peça com a tolerância especificada no projeto.

Neste ponto, no ambiente da metrologia industrial, destaca-se a importância do metrologista na definição de estratégias de medição consistentes com as tolerâncias especificadas. Concernente à escolha dos métodos de ajuste, no controle dimensional e geométricos de peças, deve-se conhecer as particularidades e limitações dos métodos de ajuste utilizados nos *softwares*, uma vez que estes podem produzir resultados consideravelmente distintos.

2.5. Incerteza de medição

O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda tão somente uma estimativa do valor do mensurando, por causa da incerteza

proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

A incerteza associada ao resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando (BIPM et al., 2008a). É definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas (INMETRO, 2012).

Desta forma, ressalta-se que a incerteza está relacionada ao resultado da medição, e não ao valor verdadeiro da grandeza, o qual na prática não é conhecido. Ainda, a incerteza não é intrínseca ao sistema de medição e sim aos valores indicados por ele. Por fim, quando comparada com o erro de medição, a incerteza caracteriza uma faixa de valores ou um intervalo, e não um valor pontual (Fig. 2.13).

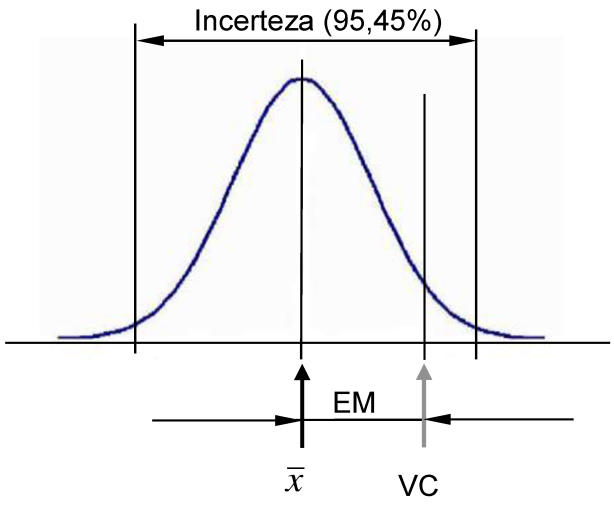


Figura 2.13 – Ilustração da diferença entre erro e incerteza de medição (PHILLIPS, 2011).

Nesse sentido, a incerteza não deve ser confundida com o erro de medição (*EM*) o qual é expresso como a diferença entre o resultado de uma medição (média de um conjunto de indicações) e o valor verdadeiro do mensurando.

Na prática não é possível determinar o valor verdadeiro de uma grandeza, então, utiliza-se um valor convencional (*VC*).

O erro de medição (*EM*), considerando um conjunto de (*n*) observações, pode ser determinado pela Eq. (2.25).

$$EM = \bar{x} - VC \tag{2.25}$$

Onde: $\bar{x}$ - valor médio das (*n*) observações; *VC* - valor convencional.

Segundo a Eq. (2.25) o erro de medição é um valor pontual e pode ser positivo ou negativo, indistintamente. Usualmente pode ser corrigido, aplicando um fator de correção adequado, cujo valor corresponde à estimativa do erro sistemático (tendência) com o sinal trocado. Entretanto, após a correção ainda permanece uma dúvida que, somada àquela proveniente dos efeitos aleatórios, convencionou-se chamar de incerteza de medição. Assim sendo, a incerteza mede o grau de desconhecimento sobre o mensurando em questão.

Sem a indicação da incerteza os resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência declarados em especificações do fabricante, catálogos ou normas técnicas (BIPM et al., 2008a).

Para a avaliação da incerteza de medição, o documento *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, publicado pela ISO em 1993, surgiu com o objetivo de padronizar os procedimentos de avaliação e de expressão da incerteza de medição. Este guia apresenta critérios e regras gerais para expressar e combinar as incertezas individuais que afetam o processo de inspeção e, assim, determinar a incerteza de medição. A versão mais recente deste documento (ISO/TAG 4/WG 3) data de 2008 (BIPM et al., 2008a), a qual foi traduzida e publicada pelo INMETRO em 2012 sob o titulo “Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008”.

De forma geral, o método proposto pela ISO/TAG 4/WG 3 (BIPM et al., 2008a) pode ser dividido nas seguintes etapas:

1. definição do mensurando ou variável de saída;
2. identificação das variáveis que podem afetar o resultado da medição (variáveis de entrada ou grandezas de influência);
3. expressão do mensurando (variável de saída) em função de todas as variáveis de influência, através de um modelo matemático;
4. avaliação da incerteza-padrão associada às variáveis de entrada;
5. avaliação da incerteza-padrão combinada associada à variável de saída;
6. avaliação da incerteza expandida associada à variável de saída;
7. expressão do resultado de medição.

2.5.1. Definição do mensurando e identificação das grandezas de influência

Toda medição tem como objetivo a determinação do valor do mensurando. Desta forma, o mensurando deve ser definido de forma completa, o que significa que para um nível de exatidão determinado, seu valor é único. Além da clara definição do mensurando, resulta necessário especificar o método de medição e o procedimento de medição a ser adotado.

Na identificação das grandezas de influência, deve-se realizar uma análise crítica a fim de identificar todas as componentes de incerteza. Tais componentes podem estar

relacionadas às condições ambientais, ao operador, aos equipamentos e padrões utilizados, ao método de medição, dentre outros fatores.

A quantidade e o tipo de componentes variam de acordo com o sistema de medição, com o tipo de mensurando analisado e com o nível de exatidão requerido. Assim sendo, o operador deve conhecer o princípio de funcionamento do sistema de medição utilizado, as principais fontes de erros na medição em curso, bem como o procedimento de medição. Ainda, deve ser efetuada a interpretação do certificado de calibração e retirar do mesmo as informações mais relevantes para o cálculo da incerteza. Outros documentos, tais como manuais e especificações de fabricantes, também devem ser consultados e analisados.

2.5.2. Obtenção do modelo matemático

Identificadas as variáveis de influência, um modelo matemático, descrevendo o processo de medição, deve ser proposto, pois ele é a base para a aplicação da lei de propagação de incertezas (BIPM et al., 2008a). Este modelo relaciona todas as variáveis de influência (variáveis de entrada) do processo de medição com o mensurando (variável de saída). Essa função é dada pela Eq. (2.26).

$$Y = f(X_1, X_2, ...,X_N) \tag{2.26}$$

Onde: Y - variável de saída; X_i - variáveis de entrada.

A partir da Eq. (2.26) pode-se obter também uma estimativa do mensurando Y, designada como y, tendo como base um conjunto de estimativas de entrada x_1, x_2,..., x_N para os valores das N grandezas X_1, X_2, ..., X_N. Assim, a expressão resultante é dada pela Eq. (2.27):

$$y = f(x_1, x_2,...,x_N) \tag{2.27}$$

2.5.3. Avaliação da incerteza-padrão de cada grandeza de influência

A incerteza-padrão (u) de cada grandeza de influência é obtida através da análise individual de cada uma delas.

Dependendo da quantidade de informação disponível sobre estas grandezas e da forma como ela é apresentada, as componentes da incerteza são classificadas em dois tipos, a saber: avaliação do Tipo A e avaliação do Tipo B (BIPM et al., 2008a).

2.5.3.1. Avaliação do Tipo A da incerteza-padrão

Segundo o ISO/TAG 4/WG 3 (BIPM et al., 2008a) a avaliação do Tipo A da incerteza-padrão é aquela obtida de uma análise estatística de uma série de observações de um mensurando, assumindo uma distribuição normal (Fig. 2.14) ou outra qualquer.

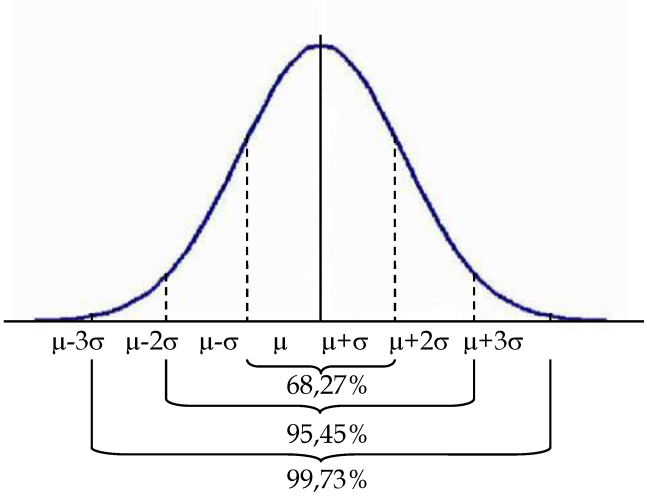


Figura 2.14 – Distribuição normal.

Uma componente de incerteza obtida por uma avaliação do Tipo A é caracterizada por um desvio-padrão que considera as flutuações aleatórias, além das influências consideradas constantes dos resultados de um dado experimento.

A melhor estimativa do valor do mensurando é aquela obtida através da média aritmética de (*n)* observações repetidas do mesmo mesurando (BIPM et al., 2008a). O desvio-padrão experimental da média é, neste caso, uma medida da incerteza associada ao valor da média. Para medições efetuadas em condições de repetibilidade, o desvio padrão experimental indica a repetibilidade da medição e pode ser calculado pela Eq. (2.28).

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \tag{2.28}$$

Onde: *u(x)* - incerteza-padrão da variável *x*; *s* - desvio-padrão experimental; *n* - número de elementos da amostra.

Em diversas situações, o resultado da medição é obtido por meio de uma única medição, pois a repetição pode não ser técnica ou economicamente viável. Dessa forma, não haverá como calcular o “desvio-padrão da média de medições repetidas”, pois a medição não é repetida. Essa importante componente de incerteza, contudo, indica os

efeitos aleatórios de repetibilidade da medição e necessita ser considerada de outra forma. Uma alternativa, nestes casos, é estimar a componente de repetibilidade através de um estudo realizado previamente à medição.

2.5.3.2. Avaliação do Tipo B da incerteza-padrão

A avaliação do Tipo B da incerteza-padrão de uma componente de incerteza é obtida por outros meios, que não a análise estatística de uma série de observações repetidas, tais como considerações de manuais, especificações de fabricantes, certificados de calibração ou a partir de experiências anteriores. Dependendo da quantidade de informação disponível e da forma como ela é apresentada, podem-se adotar diferentes distribuições de probabilidade para efetuar os cálculos. As mais utilizadas são a distribuição retangular, a distribuição triangular, a distribuição normal e a *t-student*.

Distribuição retangular

A distribuição retangular (Fig. 2.15) é utilizada quando é possível estimar apenas os limites superior e inferior para a variável X_i, e estabelecer que a probabilidade de que o valor X_i pertença ao intervalo (a-, a+) é 1 (um) e a probabilidade para que o valor X_i esteja fora desse intervalo é 0 (zero). Se não houver conhecimento específico de possíveis valores de X_i dentro do intervalo, pode-se assumir que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer ponto do intervalo. Como neste intervalo podem ser encontrados infinitos valores de X_i, consequentemente, o seu grau de liberdade é infinito.

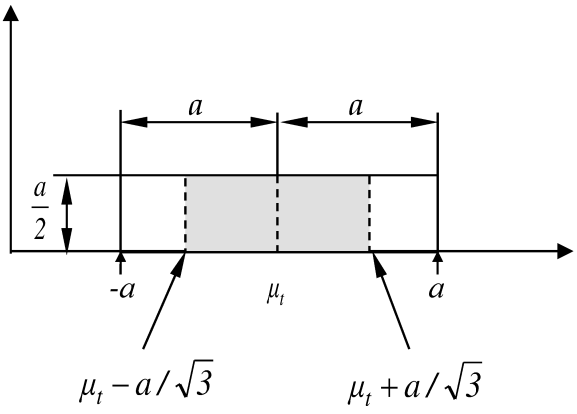


Figura 2.15 – Distribuição retangular (BIPM et al., 2008a). Modificada.

Na Figura 2.15, observa-se que a distribuição de probabilidade retangular, com largura ±a possui probabilidade de abrangência de 100%, pois abrange o intervalo com todos os possíveis valores da variável em questão. Esse intervalo é denominado de intervalo de abrangência.

Para transformar essa componente de incerteza ±*a* em uma incerteza-padrão com abrangência de 68,27%, deve-se utilizar a Eq. (2.29).

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{2.29}$$

Distribuição triangular

Em muitas situações existe mais informação disponível sobre a distribuição dos valores possíveis da grandeza, sendo adequado esperar que valores perto do ponto médio sejam mais prováveis. Nestes casos, a distribuição retangular simétrica deve ser substituída por uma distribuição trapezoidal simétrica ou por uma distribuição triangular simétrica (Fig. 2.16), com infinitos graus de liberdade.

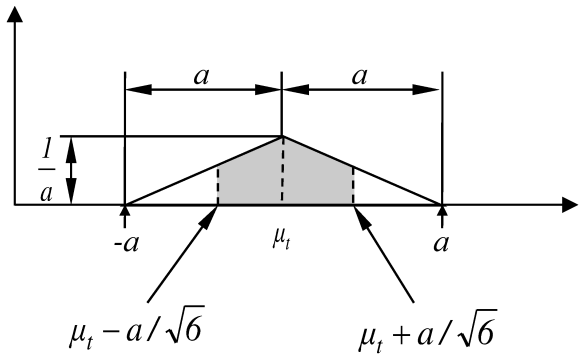


Figura 2.16 – Distribuição triangular (BIPM et al., 2008a). Modificada.

A incerteza-padrão associada a uma grandeza com distribuição triangular é expressa pela Eq. (2.30).

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \tag{2.30}$$

Observe na Fig. 2.16 que para transformar essa componente de incerteza ±*a* em uma incerteza-padrão com abrangência de 68,27%, o parâmetro *a* foi dividido por raiz de 6 (seis).

Distribuição normal ou t-Student

Quando a incerteza de uma fonte de entrada x_i provém de um certificado de calibração a estimativa da incerteza-padrão pode ser efetuada por meio de uma avaliação do Tipo B.

No certificado de calibração são declaradas outras informações como a probabilidade de abrangência e o fator de abrangência *k*. Desta forma, a incerteza-padrão pode ser determinada pela Eq. (2.31).

$$u(x_i) = \frac{U(Cal)}{k} \tag{2.31}$$

Onde: *U(Cal)* - incerteza expandida declarada no certificado de calibração; *k* - fator de abrangência declarado no certificado de calibração da respectiva fonte de entrada.

A adoção de uma distribuição normal ou *t-Student* depende do número de leituras *n* efetuadas durante a medição. Para $n > 30$ utiliza-se a distribuição normal, caso contrário adota-se a distribuição *t-Student*. Neste caso, são considerados os graus de liberdade efetivos declarados no certificado, ou aqueles correspondentes ao valor de *k* especificado.

2.5.4. Avaliação da incerteza-padrão combinada

A incerteza-padrão combinada da variável de saída é obtida aplicando a lei de propagação de incertezas, apresentada na Eq. (2.32).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j}u(x_i)\cdot u(x_j)\cdot r(x_i, x_j) \tag{2.32}$$

Onde: $u_c(y)$ - incerteza-padrão combinada da variável de saída; $r(x_i, x_j)$ - coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j.

No primeiro termo da Eq. (2.32), $u(x_i)$ é a incerteza-padrão de cada grandeza de entrada x_i, e as derivadas parciais da função em relação à cada variável de entrada são os coeficientes de sensibilidade, cuja magnitude representa a contribuição de cada fonte de incerteza no valor da incerteza total.

O segundo termo da Eq. (2.32) só irá existir quando houver uma correlação entre as grandezas de entrada x_i e x_j, ou seja, quando $r(x_i, x_j) \neq 0$. Caso contrário, o segundo termo desaparece, obtendo-se a Eq. (2.33).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \tag{2.33}$$

A correlação existe quando duas grandezas de entrada, x_i e x_j, indicam uma relação de dependência entre elas ou com uma terceira grandeza de entrada comum a ambas. Tal relação pode estar presente quando, por exemplo, as duas grandezas de entrada são medidas com um mesmo equipamento. Nesse caso, pode-se dizer que a correlação será forte.

O coeficiente de correlação $r(x_i, x_j)$ mede o grau de correlação linear entre duas variáveis. Ele pode variar desde –1 até 1. No caso de duas grandezas de entrada medidas com um mesmo sistema de medição, pode-se dizer, para efeitos práticos, que $r(xi, xj)$ é igual a 1.

Para determinar se duas variáveis estão correlacionadas podem ser utilizadas diferentes ferramentas, dentre elas a construção de um diagrama de dispersão e o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson.

Estimadas as incertezas-padrão das fontes de entrada, $u(x_i)$, é necessário calcular os coeficientes de sensibilidade do mensurando em relação a cada fonte de entrada. O coeficiente de sensibilidade (C_i) do mensurando (y) em relação a cada fonte de entrada (x_i) é definido conforme Eq. (2.34):

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \tag{2.34}$$

Os coeficientes de sensibilidade descrevem como a estimativa de saída y varia com alterações nos valores das estimativas de entrada x_1, x_2, ..., x_N. Também atuam como fatores de conversão de unidades de medida, convertendo a incerteza-padrão de cada variável $u(x_i)$ para a mesma unidade de medida do mensurando Y. O produto da incerteza-padrão $u(x_i)$ e seu respectivo coeficiente de sensibilidade origina a chamada contribuição de incerteza $u_i(y)$, que corresponde a uma medida de dispersão equivalente a um desvio-padrão, com a mesma unidade de medida do mensurando.

Quando o modelo matemático da medição é o resultado da soma algébrica de um conjunto de variáveis, os coeficientes de sensibilidade serão todos iguais a um. Caso haja subtração, o sinal do coeficiente será negativo.

2.5.5. Avaliação da incerteza expandida

Ao aplicar o Teorema do Limite Central para determinação da incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ pode-se dizer que a distribuição de probabilidade resultante será, sempre, aproximadamente normal ou *t-Student*, para um dado número de graus de liberdade v_{ef}.

Para uma distribuição de probabilidade normal, o intervalo de ±1 desvio-padrão em torno da melhor estimativa do mensurando corresponde a uma probabilidade de abrangência de 68,27%. Para aumentar tal probabilidade de abrangência, deve-se multiplicar a incerteza-padrão combinada pelo fator de abrangência *k*, conforme mostra a Eq. (2.35). O resultado obtido é a chamada incerteza expandida *U(y)*.

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \tag{2.35}$$

2.5.5.1. Cálculo das componentes de incerteza

Com a estimativa das incertezas-padrão de todas as fontes de entrada do mensurando e os seus coeficientes de sensibilidade calculados, cada respectiva componente de incerteza na unidade do mensurando pode ser estimada pela Eq. (2.36).

$$u_{x_i}(y) = \frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) = c_i(x_i) \cdot u(x_i) \tag{2.36}$$

Onde: $u_{x_i}(y)$ - componente de incerteza do mensurado referente a cada fonte x_i; $c_i(x_i)$ - coeficiente de sensibilidade referente a cada fonte (x_i); $u(x_i)$ - incerteza referente a cada fonte (x_i).

De posse dos valores denominados de componentes de incerteza para cada variável de entrada, é possível avaliar de forma simples e objetiva o impacto da incerteza de cada fonte de entrada na incerteza combinada do mensurando. Esta análise é importante para definir a exatidão necessária de qualquer uma das fontes de entrada do mensurando em relação à tolerância do seu respectivo processo.

2.5.5.2. Cálculo dos graus de liberdade efetivos

Para uma amostra formada por *n* elementos, na estatística, o grau de liberdade é dado pelo número total de medições menos um (*n*-1). Na avaliação da incerteza, como existem componentes de incerteza que não necessariamente são avaliadas por meio de uma análise estatística, torna-se necessário um conceito mais genérico para o grau de liberdade. Pode-se dizer que o grau de liberdade na incerteza quantifica a credibilidade sobre cada componente de incerteza. Assim, um alto grau de credibilidade implica em um alto grau de liberdade.

O cálculo do grau de liberdade efetivo (v_{ef}) da incerteza-padrão combinada da variável de saída é baseado na equação de Welch-Satterwaite, conforme mostra a Eq. (2.37) (BIPM et al., 2008a).

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u^4(y_i)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{(u(x_i) \cdot c_i(x_i))^4}{v_i}} \tag{2.37}$$

Onde: $u_c(y)$ - incerteza-padrão combinada da variável de saída; $u(y_i)$ - incerteza-padrão de cada variável de entrada na unidade do mensurando ou variável de saída; v_i - número de graus de liberdade de cada variável de entrada; N - número de variáveis de entrada; $u(x_i)$ - incerteza-padrão de cada variável de entrada; $c_i(x_i)$ - representa o coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada x_i.

Cabe ressaltar que quando o número de graus de liberdade obtido por meio da Eq. (2.37) não for um número inteiro, o valor de v_{ef} deve ser interpolado ou truncado para o inteiro inferior mais próximo (BIPM et al., 2008a). Por exemplo, se o grau de liberdade efetivo resultante da Eq. (2.37) for igual a 3,45, então, $v_{ef} = 3$. Se o v_{ef} calculado for igual a 3,78, este deverá ser arredondado também para 3 ($v_{ef} = 3$).

2.5.5.3. Determinação do fator de abrangência

O fator de abrangência (k), presente na Eq. (2.35), é escolhido em função do nível de abrangência especificado para o intervalo, estando geralmente entre 2,00 (dois) e 3,00 (três) para uma distribuição normal de probabilidade, considerando 95,45% e 99,73%, respectivamente.

Quando uma componente de incerteza for estimada considerando uma avaliação do Tipo A, a partir de um número reduzido de leituras ($n < 30$), caracterizando uma amostra pequena, essa aproximação para o fator de abrangência não é conveniente. Neste caso, deve ser utilizado o Teorema do Limite Central junto com a tabela *t-Student*, com objetivo de fornecer um valor para k baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza-padrão combinada da medição. Dessa forma, o valor de k nem sempre será igual a dois e consequentemente os graus de liberdade nem sempre serão infinitos.

2.5.6. Apresentação do resultado de medição

O resultado da medição deve ser expresso em concordância com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2005). Desta forma, levando-se em conta a incerteza-padrão combinada, é dado por $(\overline{y} \pm u_c(y))$, e, em relação à incerteza expandida, é expresso por $(\overline{y} \pm U(y))$, em que $\bar{y}$ é a estimativa de *Y*, representado por seu valor médio.

O valor numérico da estimativa do mensurando ($\bar{y}$: média das *n* indicações) deve ser arredondado considerando o mesmo número de casas decimais da resolução do sistema de medição. Neste caso, as regras usuais de arredondamento devem ser utilizadas. Entretanto, ao relatar os resultados finais da avaliação da incerteza de medição $u_c(y)$ e $U(y)$, às vezes pode não ser apropriado utilizar tais regras de arredondamento. Neste sentido, o GUM (BIPM et al., 2008a) destaca que o bom senso deve prevalecer.

2.6. Delineamento de experimentos

Experimento é definido como um teste, ou um conjunto deles, em que há mudanças propositais em algumas características do processo, para observar e identificar as razões das mudanças observadas em uma variável de resposta. Mason, Gunst e Hess (2003) compreendem a variável de resposta como uma observação do experimento.

De acordo com Carpinetti (2006), em um experimento, variações propositais são feitas nas variáveis de entrada ou de controle (chamados de níveis dos fatores de controle ou tratamento) de um processo ou sistema, com o objetivo de observar e identificar as razões de variação de resposta ou variável de saída.

Em um delineamento de experimentos existem duas etapas fundamentais: o planejamento do experimento; e a análise dos dados. É na etapa do planejamento de experimento que se define como o experimento será organizado e conduzido, a definição das variáveis dependentes e independentes, o número de testes, as condições para realização dos testes, etc. Diversas são as técnicas empregadas, tais como experimento fatorial, experimentos aleatorizados, variável bloco, quadrado latino, etc. (CARPINETTI, 2006).

O planejamento experimental é uma ferramenta importante na busca da otimização dos processos experimentais. Este planejamento é um método estatístico ativo, pois, realizam-se diversos ajustes no processo e nas variáveis de entrada, observando-se as mudanças correspondentes na variável de saída. O sucesso de um planejamento experimental é fortemente correlacionado com sua estruturação e com sua execução.

Entender claramente quais são os objetivos de realizar um experimento é necessário antes de qualquer ação para executá-lo (MONTGOMERY, 2004)

Segundo Montgomery (2004), as técnicas de planejamento experimental são utilizadas a fim da melhoria das características de qualidade dos produtos e processos, para reduzir a quantidade de testes e para otimizar o uso dos recursos materiais e pessoais. Para Carpinetti (2006), o uso de técnicas de planejamento de experimentos permite o levantamento de informações como:

- quais variáveis (fatores) do processo são mais influentes nos parâmetros de resposta de interesse;
- os níveis das variáveis do processo influentes na resposta, de modo que a variabilidade do parâmetro de resposta de interesse seja mínimo;
- os níveis das variáveis influentes na resposta, de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

Uma vez realizado o planejamento experimental, a etapa seguinte é a análise de dados, em que técnicas estatísticas são utilizadas para se concluir sobre a existência ou não de diferentes significativas no valor da variável de resposta para as diferentes condições de teste (CARPINETTI, 2006).

Dentre estas técnicas destaca-se a Análise de Variância (ANOVA), que testa a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais. A ANOVA testa a importância de um ou mais fatores, comparando as médias das variáveis de resposta em diferentes níveis dos fatores. A hipótese nula afirma que todas as médias das populações (médias dos níveis dos fatores) são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente. O objetivo desta técnica é demonstrar quais são os fatores que produzem efeitos significativos nas variáveis de resposta, sendo que ela também permite um estudo da relação existente entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o alcance dos objetivos propostos neste trabalho. Primeiramente, são definidas e caracterizadas as condições de execução de testes preliminares, com o objetivo de avaliar o desempenho metrológico dos métodos de ajuste (mínimos quadrados, mínima zona, mínimo circunscrito e máximo inscrito) na medição do diâmetro e do desvio de circularidade. Com base nos resultados obtidos nos pré-testes é apresentado o projeto, a fabricação e a calibração de um artefato-padrão, bem como a aplicação deste artefato na avaliação dos métodos de ajuste implementados nos *softwares* de diferentes máquinas de medir por coordenadas. Por fim, é apresentada a metodologia para a avaliação da incerteza associada aos resultados obtidos nas medições.

3.1. Testes preliminares: avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste e da MMC Mitutoyo BR na medição do diâmetro e do desvio de circularidade

Inicialmente, para avaliação do desempenho metrológico dos diferentes métodos de ajuste, o diâmetro de dois anéis-padrão de aço e de três peças de alumínio torneadas (Fig. 3.1) foi medido em uma MMC do fabricante Mitutoyo (Fig. 3.2), modelo BR-M443, tipo ponte móvel, manual, com resolução de 0,001 mm e volume de trabalho de 400 mm x 400 mm x 300 mm, definido pela faixa nominal das escalas dos eixos *X*, *Y* e *Z*, respectivamente. O *software* dedicado à máquina é o MCosmos® 3.0. Para as medições foi utilizada uma ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro.

De acordo com o certificado de calibração da MMC (Anexo 1), a incerteza linear associada ao eixo *X* é $(0{,}8 + L/1500)$ µm (k = 2,03), para o eixo *Y* é $(0{,}8 + L/3000)$ µm (k = 2,08), enquanto que para o eixo *Z* é $(0{,}9 + L/2900)$ µm (k = 2,11), onde *L* representa o valor

da coordenada correspondente. O erro de apalpação é de (1,9 ± 1,2) µm (k = 2,00). A probabilidade de abrangência é de 95%.



Figura 3.1 – Anéis-padrão de aço e peças de alumínio medidos na MMC Mitutoyo BR.



Figura 3.2 – MMC tipo ponte móvel do fabricante Mitutoyo, modelo BR-M443.

Os anéis-padrão utilizados são do fabricante Mitutoyo, com diâmetro de valor convencional (VC) igual a 15,996 mm e 40,000 mm. Estes possuem certificado de calibração número 8262/10 (Anexo 2) e 8265/10 (Anexo 3), respectivamente, emitidos pelo Laboratório de Metrologia Mitutoyo Sul Americana. A incerteza associada à calibração de ambos é de 0,0010 mm, para um fator de abrangência (k) igual a 2,0 e 2,1 para os anéis

padrão de VC 15,996 mm e 40,000 mm, respectivamente, e probabilidade de abrangência de 95%.

O valor convencional do diâmetro das peças de alumínio foi obtido por meio de uma máquina universal de medir comprimentos, do fabricante Carl Zeiss, com resolução de 0,1 µm e faixa nominal de 100 mm. Esta máquina possui certificado de calibração número 0009/12 (Anexo 4), emitido pelo Laboratório de Metrologia Dimensional da Universidade Federal de Uberlândia. A incerteza associada à calibração da máquina é de 0,4 µm para *k* igual a 1,96 e probabilidade de abrangência de 95%.

Para levantamento do comportamento metrológico da MMC Mitutoyo BR, os anéis-padrão foram medidos em dez posições no volume de trabalho da mesma, sendo cinco delas (1-5) com os anéis apoiados diretamente na mesa de medição da máquina, com coordenada *Z* igual a 6,000 mm, e as outras cinco posições (6-10) deslocadas na vertical com *Z* igual a 71,000 mm, mantendo-se fixos os valores das coordenadas *X* e *Y* (Fig. 3.3). Para o deslocamento dos anéis-padrão foi utilizado um dispositivo com altura regulável, cuja superfície é de referência.

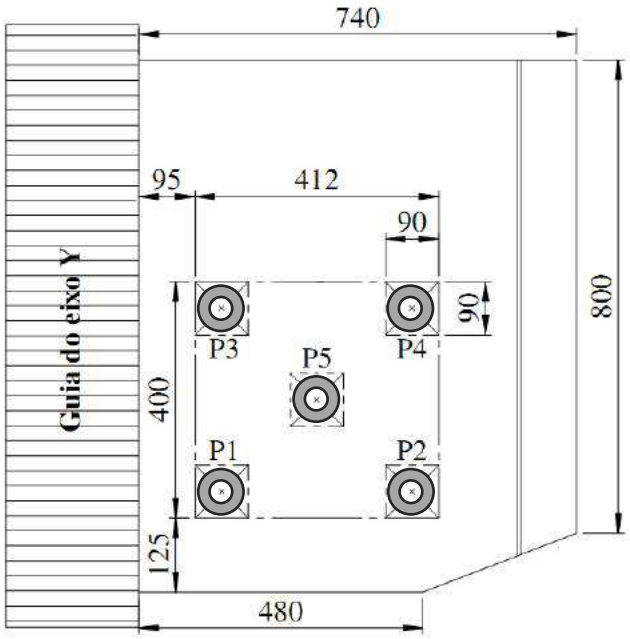


Figura 3.3 – Posições de medição dos anéis-padrão no volume de trabalho da máquina (coordenada *Z* igual a 6,000 mm).

Em cada posição foram efetuadas cinco medições. Doze e vinte pontos foram apalpados em uma única seção transversal dos anéis-padrão de 15,996 mm e 40,000 mm, respectivamente. A medição dos anéis-padrão teve como objetivo, também, avaliar em qual posição do volume de trabalho a MMC apresenta o melhor desempenho.

Em seguida efetuou-se a medição do diâmetro interno das peças. Para tanto, foram apalpados 44 pontos em uma única seção transversal e cinco ciclos de medição foram realizados. A medição foi conduzida na posição do volume de trabalho da máquina que mostrou o melhor desempenho.

As medições foram efetuadas a temperatura ambiente de (20,0 ± 1,0) °C, sendo esta monitorada por um termohigrômetro digital, do fabricante Instrutherm, com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de -20 ºC a 60 ºC. Este possui certificado de calibração número R4996/13 (Anexo 5), emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação. A incerteza associada à calibração é de 0,3 ºC para a temperatura com *k* igual a 2,00 e probabilidade de abrangência de 95%.

Para avaliação da incerteza associada às medições do diâmetro na MMC Mitutoyo BR, foi aplicada a metodologia proposta no *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) (BIPM et al., 2008a). O modelo matemático utilizado para esta finalidade é apresentado na Eq. (3.1).

$$D = \overline{D} + \Delta R + \Delta IC_{MMC} + \Delta E_A + L_0 \Delta T(\alpha_{Pe} + \alpha_E) + L_0 \delta T(\alpha_{Pe} + \alpha_E) \quad (3.1)$$

Onde: D - diâmetro do círculo ajustado; $\overline{D}$ - média aritmética dos valores de diâmetro calculados para os n ciclos de medição; ΔR - correção associada à resolução da MMC; ΔIC_{MMC} - correção associada à incerteza volumétrica da calibração da MMC; ΔE_A - correção associada ao erro de apalpamento; L_0 - valor médio de diâmetro; ΔT - afastamento da temperatura ambiente em relação a 20 °C; δT - variação da temperatura durante as medições; α_{Pe} e α_E - coeficientes de expansão térmica linear do material do anel padrão (aço) ou da peça (alumínio) e das escalas da MMC Mitutoyo BR (vidro), respectivamente.

Uma das particularidades na medição por coordenadas é que a incerteza de medição depende da incerteza associada aos valores das coordenadas dos pontos apalpados na superfície da peça. Desta forma, a Eq. (3.2) apresenta o modelo matemático adotado para o cálculo da incerteza associada às coordenadas (X, Y ou Z) dos pontos.

$$C_i = L_i + \Delta R + \Delta IC_{MMC} + \Delta E_A + L_i \Delta T(\alpha_{Pe} + \alpha_E) + L_i \delta T(\alpha_{Pe} + \alpha_E) \quad (3.2)$$

Onde: C_i - coordenada X, Y ou Z considerada; L_i - média aritmética dos valores da coordenada X, Y ou Z indicados pela MMC.

Após os testes preliminares foram medidas peças fabricadas na indústria, especificamente o diâmetro e o desvio de circularidade de dois furos, identificados como furo do cilindro e furo do mancal, usinados em seis blocos de compressor hermético (Fig. 3.4). As medições foram realizadas na MMC Mitutoyo BR, à temperatura ambiente de (20,0 ± 1,0) °C. Para tanto, 20 pontos foram apalpados na medição do furo do cilindro, e 16 pontos no furo do mancal. Não houve movimentação do eixo *Z* durante as medições, sendo efetuado o apalpamento no plano *XY*, ou seja, uma única seção da peça foi considerada.



Figura 3.4 – Bloco de um compressor hermético, com a indicação dos furos do cilindro e do mancal.

3.2. Projeto do artefato-padrão

A primeira fase do projeto do artefato-padrão consistiu na definição das geometrias do mesmo, de modo que reunisse as principais características mensuradas na indústria. Para tanto, foi tomado como referência um estudo realizado na indústria automobilística alemã por Porath (2005). Neste estudo, foram analisados os desenhos técnicos de dez peças de geometria complexa, e quantificada a ocorrência de diferentes tipos de especificações dimensionais e geométricas do produto. Os resultados obtidos são mostrados no diagrama de Pareto da Fig. 3.5.

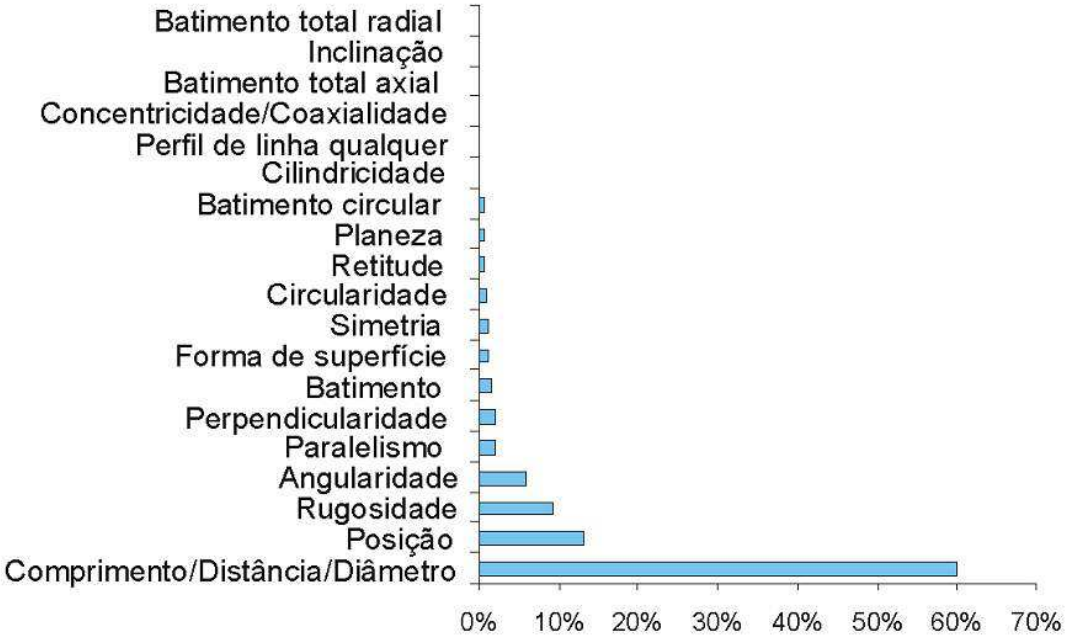


Figura 3.5 – Porcentagem de ocorrência dos diferentes tipos de tolerâncias em peças da indústria automobilística alemã (PORATH, 2005).

Como apresentado na Fig. 3.5, as tolerâncias dimensionais se destacam em primeiro lugar, com 60% de ocorrência, seguida pela tolerância de posição, com aproximadamente 13%. As demais tolerâncias aparecem com ocorrência relativa menor que 10% (PORATH, 2005).

Quanto aos elementos geométricos mais frequentemente usinados em peças de conjuntos mecânicos, a engenharia moderna exige produção em massa de furos cilíndricos, que por sua vez requerem diferentes níveis de exatidão dimensional e geométrica. De acordo com Valdés et al. (2015), expressiva quantidade de peças fabricadas tem forma cilíndrica ou, pelo menos, algumas porções com seção cilíndrica.

Para exemplificar a importância deste elemento na indústria automobilística, considerando que a produção anual de veículos no Brasil, em 2015, foi de aproximadamente 2,5 milhões de unidades (ANFAVEA, 2015), cujos motores tem, no mínimo, 8 válvulas, a fabricação apenas de furos de guias de válvulas foi realizada, pelo menos, 20 milhões de vezes.

Com o objetivo de verificar o comportamento dos métodos de ajuste (LSC, MZC, MIC e MCC) na medição de furos com diferentes dimensões nominais, tolerâncias dimensionais e tolerâncias geométricas, simulações computacionais foram realizadas. Para tanto, tomaram-se como referência os grupos de dimensões nominais, com seus respectivos valores numéricos de graus de tolerância-padrão (IT), especificados na NBR 6158 (ABNT, 1995). A Tab. 3.1 apresenta os parâmetros de entrada utilizados nas simulações.

Tabela 3.1 – Parâmetros de entrada utilizados nas simulações.

Dimensão nominal (mm)	Número de pontos gerados	Grau de tolerância-padrão				
		IT4	IT6	IT8	IT10	IT12
		Tolerância (mm)				
6	4	0,004	0,008	0,018	0,048	0,120
10	6	0,004	0,009	0,022	0,058	0,150
18	10	0,005	0,011	0,027	0,070	0,180
30	16	0,006	0,013	0,033	0,084	0,210
50	26	0,007	0,016	0,039	0,100	0,250

As simulações foram realizadas no *software* Matlab® R2008a. Na rotina implementada (Fig. 3.6) foram gerados (*n*) pontos coordenados (*x, y)* de um círculo de raio (*r*). A seguir, foram introduzidas perturbações nestes pontos obtendo-se o círculo (*r1*), para simular o desvio de circularidade. Isto foi feito variando-se o valor do diâmetro dentro da tolerância dimensional especificada. Por sua vez, novos pontos coordenados (x_1, y_1) foram gerados, sendo os mesmos exportados para um arquivo de texto. Por fim, estes pontos (x_1, y_1) foram importados para o *software* Calypso®, dedicado à MMC do fabricante Zeiss, instalada no Laboratório de Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia, que forneceu o valor de diâmetro e de desvio de circularidade da geometria substituta pelos métodos de ajuste LSC, MZC, MIC e MCC.

```
6 -    r = input ('Valor do raio = ');
7 -    n = input ('Quantidade de pontos = ');
8 -    xc = 0;
9 -    yc = 0;
10 -   teta = (2 * pi)/n;
11
12 -   for i = 1:n+1
13 -   x (i,1) = r * cos (teta * i);
14 -   y (i,1) = r * sin (teta * i);
15 -   z (i,1) = 0;
16 -   end
17
18 -   r1 = -0.011 + (0.011+0.011) .* rand (n+1,1);
19
20 -   for i = 1:n+1
21 -       if  i == n+1
22 -           r1 (n+1,1) = r1 (1,1);
23 -       end
24 -   x1 (i,1) = (r + r1(i,1)) * cos (teta * i);
25 -   y1 (i,1) = (r + r1(i,1)) * sin (teta * i);
26 -   z1 (i,1) = 0;
27 -   raio (i,1) = r + 1000 * r1(i,1);
28 -   end
29
30     % Exportar dados para um arquivo txt ----------
31 -   arquivo = [x1 y1 z1];
32 -   save ('DN10-IT8.txt','arquivo','-ascii')
```

Figura 3.6 – Rotina implementada no Matlab® R2008a para as simulações.

A partir do estudo desenvolvido por Porath (2005) e dos resultados obtidos nas simulações e nos testes preliminares, a geometria do artefato-padrão consistiu em uma placa de furos. Nesta placa foram usinados 12 furos com diferentes diâmetros e níveis de exatidão dimensional e geométrica (Fig. 3.7). Esta configuração permite medir, além do diâmetro dos furos, desvio de circularidade, desvio de cilindricidade, desvio de posição, entre outras características. Este artefato-padrão recebeu o nome de PLAFAMA (Placa de Furos para Avaliação dos Métodos de Ajuste).

O desenho técnico da PLAFAMA é apresentado na Fig. 3.7, feito no *software* de CAD 3D Solidworks® (Apêndice 1).

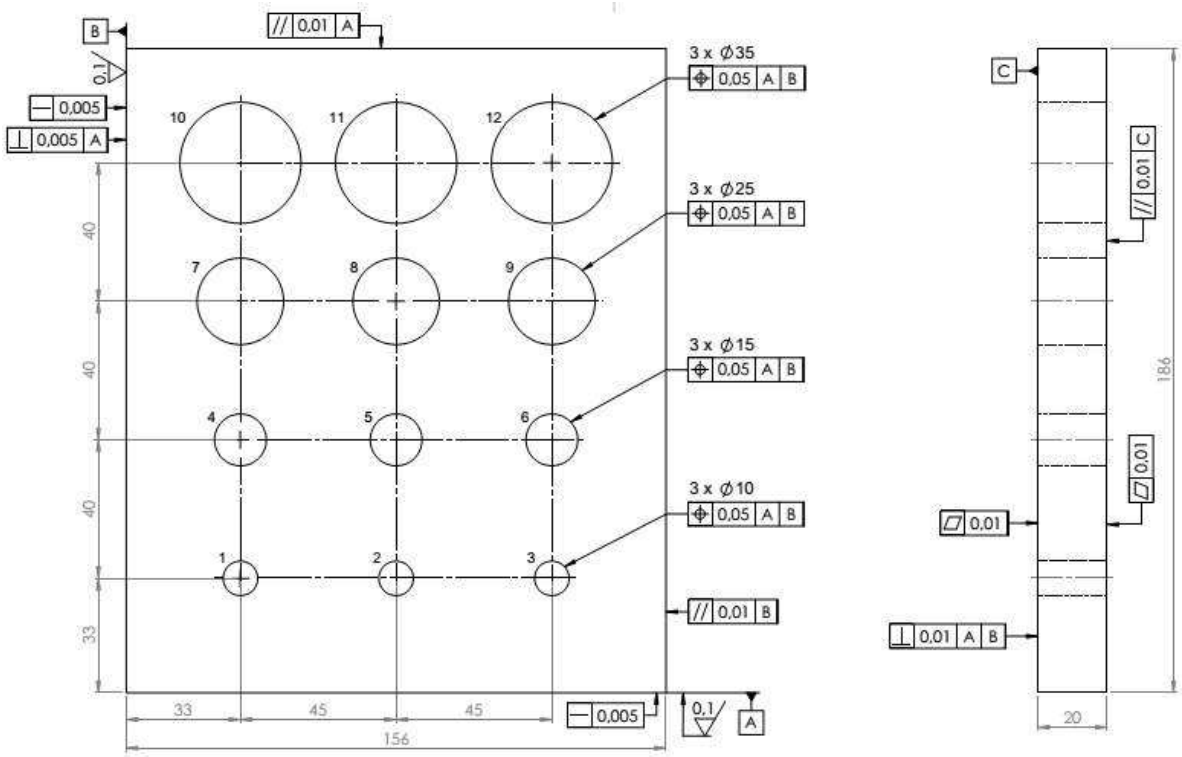


Figura 3.7 – Desenho técnico do artefato-padrão PLAFAMA.

Como pode-se observar na Fig. 3.7, o artefato-padrão tem um conjunto de 12 furos cilíndricos, cujos centros estão dispostos em quatro linhas e três colunas igualmente espaçadas. Os furos de cada linha possuem o mesmo diâmetro, porém com diferentes tolerâncias dimensional e geométrica, enquanto que os furos da mesma coluna apresentam diferentes diâmetros, mas o mesmo grau de tolerância-padrão. Estes valores estão apresentados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Valores de tolerância dimensional e geométrica da PLAFAMA.

Furo	Dimensão nominal (mm)	Classe de tolerância	Tolerância dimensional (mm)	Tolerância de circularidade (mm)
1	10	H4	0,004	0,003
2	10	H7	0,015	0,018
3	10	H9	0,036	0,043
4	15	H4	0,005	0,004
5	15	H7	0,018	0,022
6	15	H9	0,043	0,051
7	25	H4	0,006	0,005
8	25	H7	0,021	0,025
9	25	H9	0,052	0,062
10	35	H4	0,007	0,006
11	35	H7	0,025	0,030
12	35	H9	0,062	0,074

O material definido para a fabricação da PLAFAMA foi o aço inoxidável AISI 304, devido principalmente à sua elevada resistência à corrosão, dureza (180 HB) e estabilidade dimensional.

3.3. Fabricação e calibração do artefato-padrão PLAFAMA

Devido às particularidades de projeto, características dimensionais e geométricas da PLAFAMA, a mesma foi fabricada por uma empresa especializada na usinagem de peças de precisão.

A primeira etapa do processo de fabricação consistiu em usinar as faces de referência (A e B) do bloco de aço, a fim de atender a tolerância de perpendicularidade. Para tanto, em uma operação de desbaste, o material bruto foi fresado em uma fresadora universal; posteriormente, foi realizada a operação de acabamento destas faces pelo processo de retificação.

A usinagem dos doze furos da placa foi iniciada com um processo de desbaste com broca helicoidal. Em seguida, para as operações de acabamento, diferentes processos de fabricação foram utilizados, em função das tolerâncias especificadas. Os furos com grau de tolerância padrão IT4 foram mandrilados e lapidados, sendo que esta última operação permite a obtenção de dimensões precisas e com melhor acabamento superficial. Já os furos IT7 e IT9 foram mandrilados e posteriormente acabados pelo processo de eletroerosão a fio. Para este último processo, foi definido um perfil de circularidade, que por sua vez foi executado pelo programa da máquina de eletroerosão, que permite usinar perfis complexos

com precisão e bom acabamento superficial. Após a fabricação todos os furos foram numerados, e o diâmetro do primeiro furo de cada linha foi gravado na face superior visando a rápida identificação dos mesmos. A Figura 3.8 apresenta o desenho em 3D da PLAFAMA.



Figura 3.8 – Desenho em 3D da PLAFAMA.

A calibração da PLAFAMA foi efetuada pelo Laboratório de Metrologia da Mitutoyo Sul Americana, pertencente à Rede Brasileira de Calibração (RBC).

3.4. Aplicação do artefato-padrão PLAFAMA para avaliação dos métodos de ajuste em MMCs

Para a avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste implementados nas MMCs, o artefato-padrão PLAFAMA foi medido em quatro máquinas de medir por coordenadas, aqui nomeadas como Zeiss, Hexagon, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM. As características medidas foram: i) diâmetro; ii) desvio de circularidade; iii) desvio de

cilindricidade; iv) desvio de posição; v) desvio de perpendicularidade; vi) desvio de retitude; vii) desvio de paralelismo.

A MMC Zeiss é do fabricante Carl Zeiss, modelo Contura G2, tipo ponte móvel, de comando numérico computadorizado (CNC), resolução 0,2 µm e volume de medição de 1000 mm, 1200 mm e 1600 mm para os eixos *X*, *Y* e *Z*, respectivamente (Fig. 3.9). Esta máquina possui certificado de calibração número 046/2012 (Anexo 6), emitido pelo Laboratório de Metrologia Dimensional da Carl Zeiss do Brasil/IMT. De acordo com o mesmo, o erro de apalpação é de -0,2 µm, e a incerteza expandida linear, para os três eixos, é de (0,7 + *L*/278) µm, para *k* igual a 2,00 e 95% de probabilidade de abrangência, em que *L* é a distância medida (em mm). O *software* dedicado à MMC é o Calypso® 5.2.

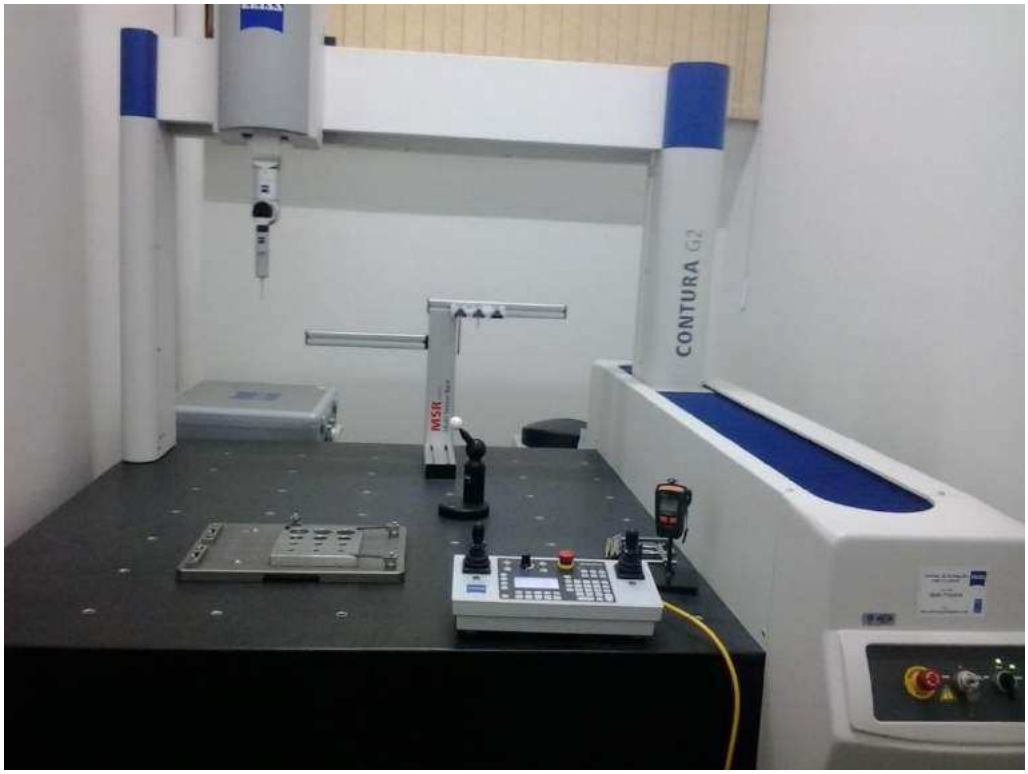


Figura 3.9 – MMC tipo ponte móvel do fabricante Carl Zeiss, modelo Contura G2.

As medições foram efetuadas a temperatura ambiente de (20,0 ± 1,0) °C, sendo monitorada por um termohigrômetro digital do fabricante Eptech, com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de -40 ºC a 70 ºC. Este possui certificado de calibração número TI0322/12, emitido pelo Laboratório de Temperatura da RCQ Controle de Qualidade (Anexo 7). A incerteza associada à calibração é de 0,3 ºC para *k* igual a 2,00 e probabilidade de abrangência de 95%. Em todos os ensaios, antes de ser medida a PLAFAMA foi climatizada por um período de doze horas, para atingir a estabilidade térmica.

Para as medições, a PLAFAMA foi fixada sobre uma placa na mesa da máquina, de maneira que fosse possível acessar as faces laterais da mesma. Em seguida, o sistema de coordenadas de referência foi posicionado como indicado na Fig 3.10. Para o apalpamento dos pontos foi utilizada uma ponta de medição com esfera de rubi, com diâmetro de 3 mm.

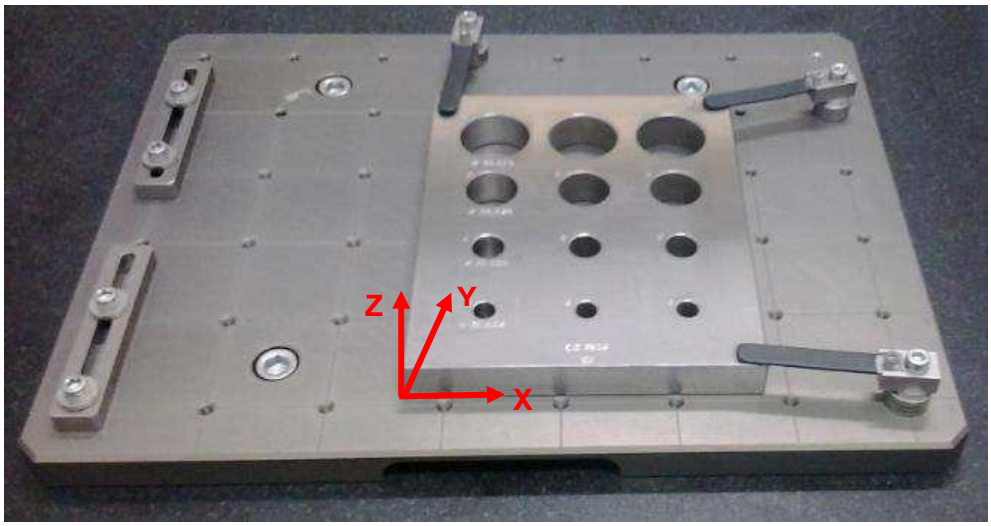


Figura 3.10 – Posicionamento do sistema de coordenadas de referência na MMC Carl Zeiss.

A medição do diâmetro e do desvio de circularidade foi realizada em uma seção transversal dos furos na coordenada *Z* igual a 10 mm. Quanto ao número de pontos, 16, 24, 42 e 56 pontos foram apalpados para os furos com diâmetro nominal de 10 mm, 15 mm, 25 mm e 35 mm, respectivamente.

Para a medição do desvio de cilindricidade, ao longo de cada furo foram considerados cinco planos, P1, P2, P3, P4 e P5 (Fig. 3.11), na coordenada Z igual a 2 mm, 6 mm, 10 mm, 14 mm e 18 mm, respectivamente. Foram apalpados 16, 24, 42 e 56 pontos em cada plano de medição, nos furos com diâmetro nominal de 10 mm, 15 mm, 25 mm e 35 mm, respectivamente.

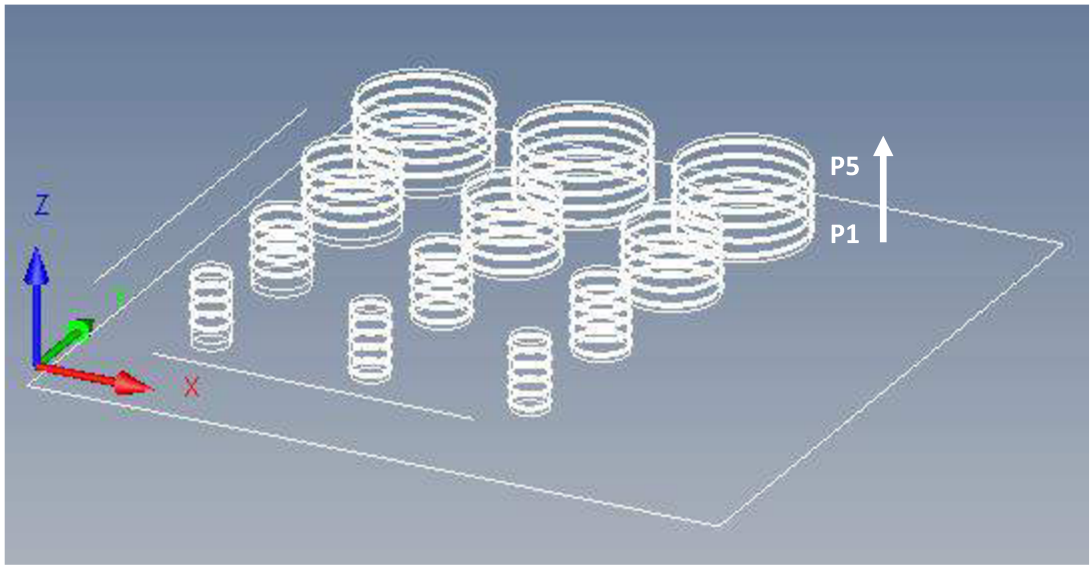


Figura 3.11 – Planos de medição do desvio de cilindricidade dos furos da PLAFAMA.

Para a medição do desvio de posição a origem do sistema de coordenadas foi transferida para o centro do furo 1 (Fig. 3.8), uma vez que esta foi a referência utilizada durante a usinagem. Os valores do desvio de posição foram obtidos a partir dos círculos ajustados pelos diferentes métodos, durante a obtenção do diâmetro dos furos.

A medição de desvio de retitude foi efetuada nas faces de referência da PLAFAMA indicadas pelas letras A e B (Fig. 3.12). Foram apalpados 30 pontos na face A e 50 pontos na face B.

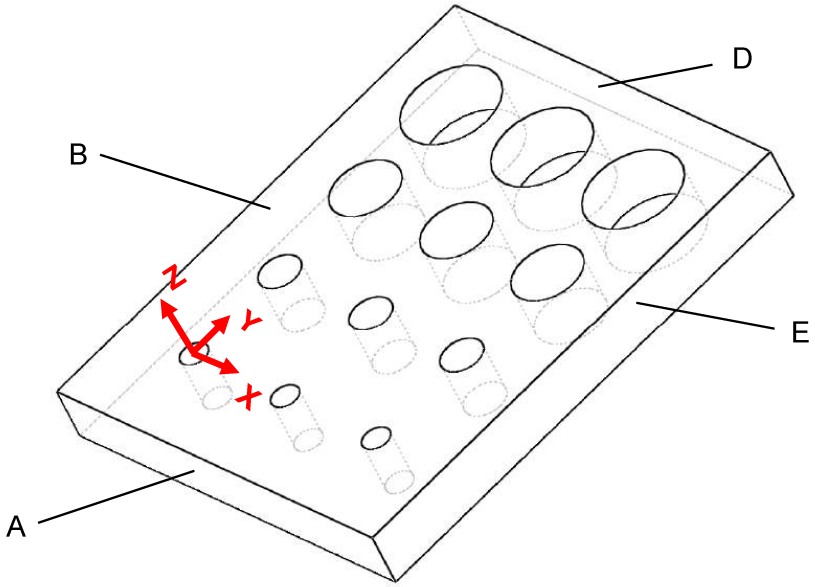


Figura 3.12 – Indicação da nomenclatura das faces laterais da PLAFAMA.

Para a medição do desvio de perpendicularidade entre as faces A e B, sendo A a referência, foram utilizados os dados decorrentes da medição do desvio de retitude. Por sua vez, durante a medição do desvio de paralelismo entre as faces A e D, e B e E (Fig. 3.12), com A e B como referências, se procedeu de forma similar à medição do desvio de retitude. Foram apalpados 30 pontos nas faces A e D, e 50 pontos nas faces B e E.

Todas as características foram medidas na coordenada *Z* igual a 10 mm, e dez repetições foram conduzidas. Os valores de desvio de retitude, posição, paralelismo e perpendicularidade foram obtidos por meio da aplicação dos quatro métodos de ajuste de interesse.

A segunda MMC CNC é do fabricante Hexagon, modelo Croma, tipo ponte móvel. Esta máquina possui volume de medição de 600 mm, 800 mm e 600 mm para os eixos *X*, *Y* e *Z*, respectivamente (Fig. 3.13). De acordo com o certificado de calibração número 699/2013 (Anexo 8), emitido pelo Laboratório de Metrologia Dimensional da Hexagon, a resolução da máquina é 0,04 µm, porém, o *software* fornece os resultados com apenas três casas decimais, sendo de 0,001 mm. O erro de apalpação é de 2,43 µm. A incerteza expandida linear para o eixo *X* é de (3 + *L*/5726) µm, para o eixo *Y* é de (2,9 + *L*/1033) µm, e para o eixo *Z* é de (2,8 + L/1180) (*k* = 2,00 e 95% de probabilidade de abrangência), em que *L* é a distância medida (em mm). O *software* dedicado à MMC é o PC-DMIS® CAD++. Foi utilizada uma ponta de medição com esfera de rubi, com diâmetro de 2 mm.

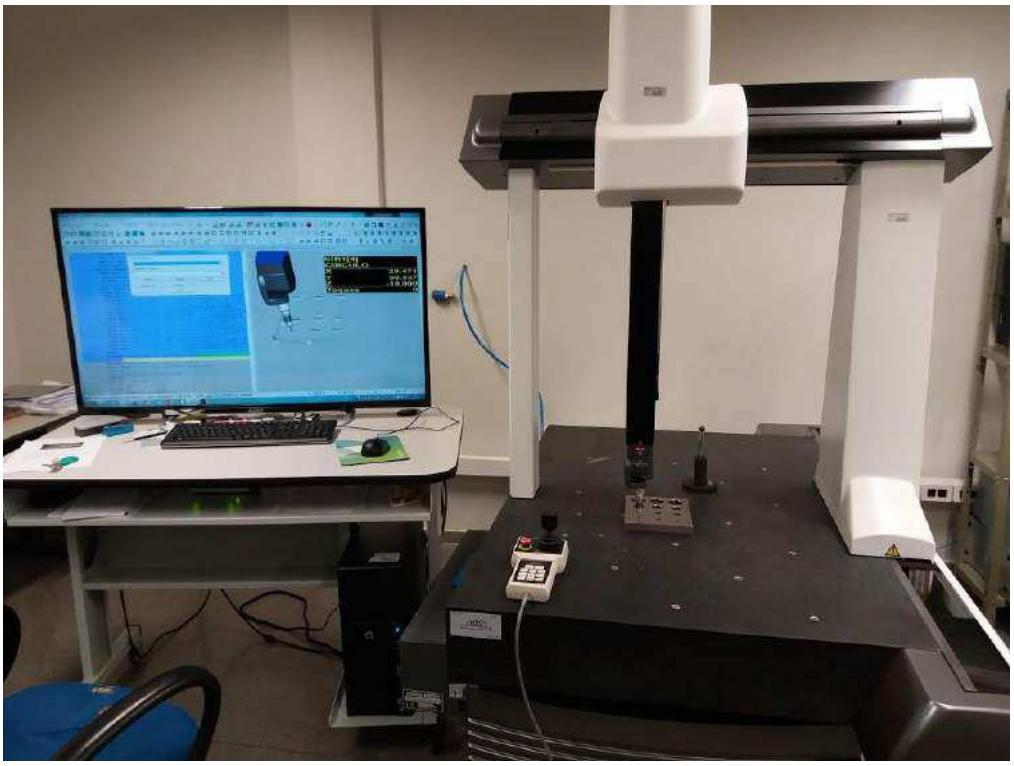


Figura 3.13 – MMC tipo ponte móvel do fabricante Hexagon, modelo Croma.

O artefato-padrão PLAFAMA foi medido na MMC Mitutoyo BR (Fig. 3.14), modelo manual, instalada no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) da Universidade Federal de Uberlândia, cujas características construtivas e metrológicas estão descritas na seção 3.1. Para o apalpamento dos pontos foi utilizada uma ponta de medição com esfera de rubi, de diâmetro 2 mm. As medições foram efetuadas a temperatura ambiente de (20,0 ± 1,0) °C, sendo monitorada pelo termohigrômetro digital apresentado na seção 3.2.



Figura 3.14 – Posicionamento do sistema de coordenadas de referência na MMC Mitutoyo BR.

Considerando as limitações de uma MMC manual, a metodologia de medição aplicada para a MMC Zeiss foi adaptada para a MCC Mitutoyo BR, sendo alterada a quantidade de pontos apalpados para cada geometria avaliada, como descrito a seguir. O número de repetições foi alterado para cinco ciclos de medição.

Desta forma, na medição do diâmetro e do desvio de circularidade foram apalpados 12, 20 e 32 pontos na seção transversal de medição dos furos com diâmetro nominal de 10 mm, 15 mm e 35 mm, respectivamente. Para a medição do desvio de cilindricidade foram medidos três planos, P1, P2 e P3, na coordenada *Z* igual a 2 mm, 7 mm e 12 mm, respectivamente. Foram apalpados 12, 20 e 32 pontos em cada plano de medição nos furos com diâmetro nominal de 10 mm, 15 mm e 35 mm, respectivamente.

A metodologia utilizada para a medição dos desvios de posição, retitude, perpendicularidade e paralelismo é análoga àquela apresentada para a MMC Zeiss e Hexagon, alterando-se, porém, o número de pontos apalpados, sendo este de 15 para as faces A e D, e 18 para as faces B e E.

Por fim, o artefato-padrão foi medido na MMC Mitutoyo QM, modelo QM-353, tipo cantilever, manual, com resolução de 0,001 mm e volume de trabalho de 300 mm, 500 mm e 300 mm, definido pela faixa nominal das escalas dos eixos *X*, *Y* e *Z*, respectivamente (Fig. 3.15). O *software* dedicado à máquina é o MCosmos® 3.0. A máquina possui certificado de calibração número 7407/08, emitido pelo Laboratório de Metrologia da Mitutoyo Sul Americana (Anexo 9). De acordo com este certificado, o erro de apalpação é de 3,2 µm (k = 2,1); a incerteza linear associada ao eixo *X* é (1,2+ L/900) µm (k = 2,10), para o eixo *Y* é (1,2+ L/800) µm (k = 2,1), enquanto que para o eixo *Z* é (1,2 + L/700) µm (k = 2,1), onde L representa o valor da coordenada correspondente. A probabilidade de abrangência é de 95%. Esta máquina encontra-se no Laboratório de Metrologia da Universidade de Brasília.

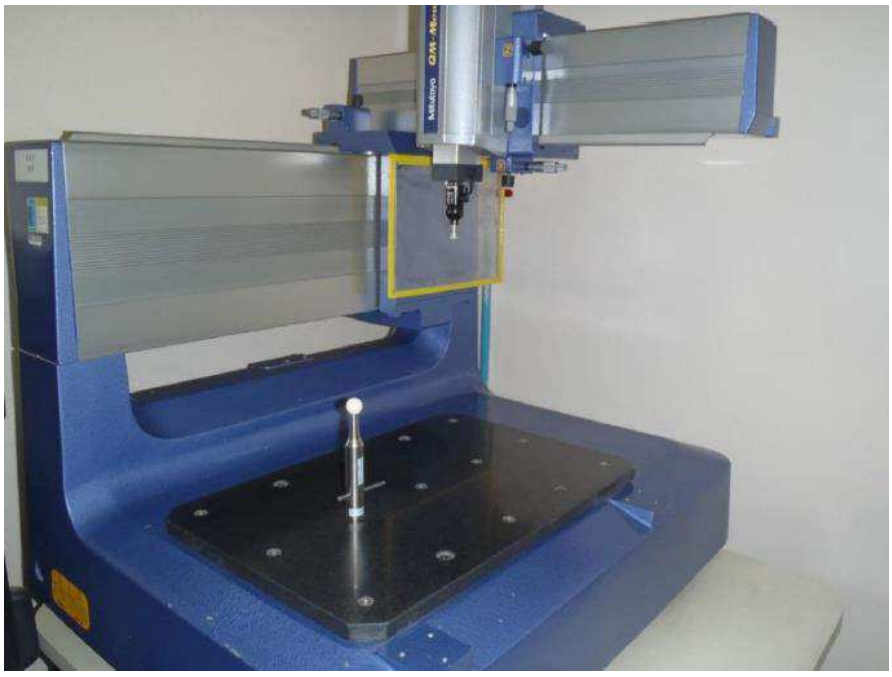


Figura 3.15 – Máquina de medir por coordenadas, modelo QM-353.

As medições foram efetuadas a temperatura ambiente de (20,0 ± 1,0) °C, sendo monitorada por um termohigrômetro digital do fabricante TFA, com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de -10 ºC a 60 ºC. Este possui certificado de calibração número 1582/07, emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Fundação CERTI (Anexo 10). A incerteza associada à calibração é de 0,6 ºC para *k* igual a 2,00 e probabilidade de abrangência de 95%.

A estratégia de medição adotada foi a mesma utilizada nas medições realizadas na MMC Mitutoyo BR, uma vez a máquina Mitutoyo QM também é do tipo manual.

A análise estatística dos resultados foi feita utilizando-se a técnica de Análise de Variância (ANOVA) com um fator (*one-way*) e quatro níveis, sendo o fator o método de ajuste com seus respectivos níveis: mínimos quadrados, mínima zona, máximo inscrito e mínimo circunscrito. O *software* utilizado para a análise foi o Minitab® 17.

3.5. Avaliação da incerteza de medição

Para a avaliação da incerteza associada aos resultados obtidos nas medições foi utilizado o método proposto no GUM (BIPM et al., 2008a). Para tanto, foram adotados os seguintes passos:

i. Definição do mensurando (variável de saída).
ii. Identificação das variáveis de influência (variáveis de entrada).
iii. Definição do modelo matemático.
iv. Levantamento das informações sobre as variáveis de entrada, adoção das distribuições de probabilidade, classificação do tipo de avaliação (A ou B), cálculo da incerteza-padrão.
v. Aplicação da lei de propagação de incertezas e determinação da incerteza-padrão combinada, graus de liberdade efetivo e incerteza expandida.
vi. Apresentação dos resultados conforme a NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005).

3.5.1. Incerteza associada às coordenadas X, Y e Z dos pontos apalpados

Inicialmente, foi determinada a incerteza-padrão combinada associada às coordenadas dos pontos *X, Y* e *Z* apalpados durante a medição. As variáveis de influência a serem consideradas neste caso são: resolução da MMC; incerteza-padrão associada à calibração da MMC; erro do sistema de apalpamento; variação da temperatura durante a medição e afastamento da temperatura em relação a 20 °C. O modelo matemático adotado é dado na Eq. (3.2).

3.5.2. Incerteza associada à distância entre dois pontos

A distância ($D(P_1, P_2)$) entre dois pontos, $P_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ e $P_2 = (X_2, Y_2, Z_2)$ é dada pela Eq. (3.3).

$$D(P_1, P_2) = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \tag{3.3}$$

No entanto, é necessário incluir no modelo matemático a variabilidade associada aos valores da distância entre dois pontos, considerando os *n* ciclos de medição, de acordo com a Eq. (3.4).

$$D(P_1, P_2) = \Delta s(D) + \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \tag{3.4}$$

A Equação (3.4) pondera a variabilidade da distância entre dois pontos ($\Delta s(D)$), considerando *n* ciclos de medição e a correção associada às coordenadas dos dois pontos, P_1 e P_2.

3.5.3. Incerteza associada ao diâmetro do furo

A Equação (3.5) permite calcular o raio do círculo, considerando *n* pontos ($n \geq 3$).

$$R_H = \sqrt{(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2} \tag{3.5}$$

Onde: (X_c, Y_c) representa as coordenadas do centro do círculo e R_H o raio do mesmo.

Multiplicando por dois ambos os membros da Eq. (3.5) para determinar o diâmetro do furo (D_H) e adicionando nesta equação a variabilidade associada aos valores do diâmetro, considerando *n* ciclos realizados ($\Delta s(D_H)$), a Eq. (3.6) é obtida.

$$D_H = \Delta s(D_H) + 2 \cdot R_H = \Delta s(D_H) + 2\sqrt{(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2} \tag{3.6}$$

3.5.4. Incerteza associada aos desvios de circularidade e de cilindricidade

Para calcular o desvio de circularidade é necessário determinar a distância *Di* de cada ponto P_i ao centro do círculo P_C, identificando quais pontos estão mais (P_{max}) e menos (P_{min}) distantes do ponto P_C.

O desvio de circularidade D_{CIR} é dado pela diferente entre estes pontos, Eq. (3.7).

$$D_{CIR} = P_{max} - P_{min} \tag{3.7}$$

Adicionando na Eq. (3.7) a variabilidade associada aos valores do desvio de circularidade $\Delta s(D_{CIR})$, considerando *n* ciclos de medição, a Eq. (3.8) é obtida.

$$D_{CIR} = \Delta s(D_{CIR}) + P_{max} - P_{min} \tag{3.8}$$

3.5.5. Avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada

Para avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada foram consideradas as informações apresentadas na Tab. 3.3, onde: *TA* - tipo de avaliação; *DP* - distribuição de probabilidade; *GL* - número de graus de liberdade; *CC* - informações retiradas do certificado de calibração; *me* - mensurando; *s* - desvio-padrão; *n* - tamanho da amostra; *R* - resolução; R_T - resolução do termômetro; I_T - incerteza da calibração do termômetro; α_w - coeficiente de expansão térmica linear das escalas da máquina; α_s - coeficiente de expansão térmica linear do material da peça.

Tabela 3.3 – Informações para avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada.

Variável de entrada	*TA*	*DP*	*GL*	Equação
Variabilidade dos valores da coordenada	A	*t-Student*	n-1	$u(me) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$
Resolução da MMC (R_{MMC})	B	retangular	∞	$u(\Delta R_{MMC}) = \frac{R_{MMC}}{2 \cdot \sqrt{3}}$
Incerteza da calibração da coordenada *X* ($IC_{MMC(X)}$)	B	CC	CC	$IC_{MMC(x)} = \frac{U_x}{k_x}$
Incerteza da calibração da coordenada *Y* ($IC_{MMC(y)}$)	B	CC	CC	$IC_{MMC(y)} = \frac{U_y}{k_y}$
Incerteza da calibração da coordenada *Z* ($IC_{MMC(z)}$)	B	CC	CC	$IC_{MMC(z)} = \frac{U_z}{k_z}$
Erro de apalpamento (E_A)	B	CC	CC	$u(\Delta E_A) = \frac{E_A}{\sqrt{6}}$
Afastamento da temperatura (*T*) em relação a 20 °C	B	*t-Student*	CC	$u(\Delta T) = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_T}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_T}{k_T}\right)^2}$
Coeficiente de expansão térmica linear (α)	B	retangular	CC	$u(\Delta\alpha) = \frac{0{,}01 \cdot (\alpha_w + \alpha_s)}{\sqrt{3}}$
Variação da temperatura (δT)	B	retangular	CC	$u(\Delta\delta T) = \frac{\delta(T)}{\sqrt{3}}$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

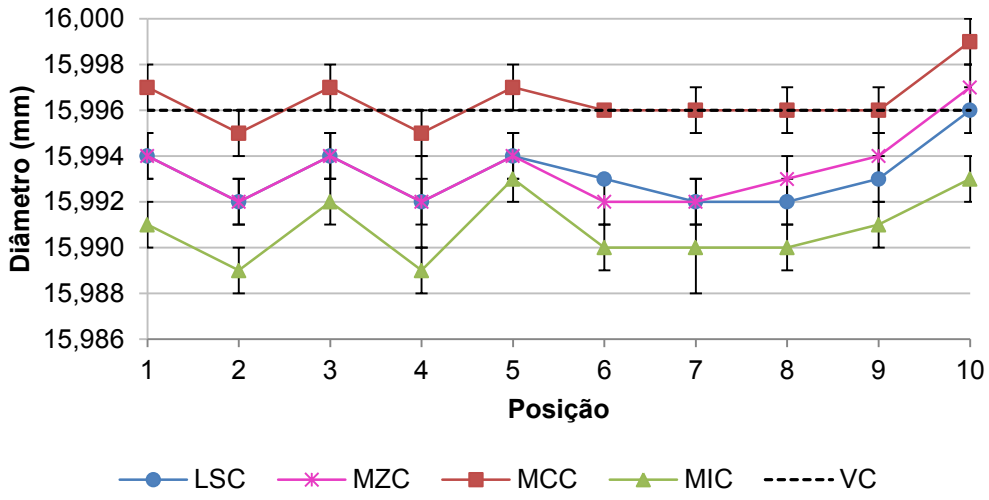
No presente capítulo, inicialmente são apresentados os resultados dos testes preliminares, que compreendem a avaliação do comportamento metrológico da MMC Mitutoyo BR, e a avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste (mínimos quadrados, mínima zona, mínimo circunscrito e máximo inscrito) implementados nesta máquina, especificamente na medição do diâmetro e do desvio de circularidade de anéis-padrão e de peças. Por sua vez, são mostrados os resultados da calibração do artefato-padrão PLAFAMA, bem como a aplicação deste artefato na avaliação dos quatro métodos de ajuste implementados nas máquinas de medir por coordenadas Zeiss, Hexagon, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM. Por fim, é apresentada a metodologia proposta para avaliação dos métodos de ajuste implementados em MMCs utilizando o artefato-padrão PLAFAMA.

4.1. Resultados dos testes preliminares

4.1.1. Resultados da avaliação do comportamento metrológico da MMC Mitutoyo BR

Os valores de diâmetro obtidos aplicando os diferentes métodos de ajuste na medição dos anéis-padrão, em todas as posições avaliadas, são mostrados na Fig. 4.1, bem como o valor convencional dos mesmos. Ainda, a incerteza expandida é apresentada pela barra de erro para uma probabilidade de abrangência de 95%.

(a)



(b)

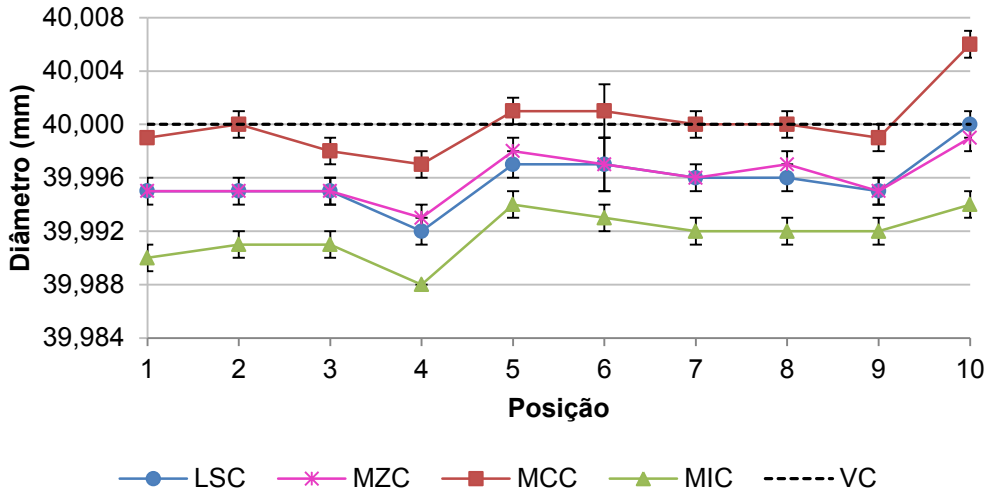


Figura 4.1 – Valores de diâmetros obtidos na medição dos anéis-padrão de valor convencional (a) 15,996 mm e (b) 40,000 mm.

Observa-se na Fig. 4.1 que o método MCC apresentou menor exatidão em todas as posições, com exceção da posição 10. Para melhor entendimento, a Fig. 4.2 apresenta os valores de tendência (estimativa do erro sistemático) obtidos na medição do diâmetro dos anéis-padrão, nas diferentes posições de medição no volume de trabalho da máquina, para cada método de ajuste.

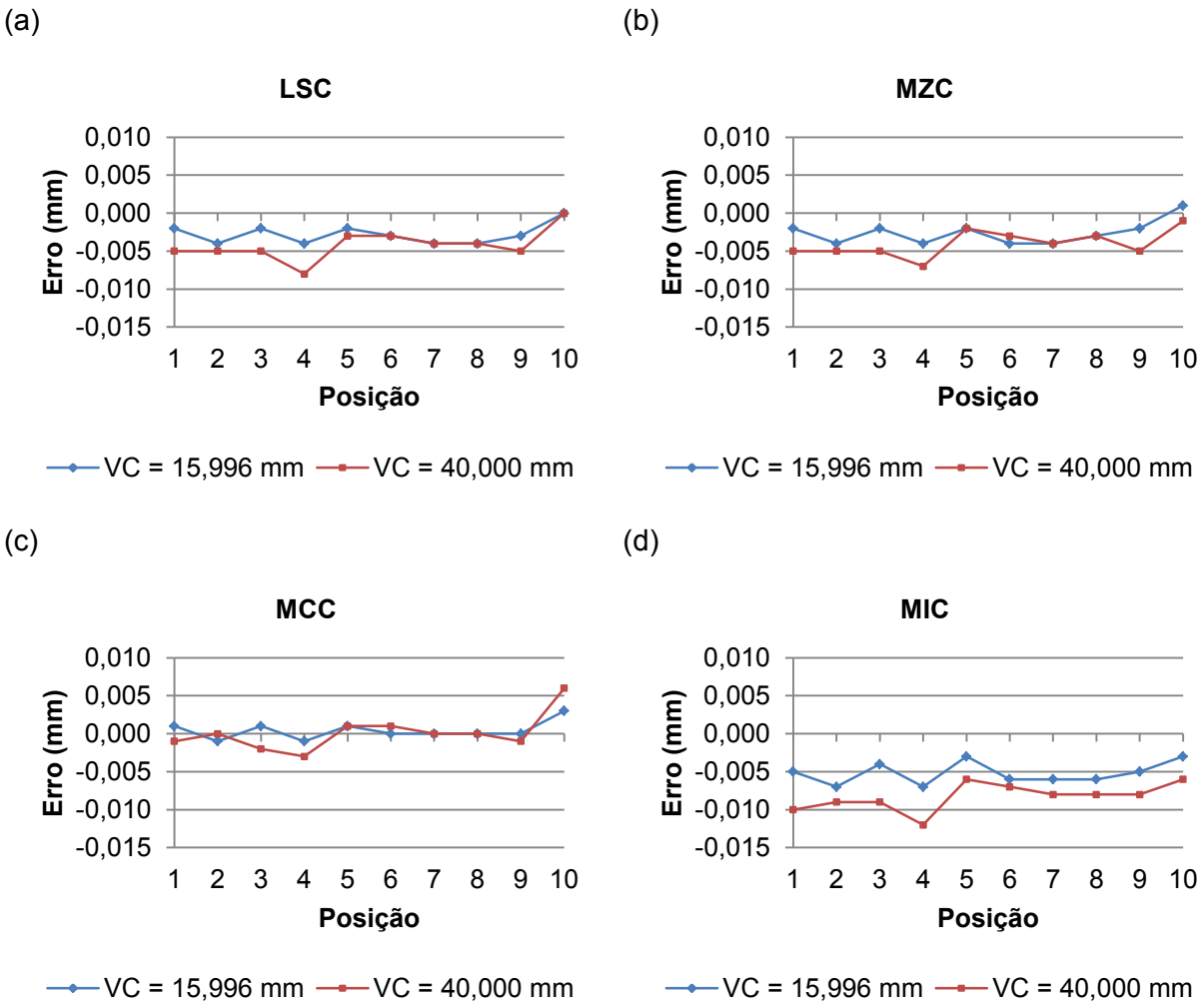


Figura 4.2 – Valores do erro sistemático ao variar a posição de medição e o diâmetro dos anéis-padrão, para os métodos: (a) LSC; (b) MZC; (c) MCC; (d) MIC.

De maneira geral, observa-se na Fig. 4.2 que a máquina apresenta uma tendência de fornecer valores de diâmetros menores que o valor convencional, mostrando erros negativos. Ainda, para as posições 1 a 5 (anéis-padrão apoiados no desempeno da máquina e coordenada *Z* igual a 6,000 mm), os menores valores de erro foram obtidos na medição do anel-padrão de diâmetro igual a 15,996 mm, demonstrando que na medida em que o valor do mensurando aumenta, os valores do erro sistemático também aumentam.

Nota-se ainda que os maiores erros foram obtidos na posição 4, na medição do anel-padrão de valor convencional 40,000 mm. Este resultado era esperado e é condizente com aqueles encontrados por Valdés (1999). Uma das justificativas para este fato está no aumento do efeito do erro de perpendicularidade da máquina na medida em que o braço de Abbé torna-se maior.

Para melhor entendimento do efeito dos erros de perpendicularidade, fez-se o levantamento deste erro entre os eixos *X* e *Y*. Para tanto, foi utilizado um esquadro de aço do fabricante Mitutoyo, de dimensões 400 mm x 250 mm, que possui certificado de calibração número 09343/13, emitido pelo Laboratório de Metrologia da Mitutoyo Sul Americana (Anexo 8). As medições foram realizadas apalpando pontos nas faces externas do esquadro, sendo as mesmas identificadas como *L1* e *L2* (Fig. 4.3). O esquadro foi alinhado em relação ao eixo *X* (*L1*), enquanto que a face *L2* foi percorrida pela ponta de medição. Foram efetuados nove ciclos de medição, sendo apalpados 10 pontos na face *L1* e 15 pontos na face *L2*.

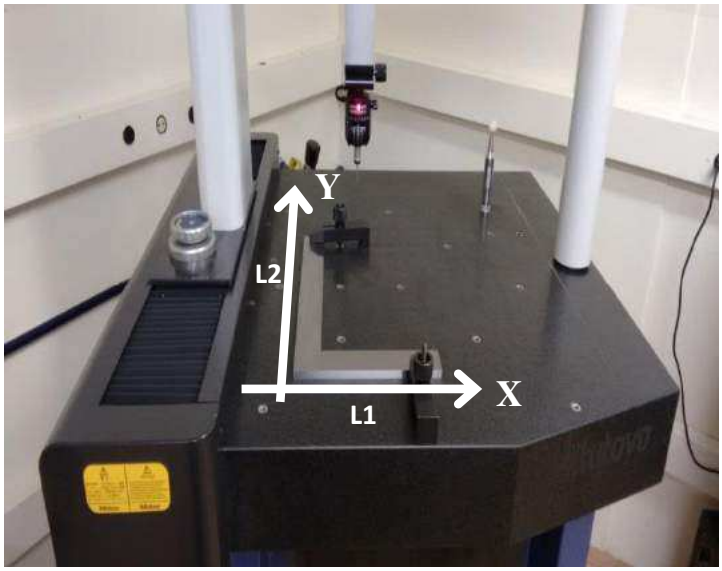


Figura 4.3 – Medição do erro de perpendicularidade entre os eixos *X* e *Y* da MMC Mitutoyo BR utilizando um esquadro de aço.

Em seguida, foi ajustada uma reta de regressão pelos pontos apalpados, por meio do método dos mínimos quadrados, para posterior determinação do ângulo entre os eixos *X* e *Y* da MMC. O erro de perpendicularidade foi então calculado como a diferença entre o valor médio do ângulo encontrado, considerando os nove ciclos de medição, e o valor convencional, que corresponde a 90º 0' 0". Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos na medição do ângulo entre os eixos *X* e *Y* da MMC.

Leitura	Ângulo
L1	89º 59' 55"
L2	89º 59' 59"
L3	89º 59' 52"
L4	89º 59' 51"
L5	89º 59' 54"
L6	89º 59' 54"
L7	89º 59' 51"
L8	89º 59' 54"
L9	90º 0' 0"
Média	89º 59' 54"
Desvio-padrão	0º 0' 3"
Erro	- 0º 0' 6"

A incerteza associada à medição do erro de perpendicularidade foi determinada por meio da Eq. (4.1). Para tanto, foi utilizado o método de Monte Carlo, conforme apresentado no Suplemento 1 do GUM (BIPM et al., 2008b).

$$\alpha = \overline{\alpha} + \Delta R + \Delta IC_{ESQ} \tag{4.1}$$

Onde: α - ângulo; $\overline{\alpha}$ - média aritmética dos valores de ângulo calculados para os *n* ciclos de medição; ΔR - correção associada à resolução da MMC; ΔIC_{ESQ} - correção associada à incerteza volumétrica associada à calibração do esquadro.

O erro de perpendicularidade entre os eixos *X* e *Y* é de (-6 ± 3) segundos, para *k* igual a 2,00 e 95% de probabilidade de abrangência.

Posteriormente, foi efetuada uma análise do efeito do erro de perpendicularidade nos resultados da medição dos anéis-padrão. Para tanto, foi utilizada a Eq. (4.2).

$$E_{per} = tang\ \alpha\ .\ Y \tag{4.2}$$

Onde: E_{per} - efeito do erro de perpendicularidade; *tang* α - tangente do ângulo α; *Y*- valor da coordenada.

Os resultados obtidos são mostrados na Fig. 4.4.

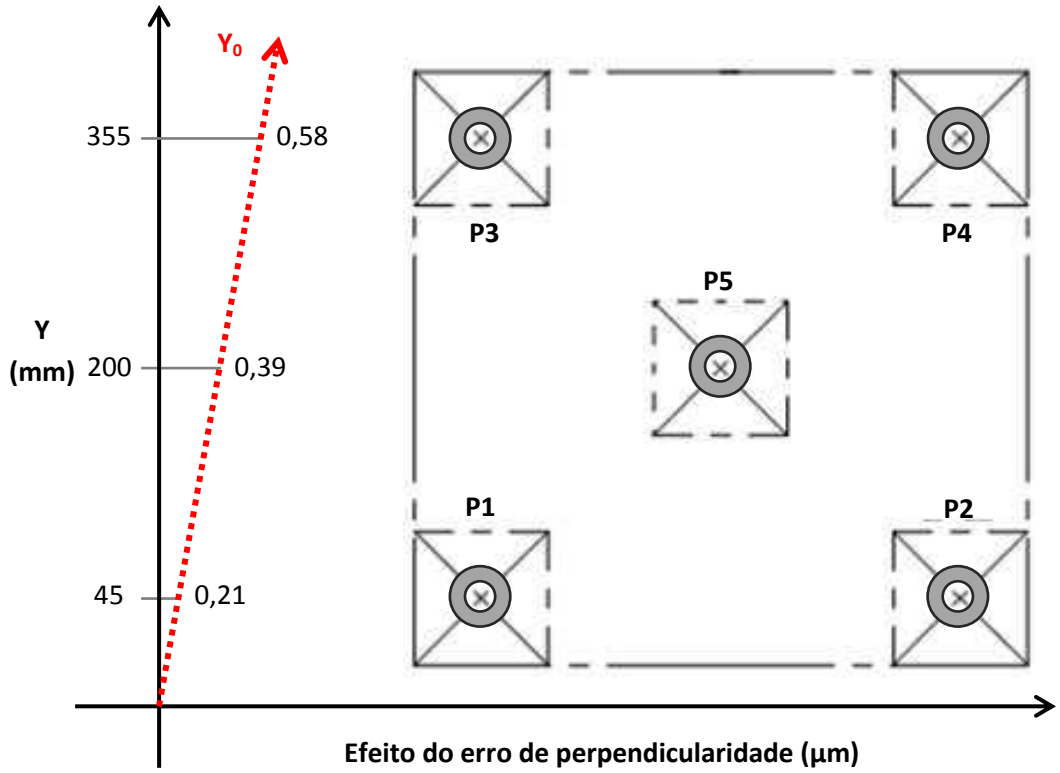


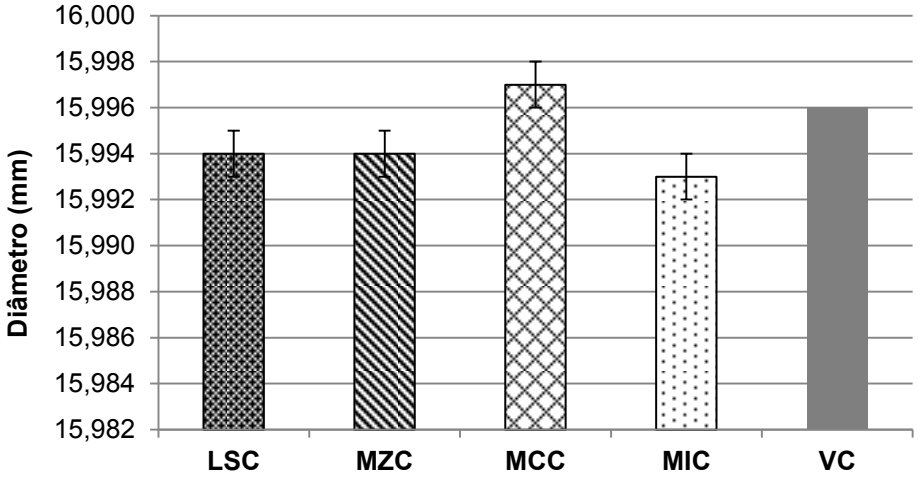
Figura 4.4 – Efeito do erro de perpendicularidade na medição dos anéis-padrão. Valores de erro expressos em µm.

Observa-se na Fig. 4.4 que na medida em que o valor da coordenada *Y* de um ponto aumenta, o efeito do erro de perpendicularidade também aumenta, sendo um dos motivos dos maiores valores de erro na posição 4.

4.1.2. Resultados da avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste na medição do diâmetro

Os valores de diâmetro obtidos por meio dos diferentes métodos de ajuste na medição dos anéis-padrão e das peças de alumínio são mostrados nas Fig. 4.5 e 4.6, respectivamente, bem como o valor convencional dos mesmos. Em todos os casos, os resultados apresentados foram obtidos na posição 5, por ser esta a posição em que a máquina exibiu o melhor desempenho metrológico. A incerteza expandida é apresentada pela barra de erro para uma probabilidade de abrangência de 95%.

(a)



(b)

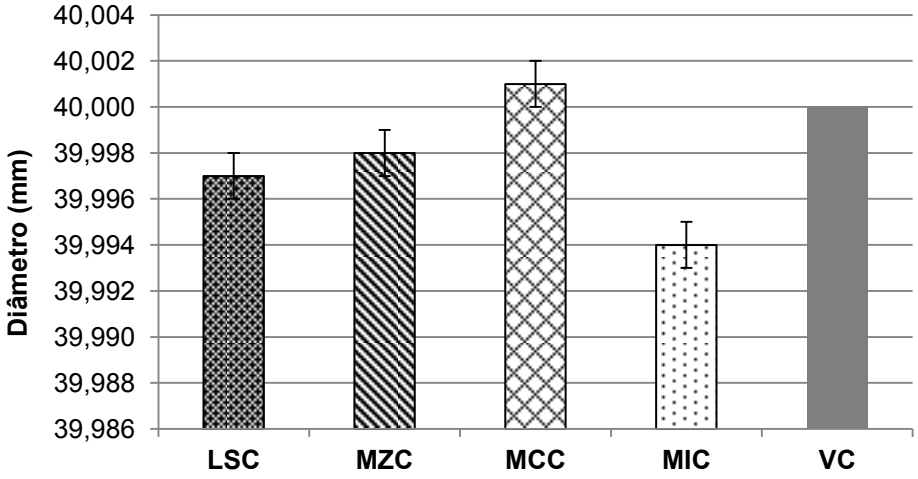


Figura 4.5 – Valores de diâmetro obtidos na medição dos anéis-padrão de valor convencional (a) 15,996 mm e (b) 40,000 mm.

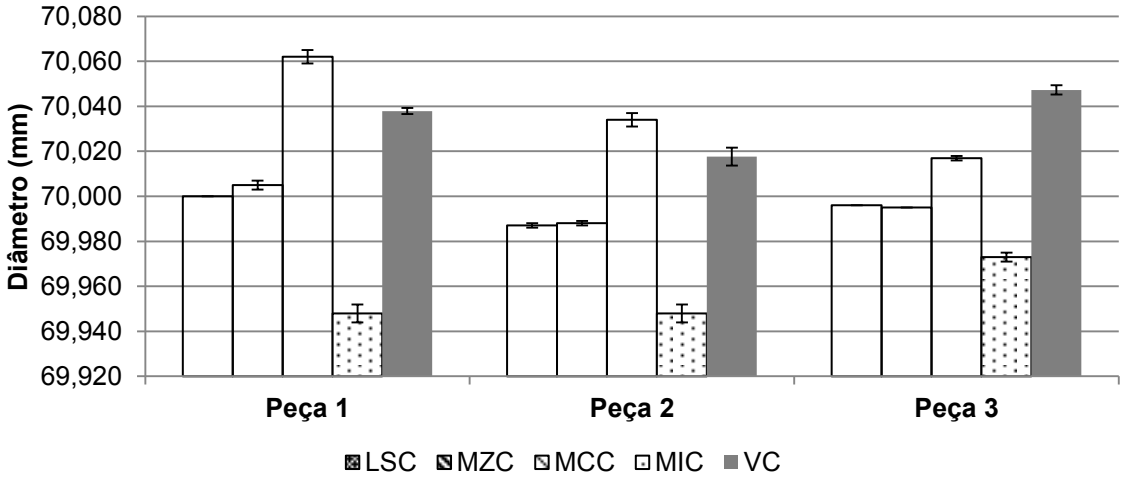


Figura 4.6 – Valores de diâmetros obtidos nas medições das peças de alumínio.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da análise de variância para as medições do diâmetro dos anéis-padrão e das peças de alumínio, onde: *GL* - número de graus de liberdade; *SQ* - soma de quadrados; *QM* - quadrado médio; *F* - variância; *p* - probabilidade de significância. O valor $p \leq 0,05$ indica que os valores médios de diâmetro são significativamente diferentes quando as medições são realizadas aplicando os quatro métodos de ajuste.

Tabela 4.2 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro dos anéis-padrão e das peças de alumínio.

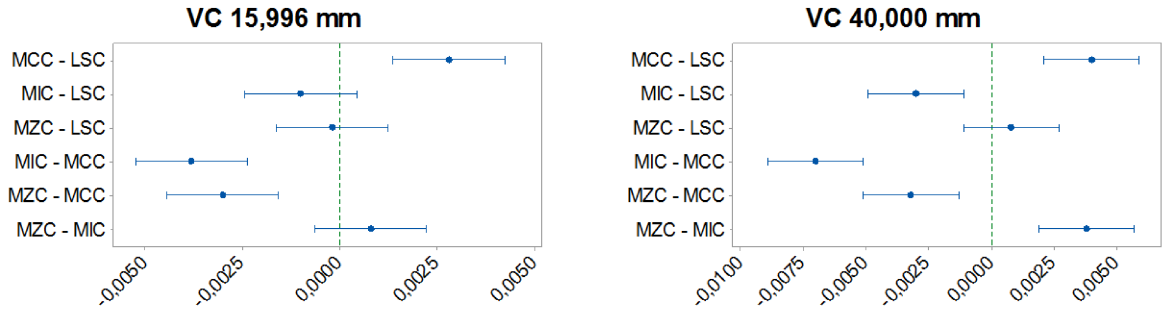
	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
Anel-padrão 15,996 mm	Fator	3	0,000041	0,000014	21,97	0,000
	Erro	16	0,000010	0,000001		
	Total	19	0,000051			
Anel-padrão 40,000 mm	Fator	3	0,000124	0,000041	37,62	0,000
	Erro	16	0,000018	0,000001		
	Total	19	0,000142			
Peça 1	Fator	3	0,032349	0,010783	1432,95	0,000
	Erro	16	0,000120	0,000008		
	Total	19	0,032469			
Peça 2	Fator	3	0,018380	0,006127	845,05	0,000
	Erro	16	0,000116	0,000007		
	Total	19	0,018496			
Peça 3	Fator	3	0,004845	0,001615	1435,54	0,000
	Erro	16	0,000018	0,000001		
	Total	19	0,004863			

A partir das Fig. 4.5 e 4.6 observa-se que tanto para as peças como para os anéis-padrão o método MCC mostrou-se o mais exato, fornecendo os menores valores de erro sistemático. Para ambos os anéis-padrão este erro assumiu o valor de 1 µm, enquanto que para as peças 1, 2 e 3 o erro foi de 24 µm, 16 µm e -30 µm, respectivamente. Neste trabalho, em particular, este resultado pode ser justificado porque o valor convencional do diâmetro dos anéis-padrão e das peças foi obtido por meio de máquinas de medição que apalpam pontos diametralmente opostos, em que o operador deve procurar a posição da peça que garanta a obtenção do maior diâmetro. Para a obtenção do valor convencional dos anéis-padrão foi utilizada uma máquina de medição longitudinal, especificada no certificado de calibração dos mesmos, enquanto que para as peças foi usada a máquina universal de medir comprimentos mencionada anteriormente neste trabalho.

Por outro lado, o método MIC forneceu os maiores valores de erro sistemático sendo, portanto, o método menos exato. Este erro foi de -3 µm para o anel-padrão de valor convencional 15,996 mm e -6 µm para o anel-padrão de valor convencional 40,000 mm. Para as peças 1, 2 e 3, o erro foi de -90 µm, -70 µm e -74 µm, respectivamente.

Quanto aos métodos LSC e MZC, estes apresentaram valores de erros sistemáticos e exatidão similares, sendo que não há diferença significativa entre os valores médios de diâmetro obtidos por estes métodos, conforme os resultados do teste de Tukey apresentados na Fig. 4.7. Este teste estatístico indica as comparações significativas e não significativas entre níveis de fatores em múltiplas comparações, sendo que os diâmetros médios são significativamente diferentes entre si quando o intervalo não conter o zero.

(a)



(b)

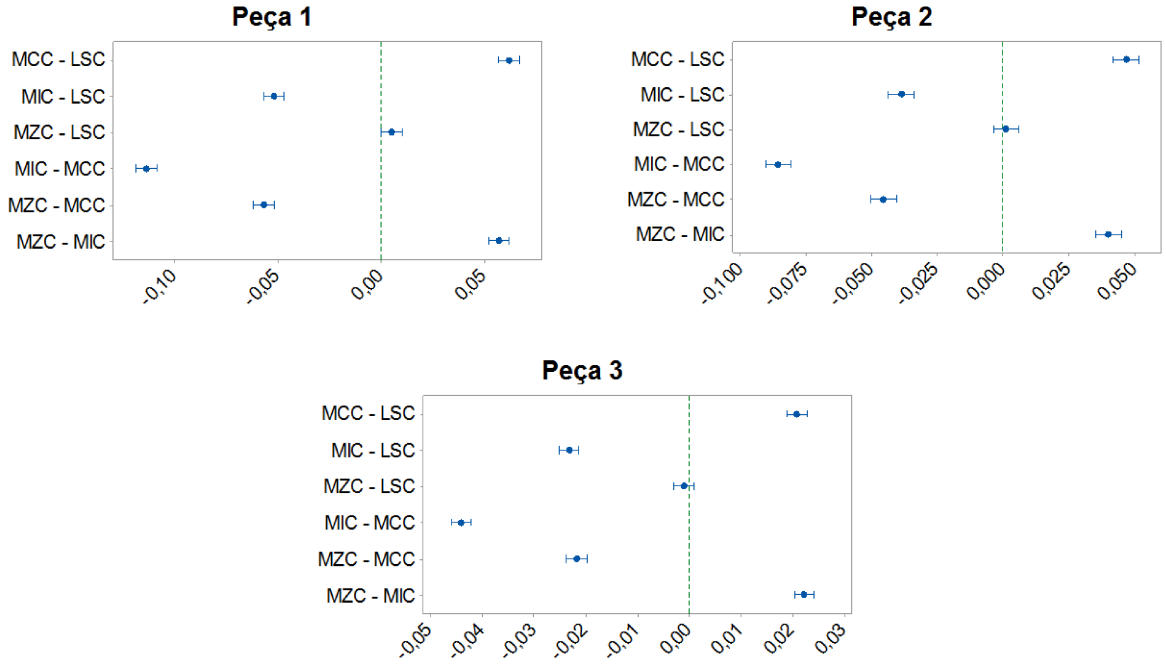


Figura 4.7 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos (a) anéis-padrão e (b) peças de alumínio.

Na medição dos anéis-padrão, a diferença máxima observada entre os valores obtidos pelos quatro métodos de ajuste foi de 4 µm e 7 µm para os anéis-padrão de 15,996 mm e 40,000 mm, respectivamente. Com relação às peças, notou-se que esta diferença foi muito maior, sendo que a máxima diferença observada entre os métodos MCC e MIC foi de 114 µm para a peça 1, de 86 µm para a peça 2 e de 44 µm para a peça 3. Cabe ressaltar que a tolerância dimensional das peças é significativamente maior que a dos anéis-padrão, uma vez que estas apresentam maiores valores de diâmetro e graus de tolerância-padrão (IT).

Quanto à repetibilidade, para uma confiabilidade de 95%, na medição de ambos os anéis-padrão a precisão foi de ± 2 µm, para todos os métodos de ajuste. Quanto às peças, a menor precisão foi sempre obtida pelo método de ajuste MIC, sendo de ± 8 µm para as peças 1 e 2, e de ± 4 µm para a peça 3.

Os valores de incerteza expandida (*U*) associados à medição do diâmetro dos anéis-padrão e das peças seguiram a tendência do desvio-padrão experimental, para uma probabilidade de abrangência de 95%. Para ambos os anéis-padrão, o valor da incerteza foi de 0,002 mm (*k* igual a 2,00) para todos os métodos de ajuste. Na medição das peças, os maiores valores de incerteza foram obtidos pelo método de ajuste MIC, assumindo o valor de 0,005 mm para as peças 1 e 2, e 0,003 mm para a peça 3 (em todos os casos, *k* é igual 2,00).

A componente que mais contribuiu para a incerteza final da medição, em todos os casos, foi a variabilidade dos valores de diâmetro indicados pela máquina. Para minimizar este efeito pode-se aumentar o número de repetições.

Ponderando ainda a incerteza de medição, é importante ressaltar que a avaliação e declaração da incerteza são indispensáveis para a correta interpretação dos resultados de medição. Ela é particularmente útil no controle dimensional e geométrico de peças, em que a característica avaliada deve atender aos valores limites impostos pela tolerância especificada. Isto porque a incerteza associada à medição afeta a zona de especificação, reduzindo-a e originando a zona de conformidade. Na medida em que a incerteza expandida aumenta, a zona de conformidade diminui (WECKENMANN; KNAUER; KILLMAIER, 2001).

Considerando que as peças possuem especificação dimensional 70 JS9, com tolerância igual a 74 µm (zona de especificação), tem-se que a zona de conformidade é de 64 µm, como apresentado na Fig. 4.8.

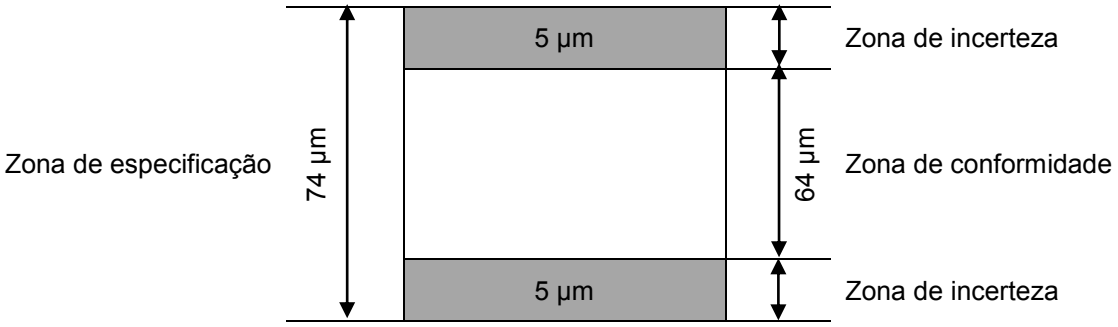


Figura 4.8 – Representação das zonas de especificação, de incerteza e de conformidade.

A Figura 4.9 apresenta os valores de diâmetro obtidos pelos quatro métodos de ajuste na medição das peças, bem como os valores de diâmetro mínimo e máximo. A incerteza expandida é apresentada pela barra de erro para uma probabilidade de abrangência de 95%.

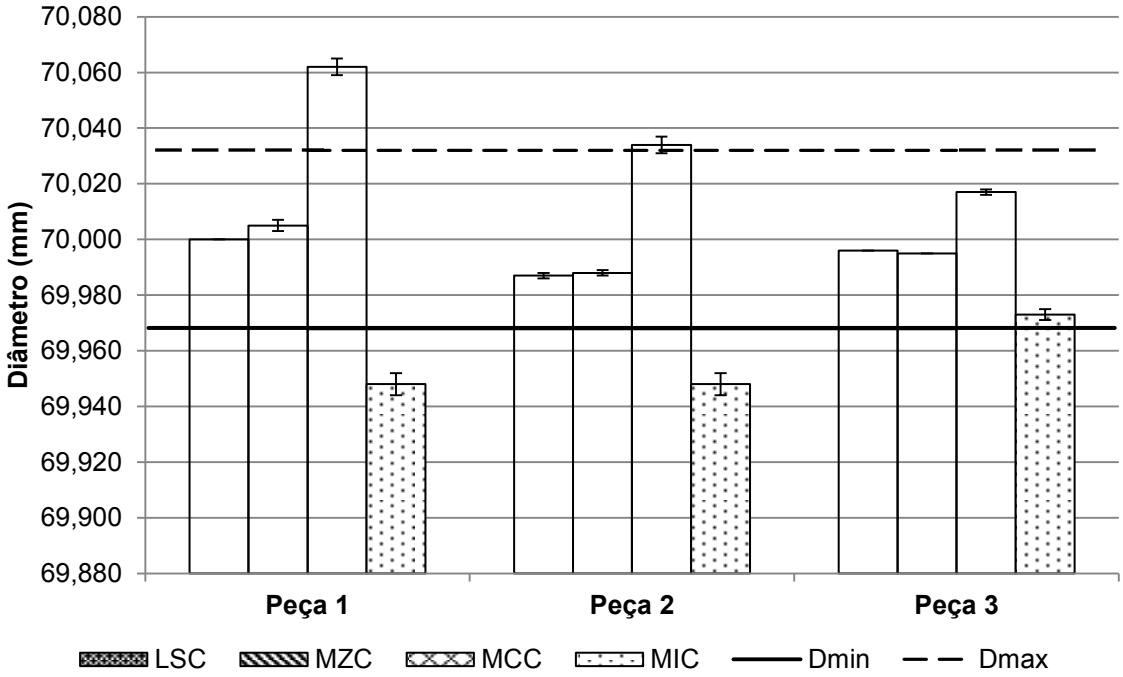


Figura 4.9 – Valores de diâmetros obtidos pelos quatros métodos de ajuste na medição das peças e valores do diâmetro mínimo (Dmin) e máximo (Dmax) da zona de conformidade.

Observa-se na Fig. 4.9 que para as peças 1 e 2 o método MCC forneceu valores maiores que o diâmetro máximo (70,032 mm), enquanto o método MIC forneceu valores menores que o diâmetro mínimo permitido (69,968 mm). Assim, se esses métodos de ajuste

fossem utilizados para determinação da geometria substituta, essas peças seriam reprovadas. Por outro lado, os métodos LSC e MZC permitiriam atribuir às peças a condição de aprovadas ou dentro da tolerância.

Portanto, durante a medição de peças que apresentam tolerâncias geométricas, devem-se conhecer as particularidades e limitações dos métodos de ajuste utilizados nos programas computacionais, uma vez que estes produzem resultados consideravelmente distintos.

Com base nos resultados apresentados e discutidos até aqui, conclui-se que enquanto na medição dos anéis-padrão o desempenho metrológico dos métodos de ajuste mostrou-se adequado, na medição das peças este ficou comprometido. Isto se justifica devido às peças apresentarem desvios de circularidade significativamente maiores que aqueles exibidos pelos anéis-padrão, como mostra a Fig. 4.10, que apresenta também a incerteza expandida pela barra de erro, para uma probabilidade de abrangência de 95%. Estes resultados estão em consonância com Phillips (2011) e Shakarji (2011).

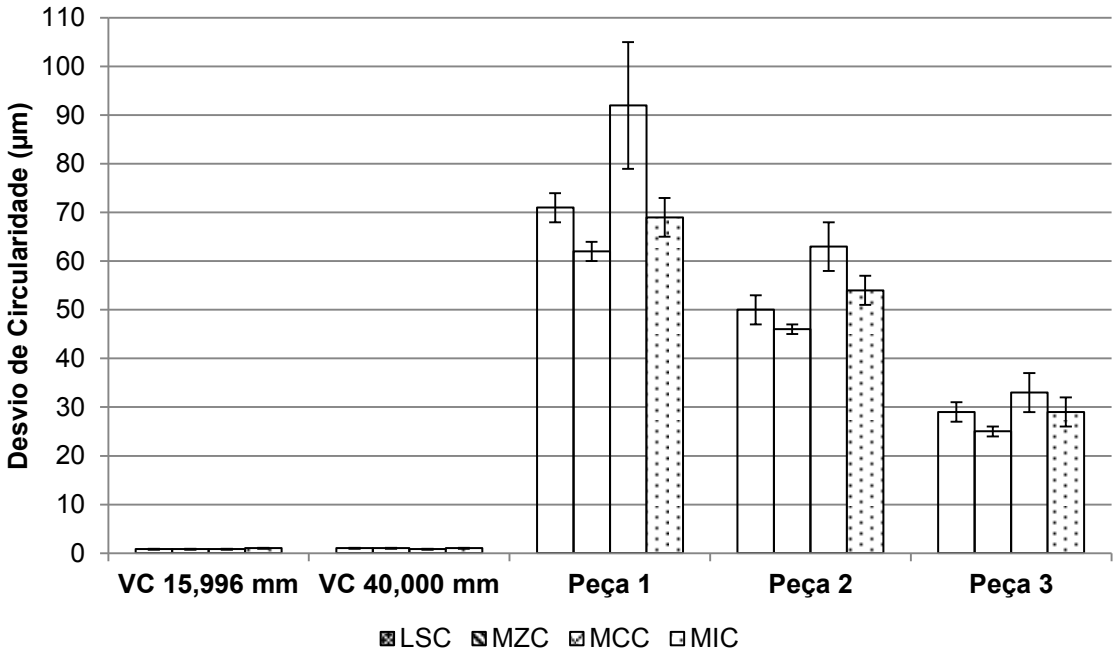


Figura 4.10 – Valores de desvio de circularidade dos anéis-padrão e das peças.

A Tabela 4.3 mostra o resultado da análise de variância decorrente da medição do desvio de circularidade dos anéis-padrão e das peças de alumínio. Em todos os casos, os valores médios de desvio de circularidade foram estatisticamente diferentes quando obtidos por meio da aplicação dos quatro métodos de ajuste, considerando uma confiabilidade de 95%.

Tabela 4.3 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade dos anéis-padrão e das peças de alumínio.

	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
Anel-padrão 15,996 mm	Fator	3	0,2375	0,079167	11,31	0,000
	Erro	16	0,1120	0,007000		
	Total	19	0,3495			
Anel-padrão 40,000 mm	Fator	3	0,2020	0,067333	7,70	0,002
	Erro	16	0,1400	0,008750		
	Total	19	0,3420			
Peça 1	Fator	3	2524,1	841,38	18,04	0,000
	Erro	16	746,4	46,65		
	Total	19	3270,5			
Peça 2	Fator	3	807,3	269,12	23,45	0,000
	Erro	16	183,6	11,47		
	Total	19	990,0			
Peça 3	Fator	3	177,0	59,000	8,08	0,002
	Erro	16	116,8	7,300		
	Total	19	293,8			

Pode-se observar na Fig. 4.10 que o desvio de circularidade dos anéis-padrão é baixo e similar para todos os métodos de ajuste, assumindo valor máximo de 1,0 μm, com precisão de ± 0,2 μm (para 95% de confiabilidade). No entanto, no caso das peças, estas apresentam valores consideráveis de desvio de circularidade, sendo que a diferença entre os valores obtidos pelos quatro métodos de ajuste é mais evidente à medida que este desvio torna-se maior. Ainda, observa-se baixa precisão nos resultados obtidos. Este resultado indica que os artefatos-padrão com elevada exatidão dimensional e geométrica utilizados para efetuar a calibração de máquinas de medir por coordenadas não são capazes de fornecer informações sobre o desempenho dos diferentes métodos de ajustes. Os padrões virtuais, com desvios geométricos considerados nulos, mostram-se menos eficientes ainda.

Para as três peças, o método MCC forneceu maiores valores de desvio de circularidade, sendo também aquele com menor repetibilidade. Neste caso, considerando uma confiabilidade de 95%, a precisão foi de ± 26 μm para a peça 1, de ± 10 μm para a peça 2 e de ± 8 μm para a peça 3. Em contrapartida, o método MZC resultou nos menores valores de desvio de circularidade e apresentou-se como o mais preciso, exibindo valores de precisão de ± 4 μm para a peça 1 e ± 2 μm para as peças 2 e 3 (95% de confiabilidade). A diferença entre os resultados obtidos pelos métodos MCC e MZC é de 30 μm, 17 μm e 8 μm para as peças 1, 2 e 3, respectivamente.

Considerando uma probabilidade de abrangência de 95%, os valores de incerteza expandida (*U*) associados à medição das peças seguiram a tendência do desvio-padrão experimental. Os maiores valores de incerteza foram obtidos pelo método de ajuste MCC,

assumindo o valor de 16 µm, 6 µm e 5 µm para as peças 1, 2 e 3, respectivamente (em todos os casos, *k* é igual a 2,00). Para o método MZC, que foi aquele mais preciso, a incerteza expandida é de 3 µm para a peça 1, e de 2 µm para as peças 2 e 3, para *k* igual a 1,97.

Visando a confirmação dos resultados obtidos anteriormente quanto ao comportamento dos métodos de ajuste, foi medido na MMC Mitutoyo BR o diâmetro e o desvio de circularidade do cilindro e do furo do mancal usinados em seis blocos de compressor hermético (B1-B6). Os resultados obtidos estão apresentados nas Fig. 4.11 e 4.12. A incerteza expandida é apresentada pela barra de erro para uma probabilidade de abrangência de 95%.

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os resultados da análise de variância para as medições do diâmetro e do desvio de circularidade, respectivamente, do cilindro e do furo do mancal dos blocos de compressor. Utilizando α igual a 0,05, o valor *p* indica que em todos os casos o fator método de ajuste é estatisticamente significativo.

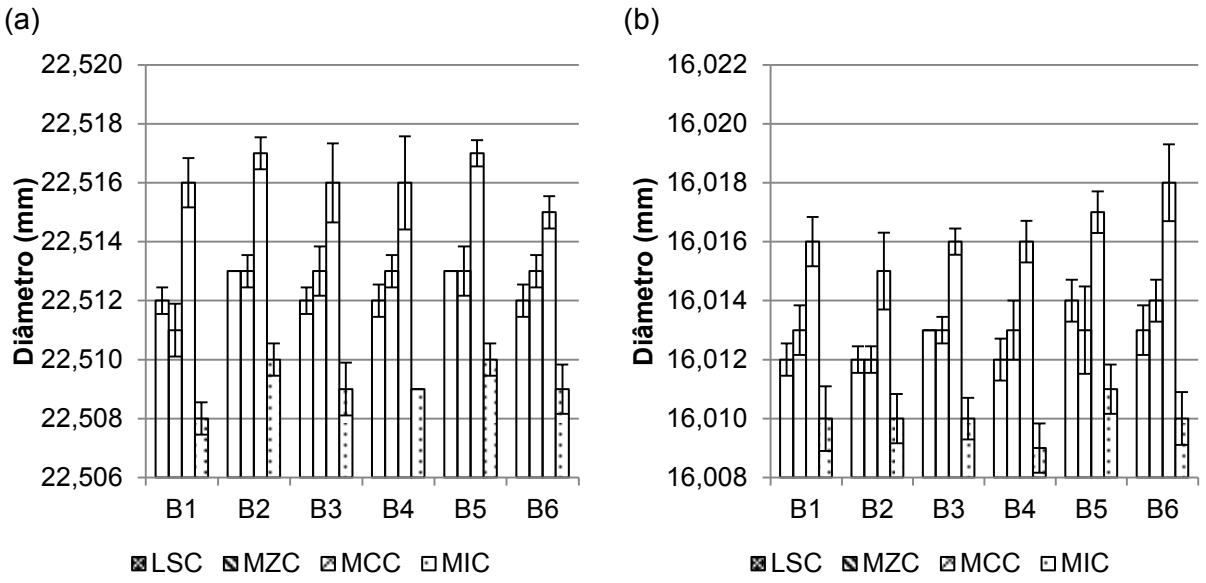


Figura 4.11 – Valores do diâmetro (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal, usinados em seis blocos de compressor hermético.

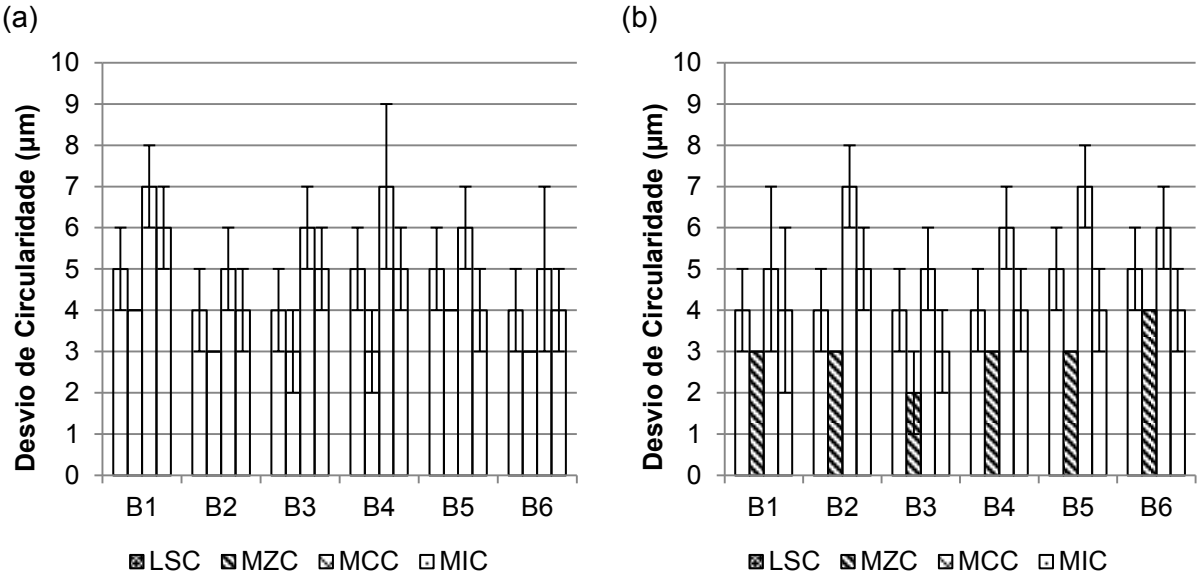


Figura 4.12 – Valores do desvio de circularidade (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal, usinados em seis blocos de compressor hermético.

Tabela 4.4 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal (continua).

(a)

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
Bloco 1	Método	3	0,000169	0,000056	112,37	0,000
	Erro	16	0,000008	0,000000		
	Total	19	0,000177			
Bloco 2	Método	3	0,000097	0,000032	143,63	0,000
	Erro	16	0,000004	0,000000		
	Total	19	0,000101			
Bloco 3	Método	3	0,000097	0,000032	36,95	0,000
	Erro	16	0,000014	0,000001		
	Total	19	0,000111			
Bloco 4	Método	3	0,000123	0,000041	52,73	0,000
	Erro	16	0,000012	0,000001		
	Total	19	0,000135			
Bloco 5	Método	3	0,000130	0,000043	144,17	0,000
	Erro	16	0,000005	0,000000		
	Total	19	0,000135			
Bloco 6	Método	3	0,000096	0,000032	80,33	0,000
	Erro	16	0,000006	0,000000		
	Total	19	0,000103			

Tabela 4.4 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal (continuação).

(b)

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
Bloco 1	Método	3	0,000104	0,000035	47,91	0,000
	Erro	16	0,000012	0,000001		
	Total	19	0,000116			
Bloco 2	Método	3	0,000075	0,000025	35,50	0,000
	Erro	16	0,000011	0,000001		
	Total	19	0,000086			
Bloco 3	Método	3	0,000084	0,000028	124,74	0,000
	Erro	16	0,000004	0,000000		
	Total	19	0,000088			
Bloco 4	Método	3	0,000118	0,000039	58,35	0,000
	Erro	16	0,000011	0,000001		
	Total	19	0,000129			
Bloco 5	Método	3	0,000098	0,000033	33,56	0,000
	Erro	16	0,000016	0,000001		
	Total	19	0,000114			
Bloco 6	Método	3	0,000172	0,000057	62,04	0,000
	Erro	16	0,000015	0,000001		
	Total	19	0,000187			

Tabela 4.5 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal (continua).

(a)

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
Bloco 1	Método	3	16,95	5,6500	9,42	0,000
	Erro	16	9,60	0,600		
	Total	19	26,55			
Bloco 2	Método	3	15,00	5,0000	11,76	0,000
	Erro	16	6,80	0,4250		
	Total	19	21,80			
Bloco 3	Método	3	12,95	4,3167	5,95	0,006
	Erro	16	11,60	0,7250		
	Total	19	24,55			
Bloco 4	Método	3	29,35	9,783	6,11	0,006
	Erro	16	25,60	1,600		
	Total	19	54,95			
Bloco 5	Método	3	12,95	4,3167	5,95	0,006
	Erro	16	11,60	0,7250		
	Total	19	24,55			
Bloco 6	Método	3	16,95	5,6503	9,40	0,000
	Erro	16	9,61	0,600		
	Total	19	26,56			

Tabela 4.5 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade (a) do furo do cilindro e (b) do furo do mancal (continuação).

(b)

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
Bloco 1	Método	3	35,70	11,9162	15,84	0,000
	Erro	16	11,95	0,7500		
	Total	19	47,70			
Bloco 2	Método	3	44,95	14,9833	22,20	0,000
	Erro	16	10,80	0,6750		
	Total	19	55,75			
Bloco 3	Método	3	28,95	9,650	9,65	0,001
	Erro	16	16,00	1,000		
	Total	19	44,95			
Bloco 4	Método	3	35,75	11,9167	15,89	0,000
	Erro	16	12,00	0,7500		
	Total	19	47,75			
Bloco 5	Método	3	44,95	14,983	14,27	0,000
	Erro	16	16,80	1,050		
	Total	19	61,75			
Bloco 6	Método	3	9,750	3,2500	7,65	0,002
	Erro	16	6,800	0,4250		
	Total	19	16,550			

Nas Figuras 4.11 e 4.12 observa-se que os resultados obtidos na medição do diâmetro e do desvio de circularidade do cilindro e do furo do mancal seguem a mesma tendência daqueles apresentados nas Fig. 4.9 e 4.10, respectivamente. Tem-se que os maiores valores de desvio de circularidade foram obtidos pelo método de ajuste MCC, e os menores valores pelo método MZC. Conforme esperado, a diferença entre os resultados obtidos por estes métodos foi menor quando comparada com aquela obtida na medição das peças de alumínio, uma vez que estes furos apresentam melhor exatidão dimensional e geométrica. Esta diferença assume o valor máximo de 3 μm para o cilindro (bloco B5) e de 4 μm para o furo do mancal (bloco B4).

Quanto à repetibilidade (95% de confiabilidade), para ambos os furos e na maioria dos blocos o método MZC mostrou-se o mais preciso. Por outro lado, a menor precisão foi de 4 μm para os métodos MCC e MIC, na medição do cilindro do bloco 1, e também de 4 μm para o método MCC na medição do furo do mancal dos blocos 4 e 6, sendo a incerteza expandida de 3 μm, para k igual a 2,00 (95% de probabilidade de abrangência), em ambos os casos. Os demais valores de U seguiram a tendência do desvio-padrão experimental.

4.2. Resultados da fabricação e calibração do artefato-padrão PLAFAMA

A Figura 4.13 mostra o artefato-padrão PLAFAMA fabricado. O padrão teve um custo total de R$ 5680,00, sendo R$ 500,00 de material, R$ 5000,00 de usinagem e R$ 180,00 da calibração.



Figura 4.13 – Artefato-padrão PLAFAMA.

No procedimento de medição para a calibração da PLAFAMA, os diâmetros foram calibrados nos eixos *X* e *Y*, em três posições, como apresentado no certificado de calibração (Anexo 12). A Tab. 4.6 apresenta os valores de diâmetro médio obtidos na calibração do artefato, sendo este definido como a média entre o valor convencional do diâmetro no eixo *X* e no eixo *Y*, na posição 2. A coordenada *Z* desta posição é a mesma utilizada nos ensaios realizados nas quatro MMCs, na medição dos furos. Para o cálculo da incerteza expandida foi utilizado o modelo matemático mostrado na Eq. (4.3), e posteriormente aplicada a lei de propagação da incerteza neste modelo, obtendo-se a Eq. (4.4).

$$D_{MÉDIO} = \frac{D_x}{D_Y} \tag{4.3}$$

$$u_c^2(D_{MÉDIO}) = \left(\frac{\partial D_{MÉDIO}}{\partial D_X}\right)^2 .(u_{D_X})^2 + \left(\frac{\partial D_{MÉDIO}}{\partial D_Y}\right)^2 .(u_{D_Y})^2 \tag{4.4}$$

Tabela 4.6 – Valores médios de diâmetro e incerteza expandida obtidos na calibração da PLAFAMA (probabilidade de abrangência de 95%).

Furo	Diâmetro médio (mm)	*U* (mm)	*k*
10 H4	10,0029	0,0015	2,00
10 H7	10,0079	0,0015	2,00
10 H9	10,0148	0,0015	2,00
15 H4	15,0013	0,0015	2,00
15 H7	15,0089	0,0015	2,00
15 H9	15,0173	0,0015	2,00
25 H4	25,0219	0,0015	2,00
25 H7	25,0097	0,0015	2,00
25 H9	25,0242	0,0015	2,00
35 H4	35,0050	0,0015	2,00
35 H7	35,0143	0,0015	2,00
35 H9	35,0376	0,0015	2,00

Pode-se observar na Tab. 4.6 que o diâmetro do furo 25 H4 está fora da tolerância dimensional de projeto, uma vez que a dimensão máxima admissível é de 25,006 mm para a classe de tolerância especificada. Este fato pode ser atribuído a erros decorrentes da fabricação, em particular do processo de lapidação, uma vez que esta operação é realizada manualmente. Considerando a impossibilidade de efetuar retrabalhos neste furo, bem como a de fabricar outro padrão devido aos altos custos envolvidos, optou-se por desconsiderar a linha de furos com diâmetro nominal de 25 mm, excluindo-os de todas as análises que serão realizadas deste ponto em diante.

Quanto aos demais furos, os valores de diâmetro médio obtidos na calibração, na posição 2, foram tomados como referência, sendo considerados, portanto, como valores convencionais (*VC*).

4.3. Resultados da aplicação do artefato-padrão PLAFAMA para avaliação dos métodos de ajuste em MMCs

A partir dos resultados obtidos da aplicação do artefato-padrão PLAFAMA, para a avaliação dos métodos de ajuste implementados nas MMCs Zeiss, Hexagon, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM, observou-se que de todas as geometrias avaliadas (diâmetro, desvio de circularidade, desvio de cilindricidade, desvio de posição, desvio de retitude, desvio de perpendicularidade e desvio de paralelismo) os valores médios foram estatisticamente

diferentes apenas para as características diâmetro, desvio de circularidade e desvio de cilindricidade. Observou-se, ainda, que os valores fornecidos de desvio de cilindricidade apresentaram comportamento similar àqueles do desvio de circularidade.

Por estes motivos, a seguir são apresentados somente os resultados obtidos na medição do diâmetro e do desvio de circularidade. Nos Apêndices 2 e 3 são mostrados os valores das demais características medidas na MMC Zeiss, e os resultados da análise de variância.

4.3.1. Resultados da medição do diâmetro na MMC Zeiss

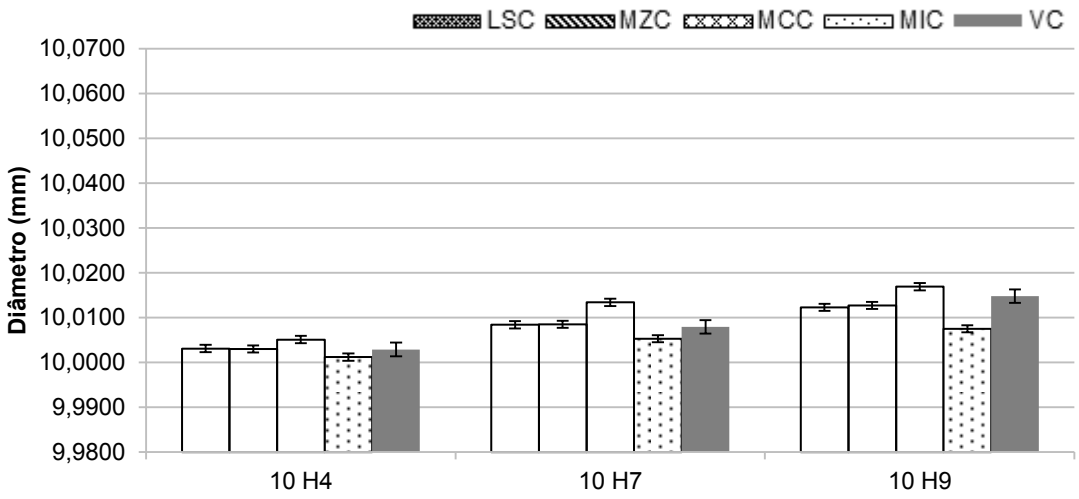
Os resultados obtidos na medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA nas quatro máquinas de medir por coordenadas, considerando os diferentes métodos de ajuste utilizados, são mostrados por meio de gráficos. Estes exibem os valores médios de diâmetro, os valores convencionais obtidos na calibração do artefato e a incerteza expandida (probabilidade de abrangência de 95%), apresentada pela barra de erro.

A Figura 4.14 mostra os resultados das medições do diâmetro dos furos obtidos na MMC Zeiss. Observa-se que a diferença obtida pelos métodos MCC e MIC apresenta tendência crescente à medida que a qualidade dos furos diminui, sendo que as menores diferenças foram obtidas para os furos com classe de tolerância H4. Por sua vez, os métodos LSC e MZC forneceram valores similares para todas as tolerâncias-padrão e diâmetros nominais considerados. Este resultado está condizente com o princípio matemático de cada método e se repete para todas as MMCs avaliadas.

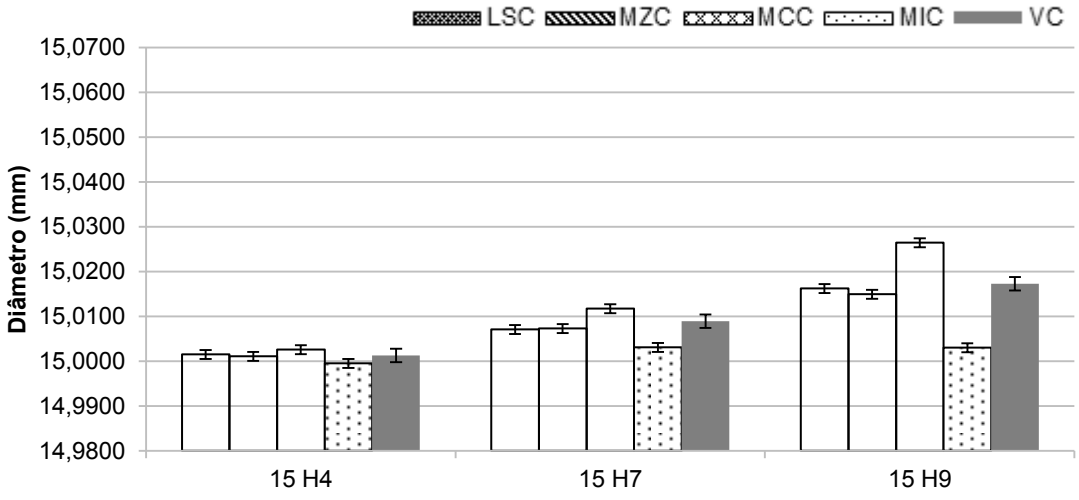
Com relação à exatidão, observa-se na Fig. 4.15 que há uma tendência dos métodos MIC e MCC apresentarem valores crescentes de erro à medida que eleva-se o grau de tolerância-padrão. Nota-se também que quando o grau de tolerância-padrão aumenta, o valor da diferença entre o erro fornecido pelos métodos MCC e MIC cresce, sendo esta diferença mais acentuada para os furos com diâmetro nominal de 15 mm e 35 mm.

Os métodos LSC e MZC apresentaram valores de erros sistemáticos similares, mostrando-se para a maioria dos furos como os métodos mais exatos. Em contrapartida, com exceção dos furos 10 H4 e 10 H7, o método menos exato foi o MIC, exibindo os maiores erros que, para todos os furos, assumiram valores negativos, indicando que os diâmetros médios obtidos por este método foram menores que o valor convencional. Este erro assumiu o valor máximo de -7 µm, -14 µm e -33 µm para os furos 10 H9, 15 H9 e 35 H9, respectivamente.

(a)



(b)



(c)

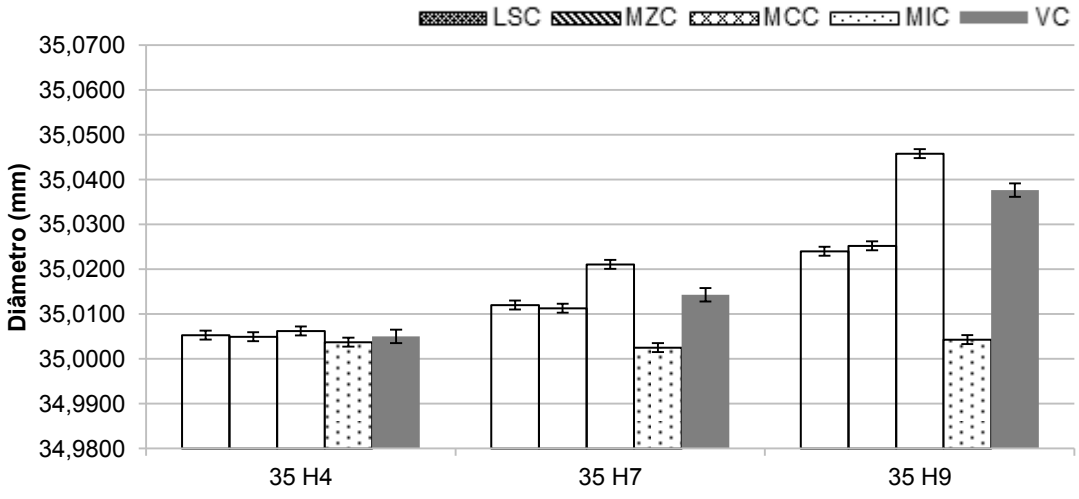


Figura 4.14 – Valores de diâmetro médio obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss.

Quanto à repetibilidade (95% de confiabilidade) dos valores de diâmetro fornecidos pelos diferentes métodos de ajuste, representada na Fig. 4.15 pela barra de erro, observa-se que a MMC Zeiss possui uma boa precisão, exibindo baixos valores de desvio-padrão associado, não apresentando nenhuma tendência definida.

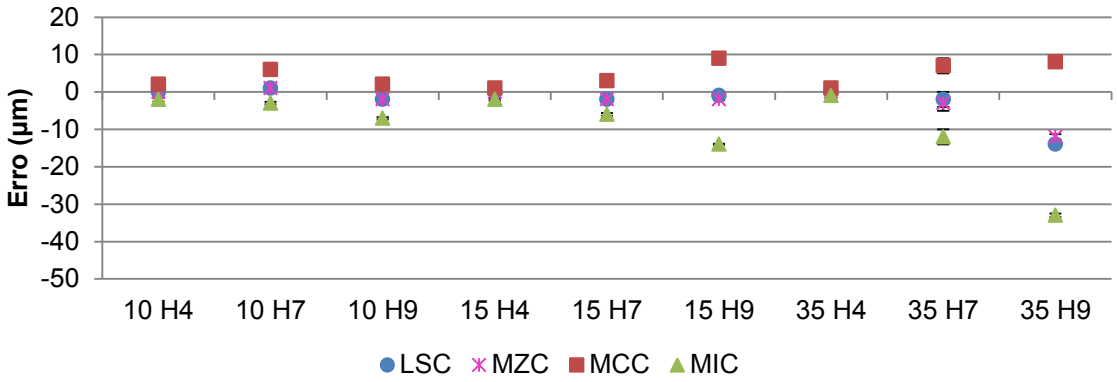


Figura 4.15 – Valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC Zeiss.

A incerteza expandida associada às medições apresenta-se constante para os furos com mesmo diâmetro nominal, assumindo o valor de 0,8 µm (diâmetro nominal de 10 mm) e 1,0 µm (diâmetros nominais de 15 mm e 35 mm), para k = 1,97 e probabilidade de abrangência de 95%. A componente que mais contribuiu para a incerteza final da medição, em todos os casos, foi a incerteza associada à calibração da MMC Zeiss.

Para uma análise detalhada sobre a incerteza expandida e seus efeitos na zona de especificação é apresentada a Fig. 4.16, onde a área destacada em cor cinza indica a zona de conformidade. Observa-se que a incerteza expandida associada às medições teve maior impacto no controle dimensional dos furos IT4, que são aqueles que apresentam tolerâncias mais estreitas. Nota-se ainda que para todos os furos os valores médios de diâmetro obtidos pelos métodos de ajuste LSC e MZC estão dentro da zona de conformidade, o que permite atribuir aos furos, nessas condições, a qualidade de aprovados. Por outro lado, embora na maioria dos casos os métodos MCC e MIC também apresentem valores de diâmetro dentro da zona de conformidade, estes exibem a tendência de extrapolar os limites especificados.

Em uma aplicação prática, o controle dimensional de um furo 35 H7 na MMC Zeiss, pelo método MIC, por exemplo, pode resultar em peças rejeitadas, uma vez que este método de ajuste tende a fornecer valores que se aproximam do limite inferior da zona de conformidade.

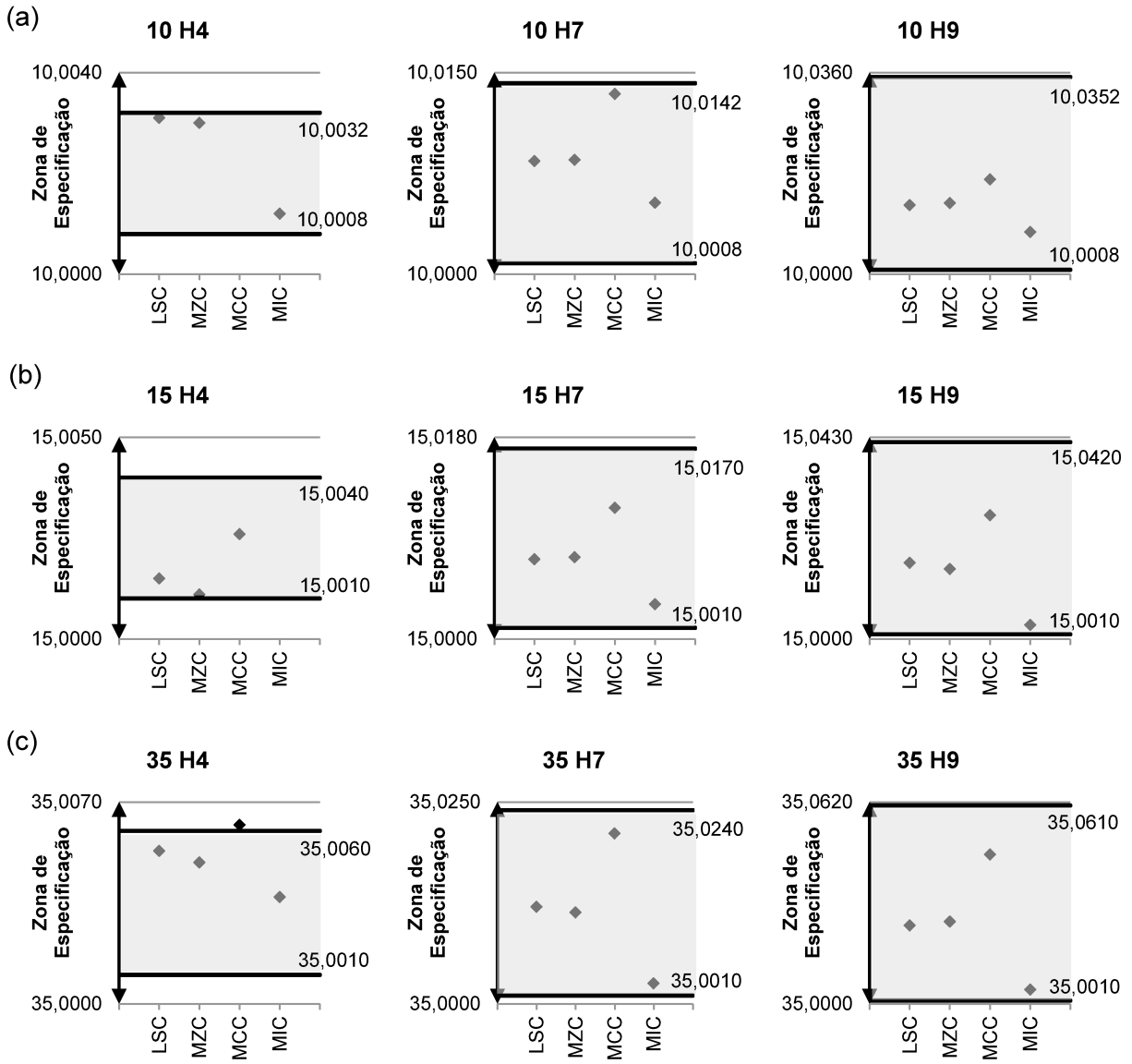


Figura 4.16 – Representação das zonas de especificação e de conformidade dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss.

A Tabela 4.7 apresenta os valores, em porcentagem, da redução da zona de especificação (tolerância dimensional) em função da incerteza expandida, para todos os furos. Observa-se que a incerteza expandida reduziu a zona de especificação em até 40%, 11% e 5% para os furos com grau de tolerância-padrão IT4, IT7 e IT9, respectivamente. Cabe aqui ressaltar que a MMC Zeiss atende ao critério que estabelece que a resolução deve ser menor ou igual a um décimo da tolerância da peça, sendo, portanto, adequada para a medição de todos os furos da PLAFAMA.

Tabela 4.7 – Porcentagem da redução da zona de especificação dimensional dos furos medidos na MMC Zeiss.

Dimensão nominal (mm)	Classe de tolerância		
	H4	H7	H9
10	40%	11%	4%
15	40%	11%	5%
35	29%	8%	3%

A Tabela 4.8 apresenta os resultados da análise de variância para a medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Zeiss. Considerando um nível de confiança de 95%, o valor *p* indica que em todos os casos o fator método de ajuste afeta significativamente os valores de diâmetro dos furos.

Tabela 4.8 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro efetuadas na MMC Zeiss.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Método	3	0,000073	0,000024	723,53	0,000
	Erro	36	0,000001	0,000000		
	Total	39	0,000074			
10 H7	Método	3	0,000331	0,000110	3284,28	0,000
	Erro	36	0,000001	0,000000		
	Total	39	0,000333			
10 H9	Método	3	0,000442	0,000147	12229,63	0,000
	Erro	36	0,000000	0,000000		
	Total	39	0,000443			
15 H4	Método	3	0,000051	0,000017	1232,44	0,000
	Erro	36	0,000000	0,000000		
	Total	39	0,000052			
15 H7	Método	3	0,000370	0,000123	4564,75	0,000
	Erro	36	0,000001	0,000000		
	Total	39	0,000371			
15 H9	Método	3	0,003667	0,001222	125724,69	0,000
	Erro	36	0,000000	0,000000		
	Total	39	0,003667			
35 H4	Método	3	0,000033	0,000011	532,76	0,000
	Erro	36	0,000001	0,000000		
	Total	39	0,000034			
35 H7	Método	3	0,001980	0,000660	7604,40	0,000
	Erro	36	0,000003	0,000000		
	Total	39	0,001983			
35 H9	Método	3	0,008642	0,002881	26637,12	0,000
	Erro	36	0,000004	0,000000		
	Total	39	0,008645			

A Figura 4.17 apresenta os resultados do teste de Tukey da diferença de médias do diâmetro para o fator método de ajuste. Quando se faz a comparação entre pares de níveis do fator, observa-se que não há diferença significativa apenas entre os valores médios de diâmetro obtidos pelos métodos de ajuste LSC e MZC, para os furos 10 H4, 10 H7 e 15 H7.

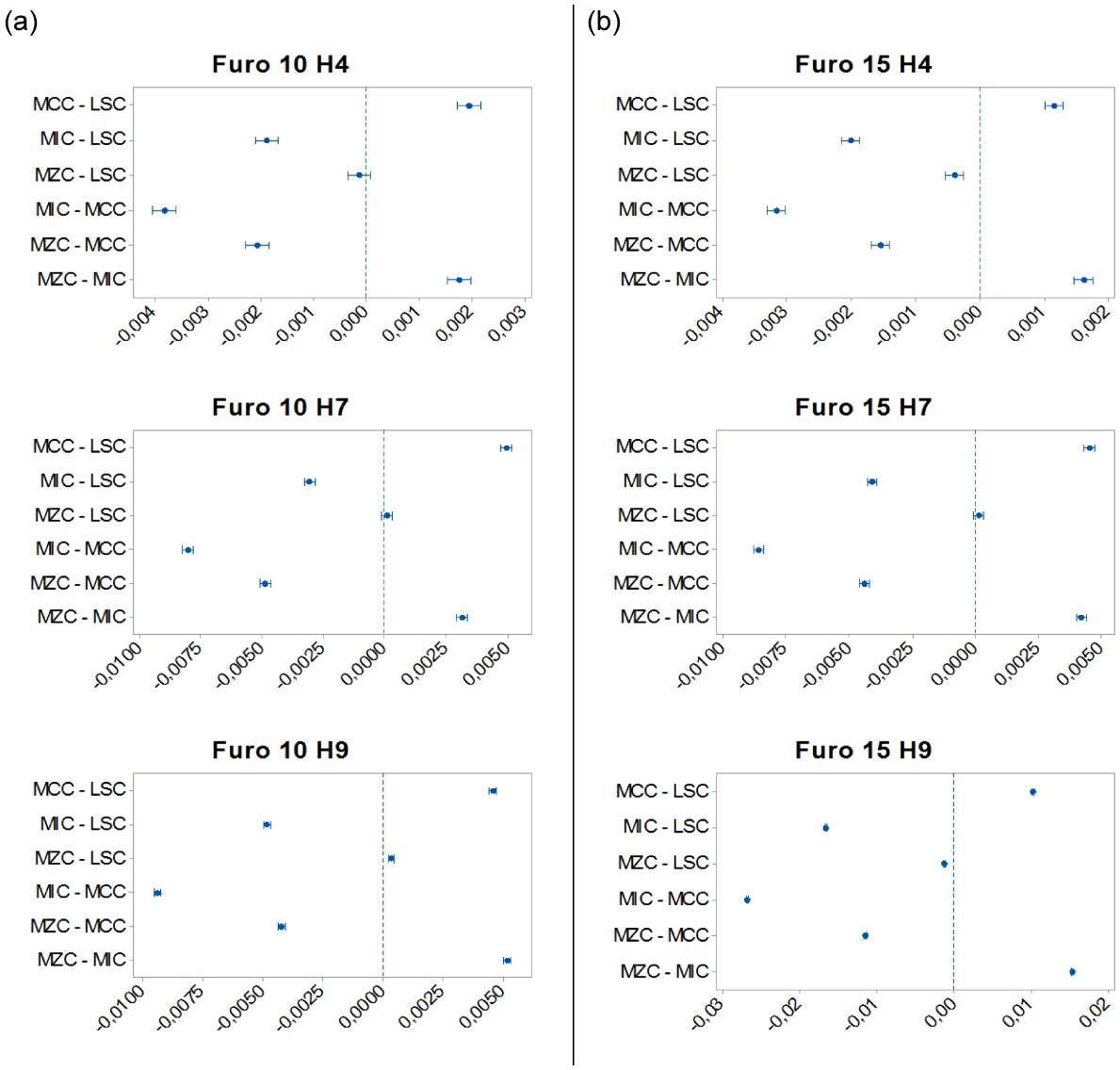


Figura 4.17 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss (continua).

(c)

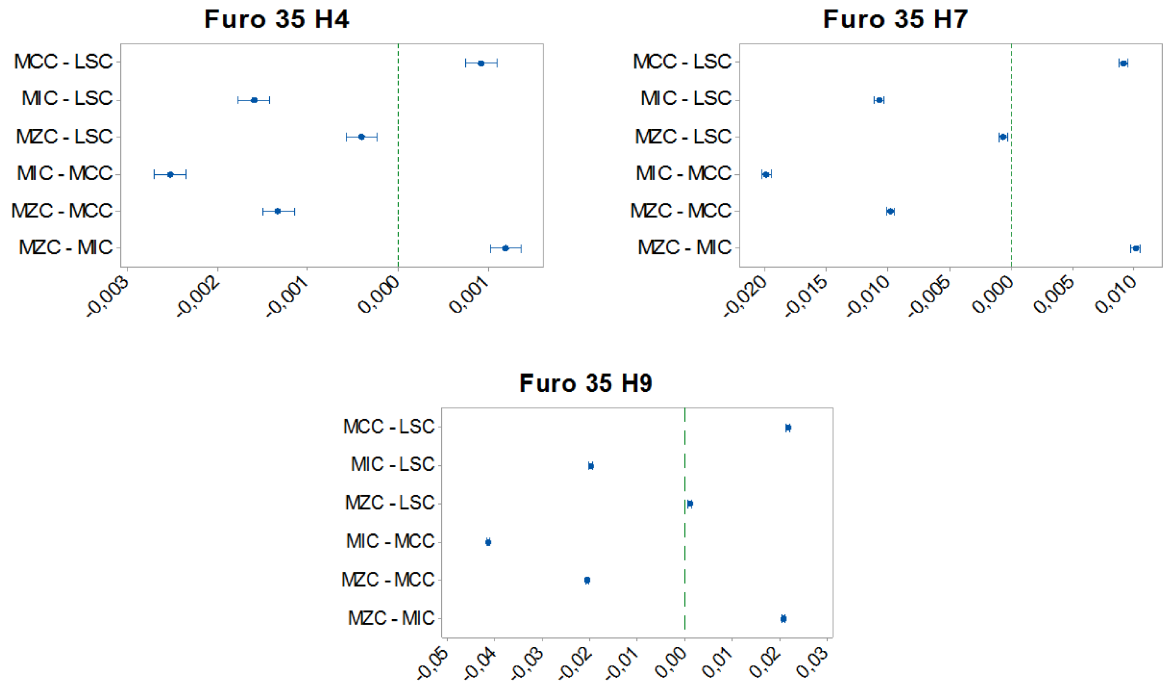


Figura 4.17 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss (continuação).

4.3.2. Resultados da medição do diâmetro na MMC Hexagon

A Figura 4.18 apresenta os resultados obtidos na medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Hexagon, para os diferentes métodos de ajuste. Nota-se que esta máquina apresenta tendência de fornecer valores de diâmetro menores que o valor convencional, exibindo erros negativos, exceto para o método de ajuste MCC. O método MIC, por sua vez, é o que mais se afasta deste valor.

A incerteza expandida associada às medições é de 6 µm para todos os casos (k = 2,00 e probabilidade de abrangência de 95%). A componente que mais contribuiu para a incerteza final da medição foi a incerteza associada à calibração da máquina. Para uma análise detalhada sobre a incerteza expandida e seus efeitos na zona de especificação é apresentada a Fig. 4.19, onde a área destacada em cor cinza indica a zona de conformidade.

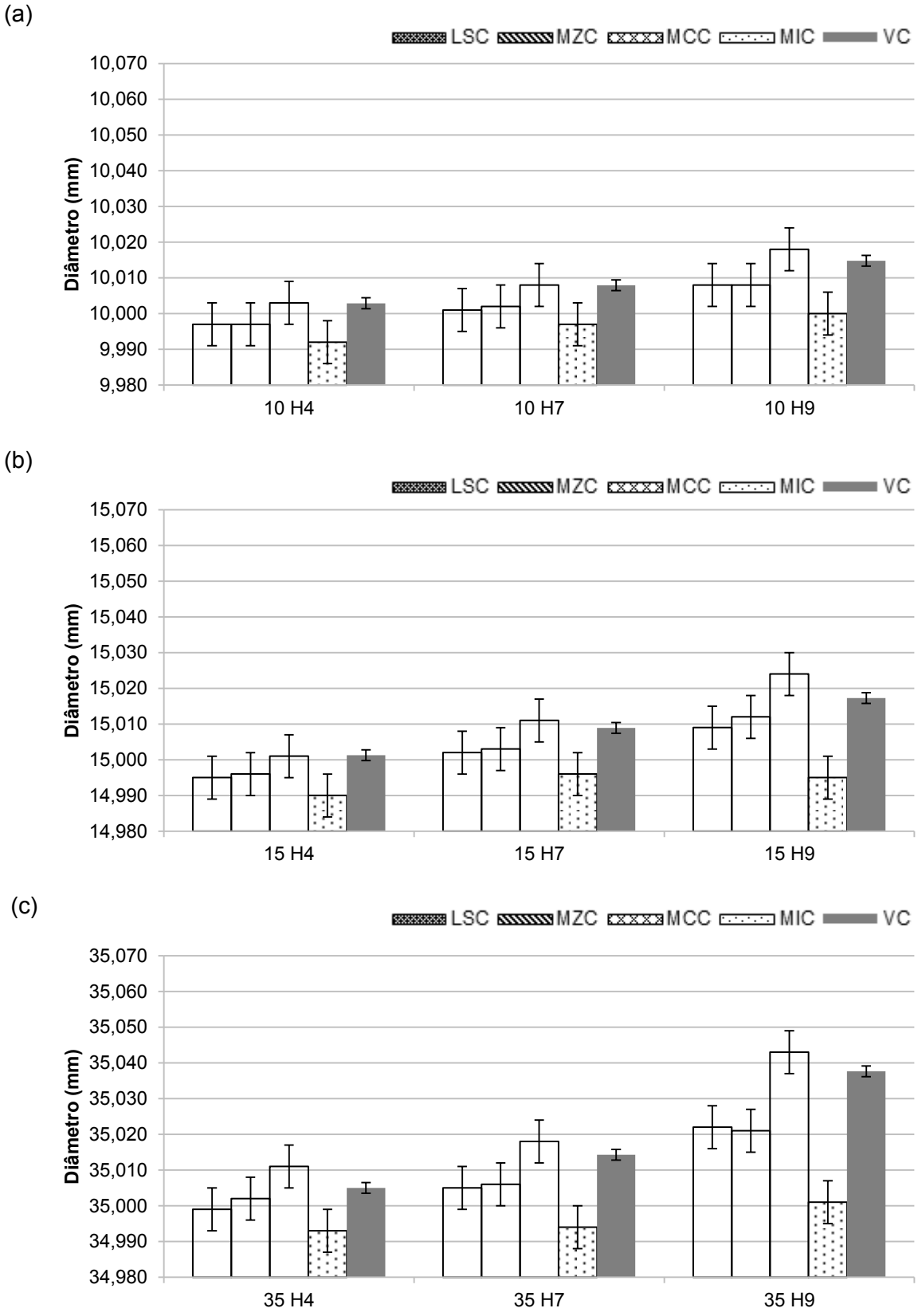


Figura 4.18 – Valores de diâmetro médio obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, na MMC Hexagon.

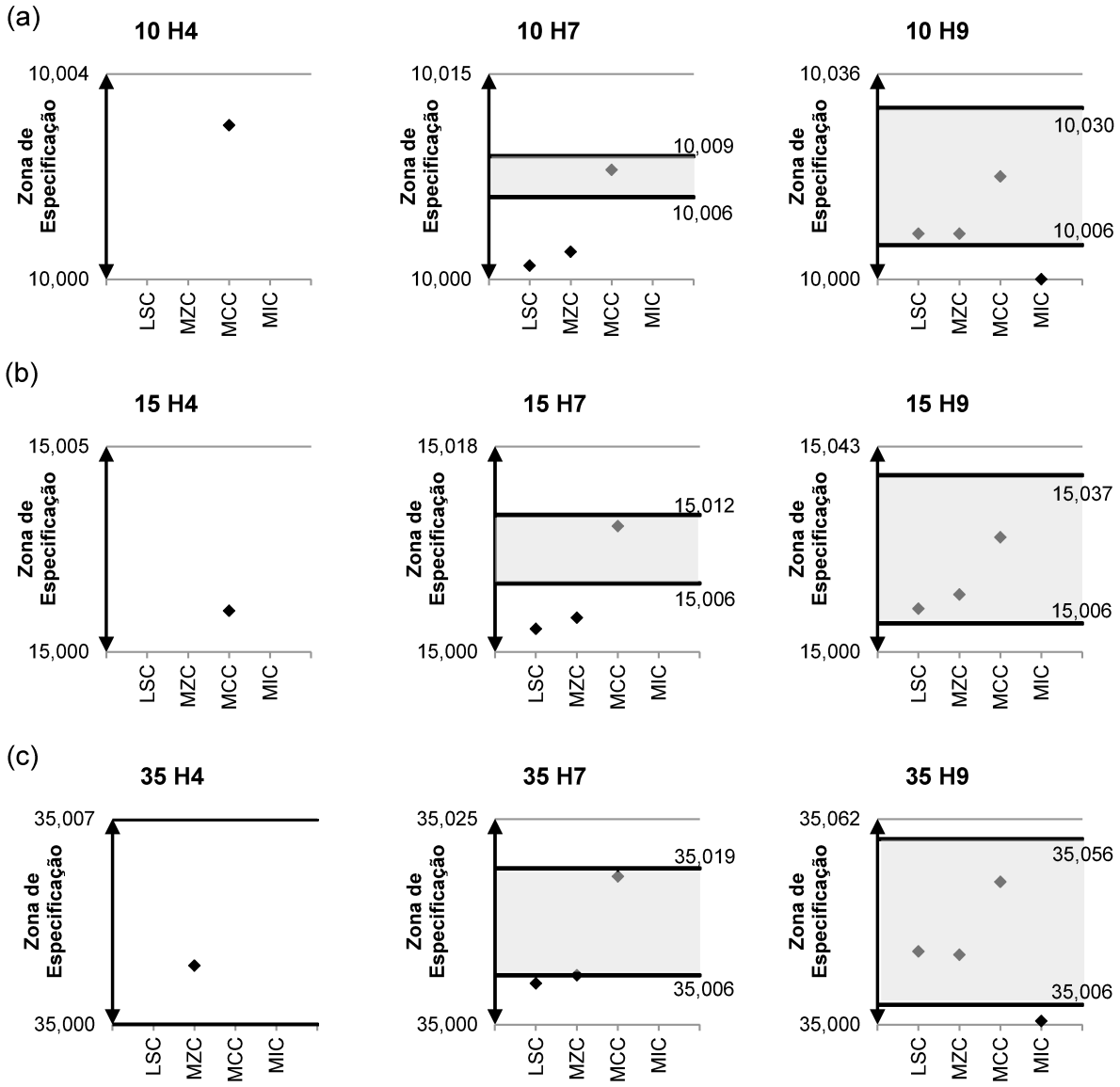


Figura 4.19 – Representação das zonas de especificação e de conformidade dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Hexagon.

Observa-se na Figura 4.19 que os furos com grau de tolerância-padrão IT4 não apresentam zona de conformidade. Embora a resolução da máquina seja adequada para a medição destes furos, o alto valor de incerteza expandida compromete a qualidade dos resultados. Para todos os furos com grau de tolerância-padrão IT7 e IT9, os valores médios de diâmetro obtidos pelo método MIC estão fora da zona de conformidade. Por sua vez, os valores fornecidos pelo método MCC mostram-se dentro desta zona, porém, particularmente para os furos IT7, tendem a exceder o limite superior. Os valores obtidos pelos métodos LSC e MZC estão fora da zona de conformidade para os furos IT7, com exceção do furo 35 H7 para o método MZC. Para os furos com grau de tolerância-padrão IT9, embora os

valores fornecidos por estes métodos estejam dentro da zona de conformidade, estes apresentam tendência de aproximação do limite inferior.

Considerando a exatidão dos resultados obtidos na medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Hexagon, observa-se na Fig. 4.20 que os erros decorrentes das medições realizadas nesta máquina são maiores que aqueles obtidos na MMC Zeiss e apresentam comportamento similar a estes (Fig. 4.15). Este erro assumiu o valor máximo de -15 µm, -22 µm e -37 µm para os furos 10 H9, 15 H9 e 35 H9, respectivamente. O método MCC foi o mais exato, e o MIC o menos exato. Quanto à repetibilidade (95% de confiabilidade), observa-se que a MMC Hexagon exibe baixos valores de desvio-padrão, não apresentando nenhuma tendência definida.

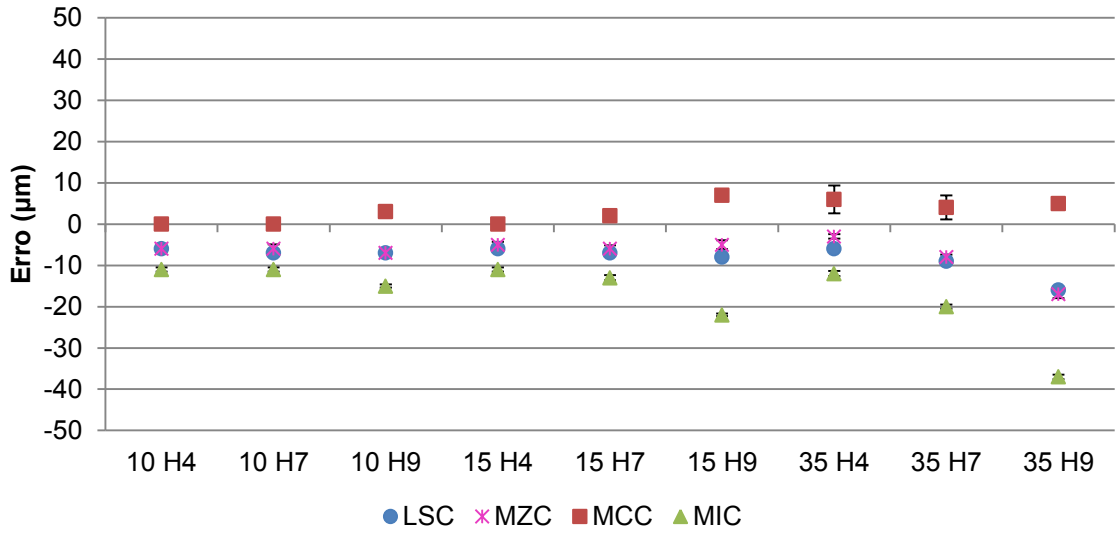


Figura 4.20 – Valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC Hexagon.

A Tabela 4.9 apresenta os valores, em porcentagem, da redução da zona de especificação (tolerância) em função da incerteza expandida, para todos os furos.

Tabela 4.9 – Porcentagem da redução da zona de especificação dimensional dos furos medidos na MMC Hexagon.

Dimensão nominal (mm)	Classe de Tolerância		
	H4	H7	H9
10	300%	80%	33%
15	240%	67%	28%
35	171%	48%	19%

A Tabela 4.10 mostra os resultados da análise de variância para a medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Hexagon. O valor *p* indica que em todos os casos o fator método de ajuste afeta significativamente os valores de diâmetro dos furos, considerando um nível de confiança de 95%.

Tabela 4.10 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro efetuadas na MMC Hexagon.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	0,000549	0,000183	299,51	0,000
	Erro	36	0,000022	0,000001		
	Total	39	0,000571			
10 H7	Fator	3	0,000684	0,000228	359,79	0,000
	Erro	36	0,000023	0,000001		
	Total	39	0,000706			
10 H9	Fator	3	0,001649	0,000550	1328,11	0,000
	Erro	36	0,000015	0,000000		
	Total	39	0,001664			
15 H4	Fator	3	0,000614	0,000205	478,21	0,000
	Erro	36	0,000015	0,000000		
	Total	39	0,000629			
15 H7	Fator	3	0,001152	0,000384	794,62	0,000
	Erro	36	0,000017	0,000000		
	Total	39	0,001170			
15 H9	Fator	3	0,004339	0,001446	2527,51	0,000
	Erro	36	0,000021	0,000001		
	Total	39	0,004360			
35 H4	Fator	3	0,001579	0,000526	171,84	0,000
	Erro	36	0,000110	0,000003		
	Total	39	0,001690			
35 H7	Fator	3	0,002985	0,000995	435,75	0,000
	Erro	36	0,000082	0,000000		
	Total	39	0,003067			
35 H9	Método	3	0,009161	0,003054	4758,90	0,000
	Erro	36	0,000023	0,000001		
	Total	39	0,009184			

A Figura 4.21 apresenta os resultados do teste de Tukey. Pode-se observar que apenas para os furos com diâmetro nominal 10 mm e 35 mm os valores médios de diâmetro obtidos pelos métodos de ajuste LSC e MZC não são estatisticamente diferentes.

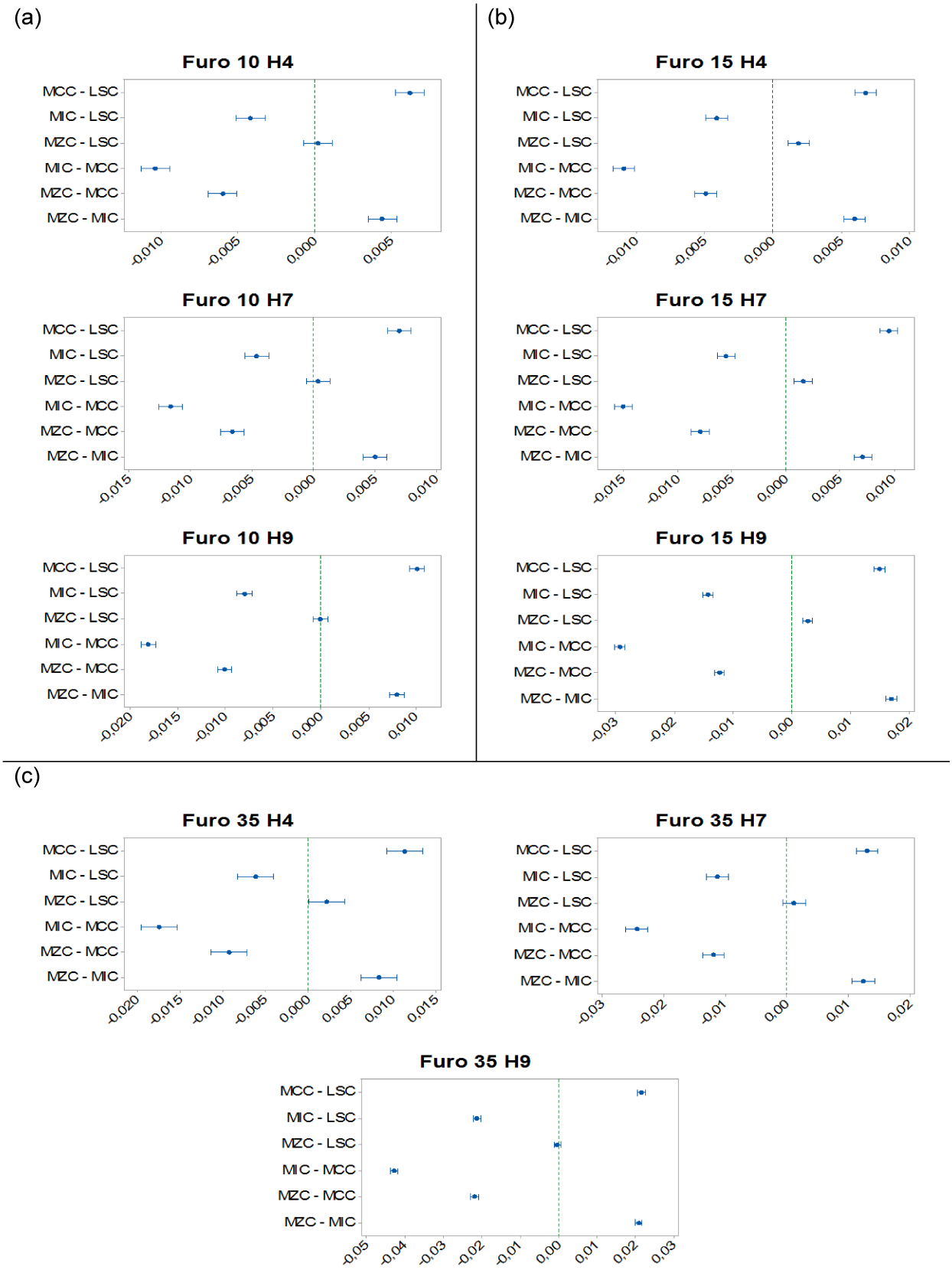
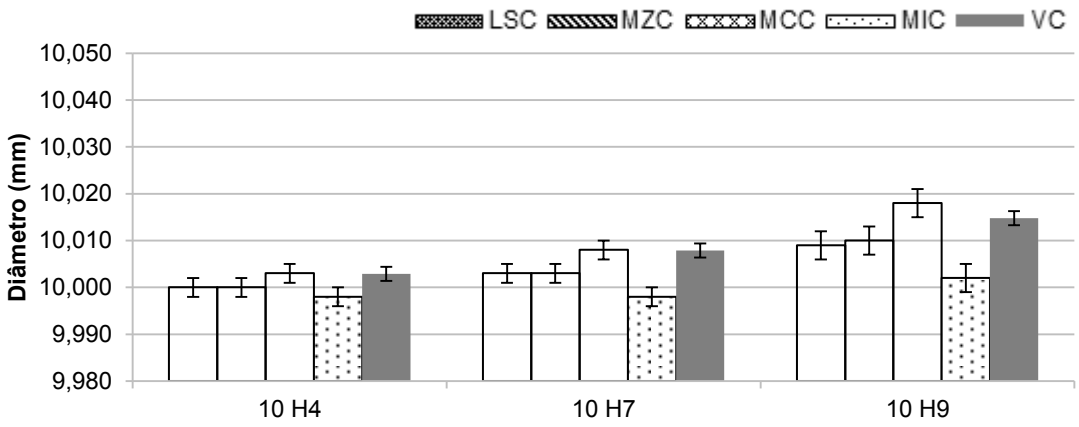


Figura 4.21 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Hexagon.

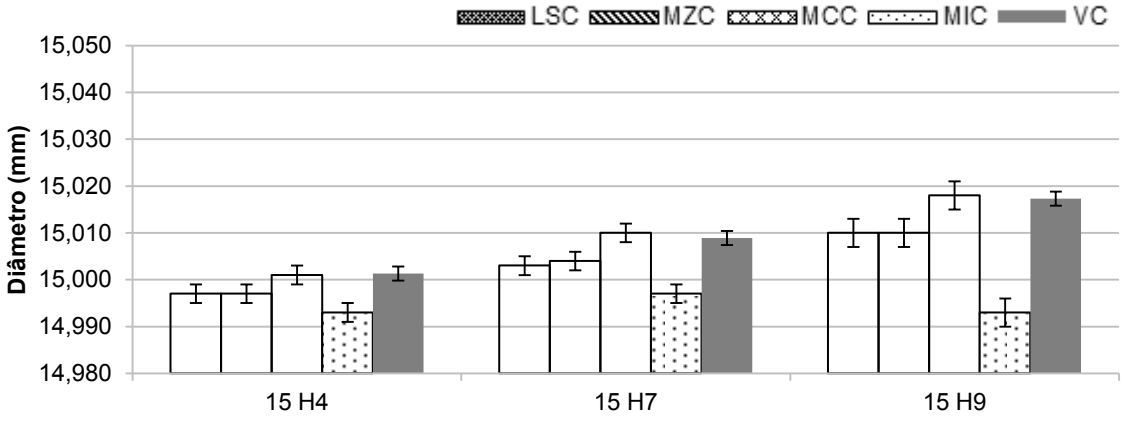
4.3.3. Resultados da medição do diâmetro na MMC Mitutoyo BR

A Figura 4.22 apresenta os resultados obtidos na medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Mitutoyo BR, para os diferentes métodos de ajuste.

(a)



(b)



(c)

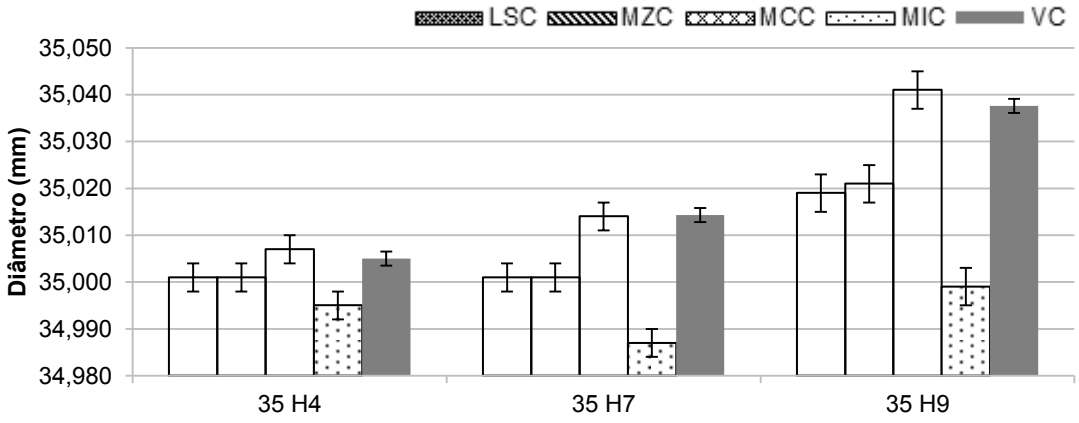


Figura 4.22 – Valores de diâmetro médio obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, na MMC Mitutoyo BR.

Observa-se na Fig. 4.22 que a MMC Mitutoyo BR apresenta tendência de fornecer valores de diâmetro menores que o valor convencional, exibindo erros negativos, exceto para o método de ajuste MCC. Este afastamento é mais acentuado para o método MIC. Também para esta máquina os valores fornecidos pelos métodos de ajuste LSC e MZC são similares.

Considerando a exatidão dos resultados obtidos na medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Mitutoyo BR, observa-se na Fig. 4.23 que os erros decorrentes das medições realizadas nesta máquina apresentam comportamento similar àqueles obtidos nas MMCs Zeiss (Fig. 4.15) e Hexagon (Fig. 4.20). Para a MMC Mitutoyo BR o método MCC forneceu os menores valores de erro sistemático, sendo, portanto, o mais exato.

Com relação à repetibilidade (95% de confiabilidade), nota-se que para todos os métodos de ajuste há uma tendência de aumento do desvio-padrão à medida que o grau de tolerância-padrão torna-se maior. Os valores máximos de desvio-padrão foram obtidos para os diâmetros ajustados pelos métodos MIC e MCC, que assumiram o valor de 7 µm para os furos 15 H9 e 35 H9.

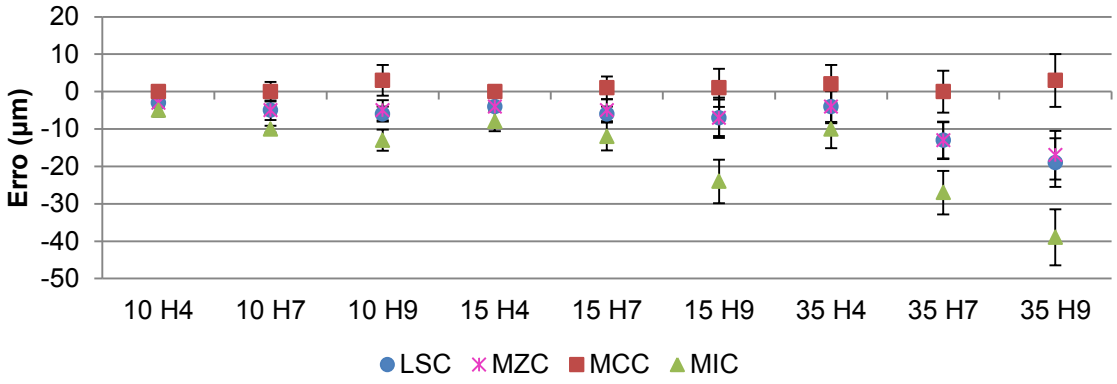


Figura 4.23 – Valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC Mitutoyo BR.

A incerteza expandida associada às medições é maior em 50% para os furos com qualidade IT9, assumindo o valor de 3 µm para os furos 10 H9 e 15 H9, e de 4 µm para o furo 35 H9, para k = 2,00 e probabilidade de abrangência de 95%. A componente que mais contribuiu para a incerteza final da medição, em todos os casos, foi a incerteza associada à variabilidade das leituras.

Para uma análise detalhada sobre a incerteza expandida e seus efeitos na zona de especificação é apresentada a Fig. 4.24, onde a área destacada em cor cinza indica a zona de conformidade.

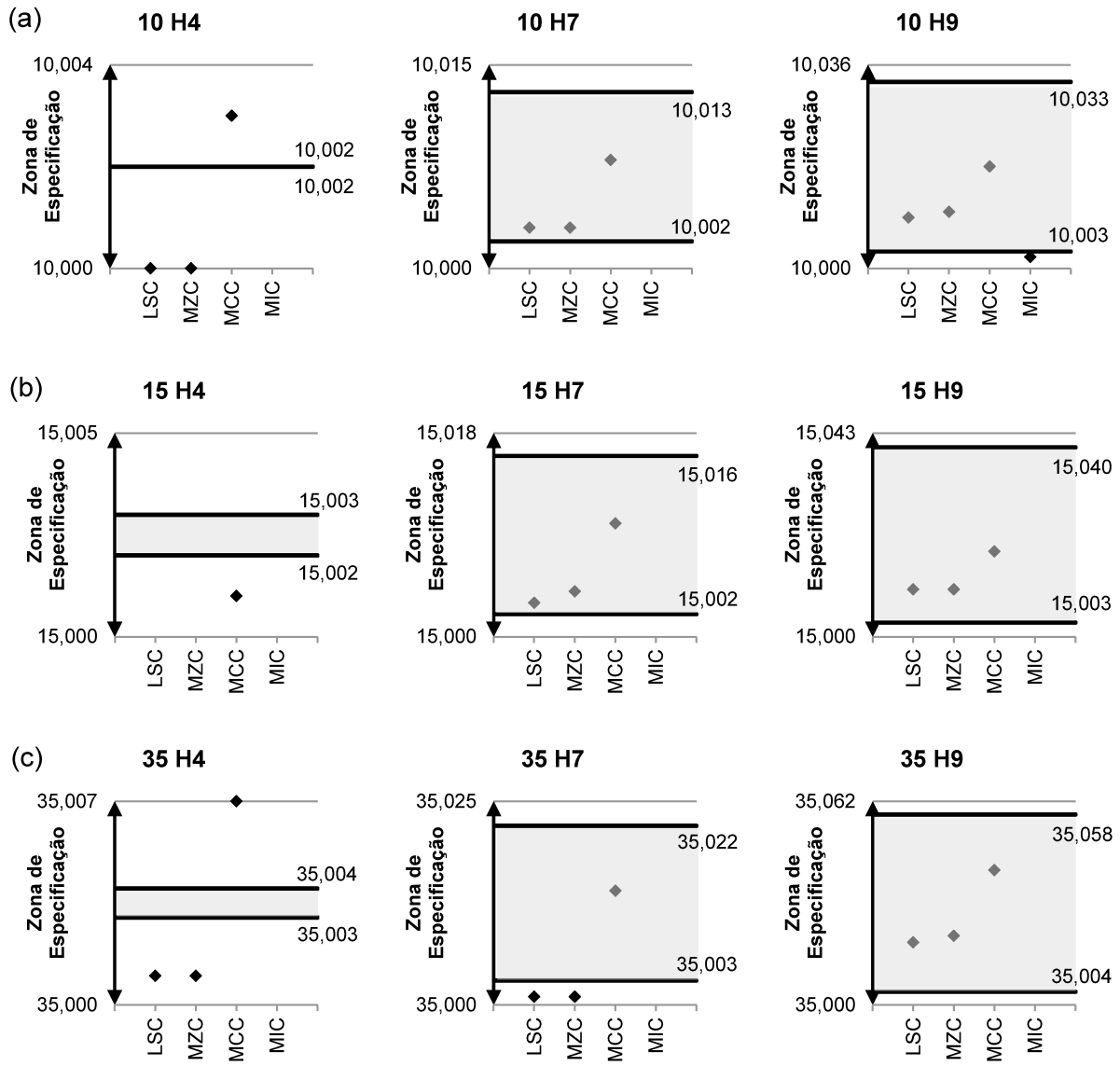


Figura 4.24 – Representação das zonas de especificação e de conformidade dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo BR.

Observa-se na Figura 4.24 que o furo 10 H4 não apresenta zona de conformidade, uma vez que a incerteza expandida multiplicada por dois é maior que a zona de especificação. Para os furos 15 H4 e 35 H4, os diâmetros médios obtidos pelos quatro métodos de ajuste estão fora da zona de conformidade. Estes resultados eram esperados, uma vez que a MMC Mitutoyo BR não é adequada para a medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA com grau de tolerância-padrão IT4, pois, nestes casos, a resolução da máquina é maior que um décimo da tolerância dimensional especificada.

Para todos os furos com grau de tolerância-padrão IT7 e IT9, nota-se na Fig. 4.24 que os valores médios de diâmetro obtidos pelo método MIC estão fora da zona de conformidade, enquanto que aqueles fornecidos pelo método MCC mostram-se dentro desta

zona. Os valores obtidos pelos métodos LSC e MZC apresentam uma tendência de aproximação do limite inferior, estando fora da zona de conformidade para o furo 35 H7.

A Tabela 4.11 apresenta os valores, em porcentagem, da redução da zona de especificação (tolerância) em função da incerteza expandida, para todos os furos.

Tabela 4.11 – Porcentagem da redução da zona de especificação dimensional dos furos medidos na MMC Mitutoyo BR.

Dimensão nominal (mm)	Classe de Tolerância		
	H4	H7	H9
10	100%	27%	17%
15	80%	22%	14%
35	86%	24%	13%

A Tabela 4.12 mostra os resultados da análise de variância para a medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Mitutoyo BR. O valor *p* indica que em todos os casos o fator método de ajuste afeta significativamente os valores de diâmetro dos furos.

Tabela 4.12 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro efetuadas na MMC Mitutoyo BR (nível de confiança de 95%).

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	0,000053	0,000018	37,33	0,000
	Erro	16	0,000008	0,000000		
	Total	19	0,000061			
10 H7	Fator	3	0,000271	0,000090	92,77	0,000
	Erro	16	0,000016	0,000001		
	Total	19	0,000287			
10 H9	Fator	3	0,000660	0,000220	97,81	0,000
	Erro	16	0,000036	0,000002		
	Total	19	0,000696			
15 H4	Fator	3	0,000137	0,000046	73,17	0,000
	Erro	16	0,000010	0,000001		
	Total	19	0,000147			
15 H7	Fator	3	0,000451	0,000150	66,81	0,000
	Erro	16	0,000036	0,000002		
	Total	19	0,000487			
15 H9	Fator	3	0,002998	0,000999	103,02	0,000
	Erro	16	0,000155	0,000010		
	Total	19	0,003153			
35 H4	Fator	3	0,000360	0,000120	282,35	0,000
	Erro	16	0,000007	0,000000		
	Total	19	0,000367			
35 H7	Fator	3	0,001773	0,000591	213,02	0,000
	Erro	16	0,000044	0,000003		
	Total	19	0,001818			
35 H9	Fator	3	0,004506	0,001502	138,44	0,000
	Erro	16	0,000174	0,000011		
	Total	19	0,004680			

A Figura 4.25 apresenta os resultados do teste de Tukey, onde pode-se observar que em todos os casos apenas os valores médios de diâmetro obtidos pelos métodos de ajuste LSC e MZC não são estatisticamente diferentes.

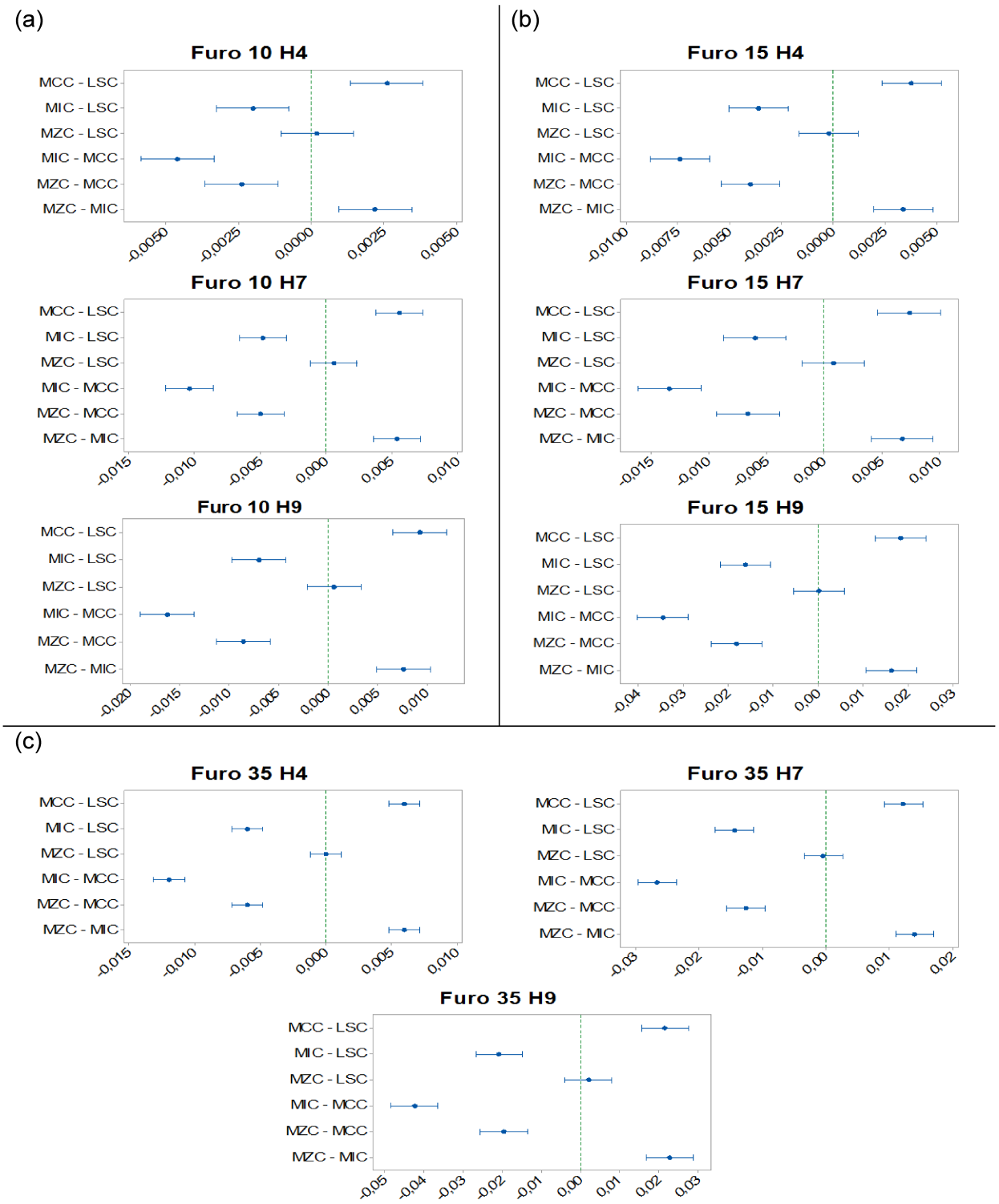


Figura 4.25 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo BR.

4.3.4. Resultados da medição do diâmetro na MMC Mitutoyo QM

A Figura 4.26 mostra os resultados obtidos na medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Mitutoyo QM, e a Figura 4.27 apresenta os valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade).

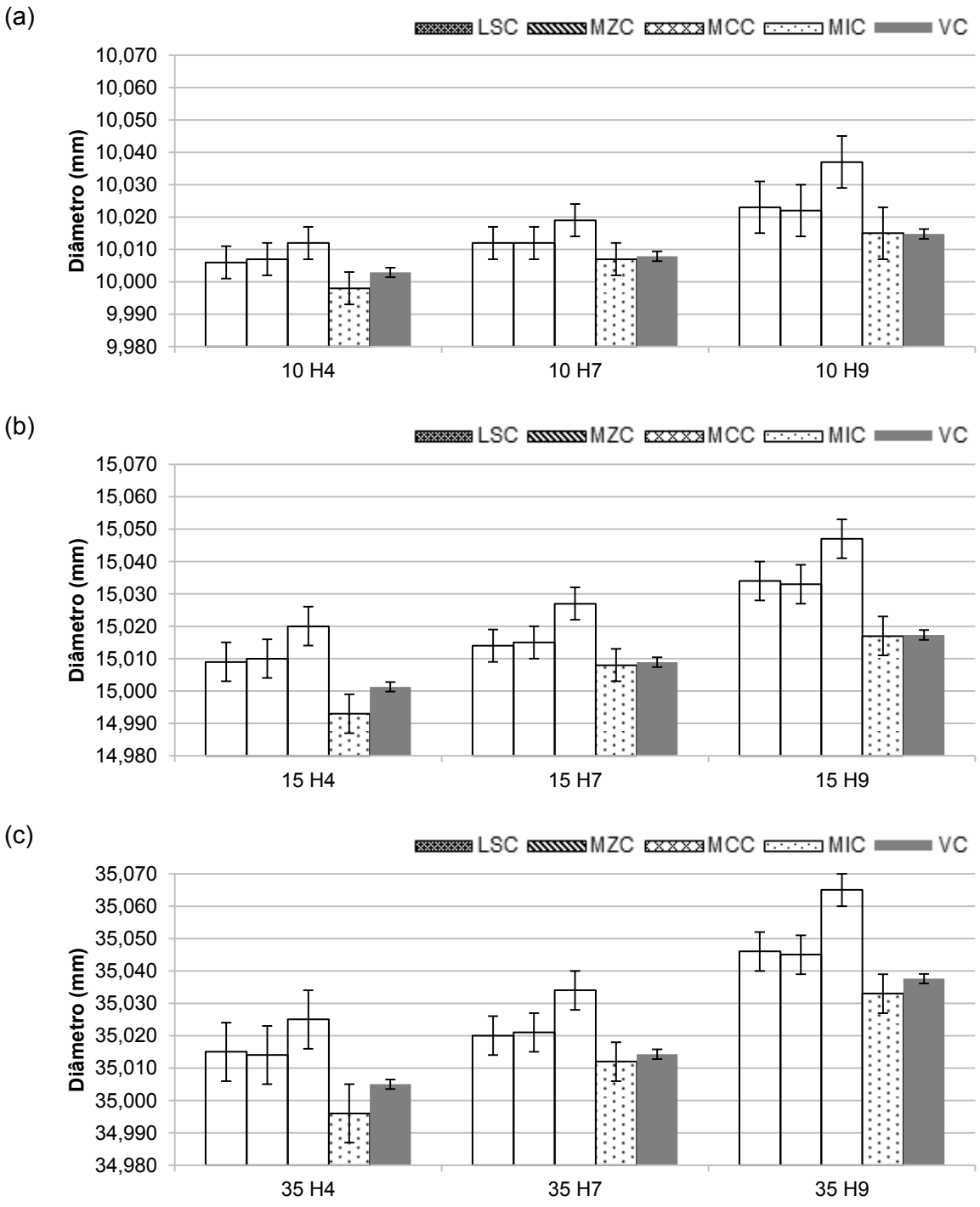


Figura 4.26 – Valores de diâmetro médio obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, na MMC Mitutoyo QM.

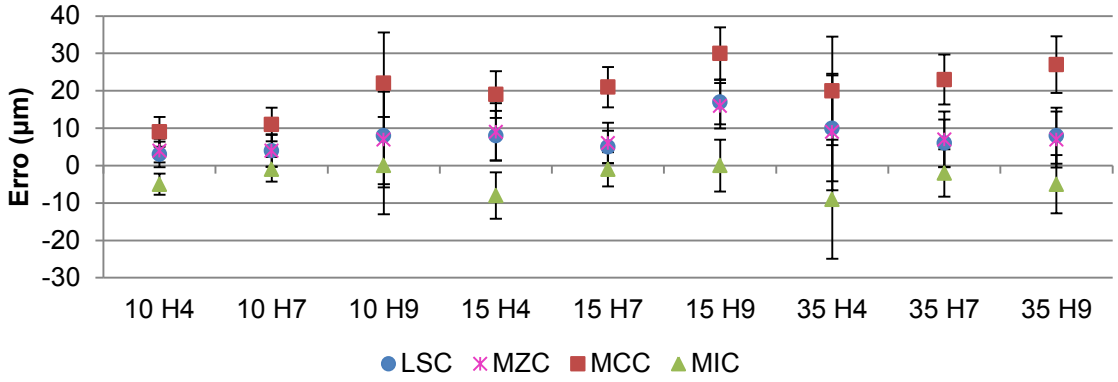


Figura 4.27 – Valores do erro de medição e do desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC Mitutoyo QM.

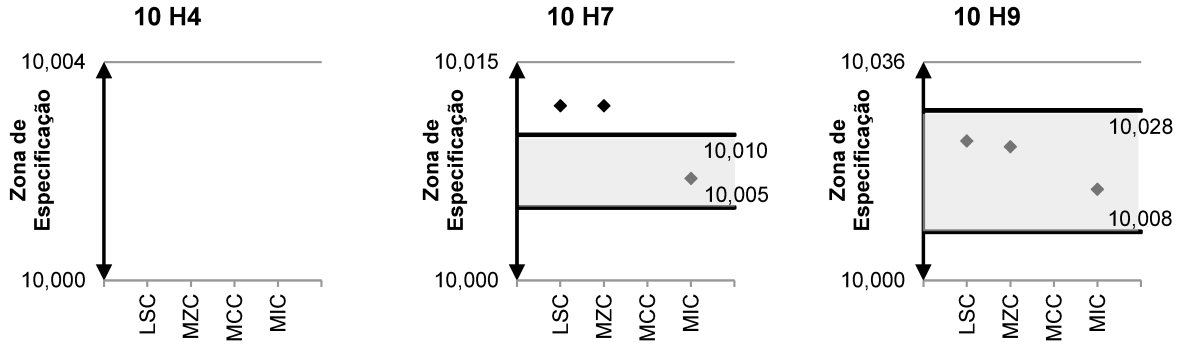
Analisando-se a exatidão dos resultados, observa-se nas Fig. 4.26 e 4.27 que a MMC Mitutoyo QM apresenta tendência de fornecer valores médios de diâmetro maiores que o valor convencional, exceto para o método MIC. Este comportamento metrológico da máquina torna mais exato o método MIC, enquanto que o MCC é o menos exato. Para o mesmo diâmetro nominal, nota-se na Fig. 4.27 que para o método MCC o erro de medição apresenta valores similares para os furos com grau de tolerância-padrão IT4 e IT7, e aumenta significativamente o seu valor dos furos IT7 para os furos IT9. Em contrapartida, para o método MIC os valores de erro são maiores para os furos com classe de tolerância H4, e menores e similares para os furos H7 e H9. Também para esta máquina os métodos LSC e MZC apresentaram valores de erros sistemáticos (tendência) e exatidão similares.

Concernente à repetibilidade (95% de confiabilidade) dos valores de diâmetro fornecidos pelos diferentes métodos de ajuste, representada na Fig. 4.27 pela barra de erro, observa-se que não há nenhuma tendência definida. Dentre as máquinas avaliadas, a MMC Mitutoyo QM foi a que apresentou menor precisão.

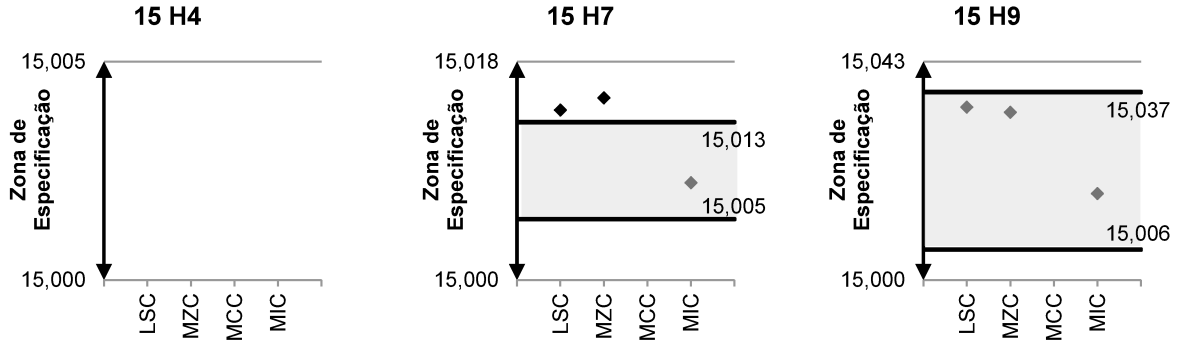
Considerando a incerteza expandida e seus efeitos na zona de especificação, é apresentada a Fig. 4.28, onde a área destacada em cor cinza indica a zona de conformidade. A componente que mais contribuiu para a incerteza final da medição, em todos os casos, foi a incerteza associada à variabilidade das leituras.

Observa-se na Fig. 4.28 que todos os furos com grau de tolerância-padrão IT4 não apresentam zona de conformidade. Assim como a MMC Mitutoyo BR, esta máquina não é adequada para a medição do diâmetro destes furos. Para os furos com grau de tolerância-padrão IT7, apenas os valores médios de diâmetro obtidos pelo método de ajuste MIC estão dentro da zona de conformidade, enquanto que para os furos IT9 os métodos de ajuste LSC, MZC e MIC fornecem valores adequados, o que permite atribuir aos furos, nessas condições, a qualidade de aprovados.

(a)



(b)



(c)

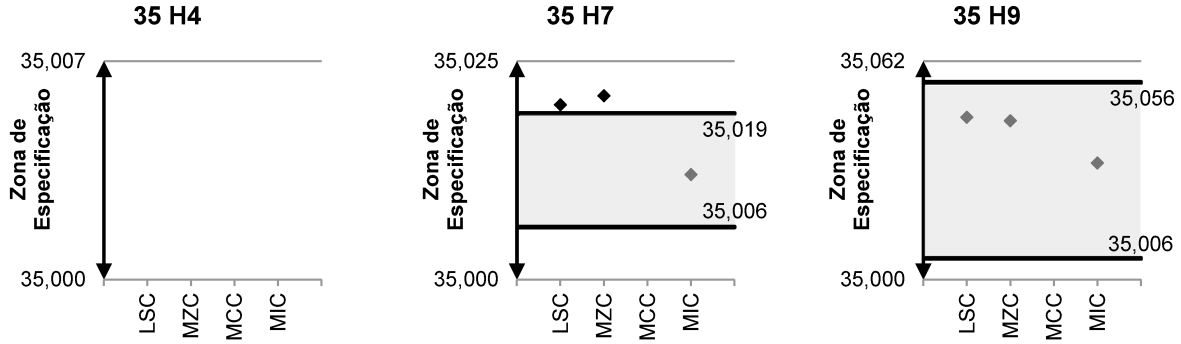


Figura 4.28 – Representação das zonas de especificação e de conformidade dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo QM.

A Tabela 4.13 apresenta os valores, em porcentagem, da redução da zona de especificação (tolerância) em função da incerteza expandida, para todos os furos. Observa-se que a incerteza expandida reduziu a zona de especificação em até 257%, 67% e 44% para os furos com grau de tolerância-padrão IT4, IT7 e IT9, respectivamente.

Tabela 4.13 – Porcentagem da redução da zona de especificação dimensional dos furos medidos na MMC Mitutoyo QM.

Dimensão nominal (mm)	Classe de Tolerância		
	H4	H7	H9
10	250%	67%	44%
15	240%	56%	28%
35	257%	48%	19%

A Tabela 4.14 apresenta os resultados da análise de variância para a medição do diâmetro dos furos da PLAFAMA na MMC Mitutoyo QM. O valor *p* (95% de confiança) indica que em todos os casos o fator método de ajuste afeta significativamente os valores de diâmetro dos furos.

Tabela 4.14 – Resultados da análise de variância das medições do diâmetro efetuadas na MMC Mitutoyo QM.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	0,001634	0,000545	104,73	0,000
	Erro	16	0,000083	0,000005		
	Total	19	0,001717			
10 H7	Fator	3	0,000446	0,000149	27,02	0,000
	Erro	16	0,000088	0,000005		
	Total	19	0,000534			
10 H9	Fator	3	0,000767	0,000256	5,96	0,006
	Erro	16	0,000687	0,000043		
	Total	19	0,001455			
15 H4	Fator	3	0,001161	0,000387	43,13	0,000
	Erro	16	0,000144	0,000009		
	Total	19	0,001305			
15 H7	Fator	3	0,001541	0,000515	31,76	0,000
	Erro	16	0,000259	0,000016		
	Total	19	0,001800			
15 H9	Fator	3	0,005374	0,001791	60,67	0,000
	Erro	16	0,000472	0,000030		
	Total	19	0,005847			
35 H4	Fator	3	0,002381	0,000794	23,87	0,000
	Erro	16	0,000532	0,000033		
	Total	19	0,002913			
35 H7	Fator	3	0,003008	0,001003	52,83	0,000
	Erro	16	0,000304	0,000019		
	Total	19	0,003311			
35 H9	Método	3	0,004745	0,001582	53,89	0,000
	Erro	16	0,000470	0,000029		
	Total	19	0,005215			

A Figura 4.29 apresenta os resultados do teste de Tukey, onde pode-se observar que em todos os casos apenas os valores médios de diâmetro obtidos pelos métodos de ajuste LSC e MZC não são estatisticamente diferentes.

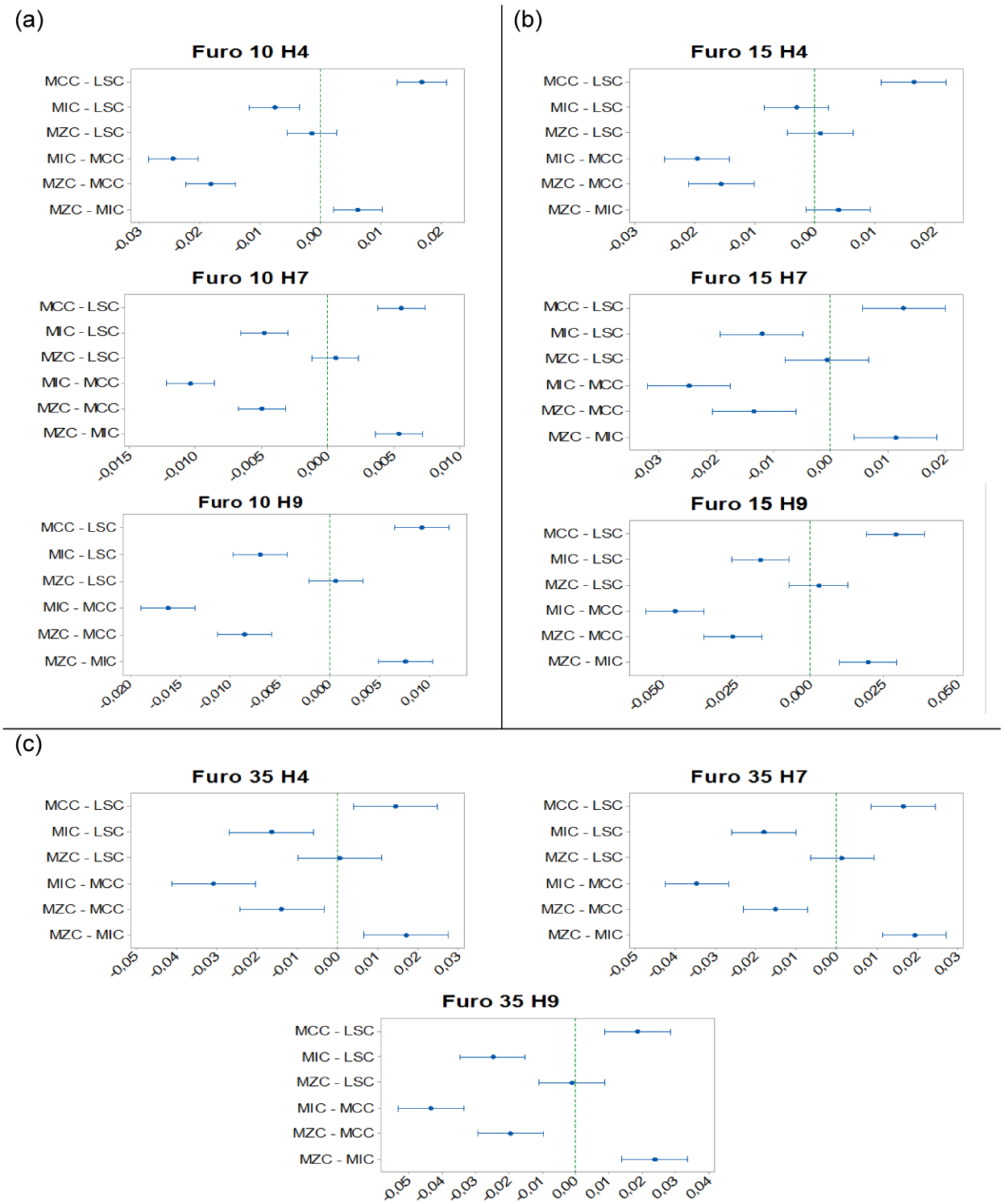


Figura 4.29 – Resultados do teste de Tukey para os níveis do fator método de ajuste dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo QM.

4.3.5. Resultados da medição do desvio de circularidade

As Figuras 4.30 a 4.33 apresentam os resultados obtidos na medição do desvio de circularidade dos furos da PLAFAMA nas MMCs Zeiss, Hexagon, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM, para os diferentes métodos de ajuste. São exibidos também os valores de incerteza expandida (probabilidade de abrangência de 95%), apresentada pela barra de erro.

Observa-se nas Fig. 4.30 a 4.33 que os valores médios de desvio de circularidade apresentaram comportamento similar para as MMCs Zeiss, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM. Para estas máquinas, o método MZC forneceu os menores valores de desvio de circularidade, enquanto que o MCC exibiu os valores máximos. Nota-se ainda que a MMC Mitutoyo QM apresenta maiores valores de desvio de circularidade, para todos os furos, quando comparados com os aqueles fornecidos pelas outras três máquinas avaliadas. Por sua vez, os valores médios de desvio de circularidade fornecidos pela MMC Hexagon não apresentaram comportamento definido.

Os resultados da medição do desvio de circularidade apresentados neste trabalho são coerentes com a norma ISO 1101 (ISO, 2012), que recomenda a utilização do método de mínima zona para a determinação deste desvio de forma, embora, na prática, a maioria dos usuários utiliza o método dos mínimos quadrados.

Considerando a incerteza, os resultados das medições realizadas na MMC Zeiss apresentaram os menores valores de incerteza expandida, sendo que a componente que mais contribuiu para a incerteza final da medição foi a incerteza associada à calibração da máquina. Por sua vez, os resultados obtidos utilizando a MMC Mitutoyo QM foram aqueles com maiores valores de incerteza expandida. A componente que mais contribuiu para a incerteza final dos resultados das medições realizadas na MMC Mitutoyo QM e Mitutoyo BR foi a incerteza associada à variabilidade das leituras. Para a MMC Hexagon, foi a incerteza associada à calibração da máquina.

A Figura 4.34 apresenta os valores de desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos nas quatro máquinas. Quanto à repetibilidade (95% de confiabilidade), observa-se que para as MMCs Zeiss, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM o método MZC foi o que apresentou menores valores de desvio-padrão, sendo, portanto, o mais preciso. Por sua vez, o MCC foi aquele com menor repetibilidade. Nota-se ainda que para as MMCs Mitutoyo BR e Mitutoyo QM o valor do desvio-padrão aumenta à medida que eleva-se o grau de tolerância-padrão, para todos os métodos de ajuste. Para a MMC Hexagon, o desvio-padrão não apresentou comportamento definido.

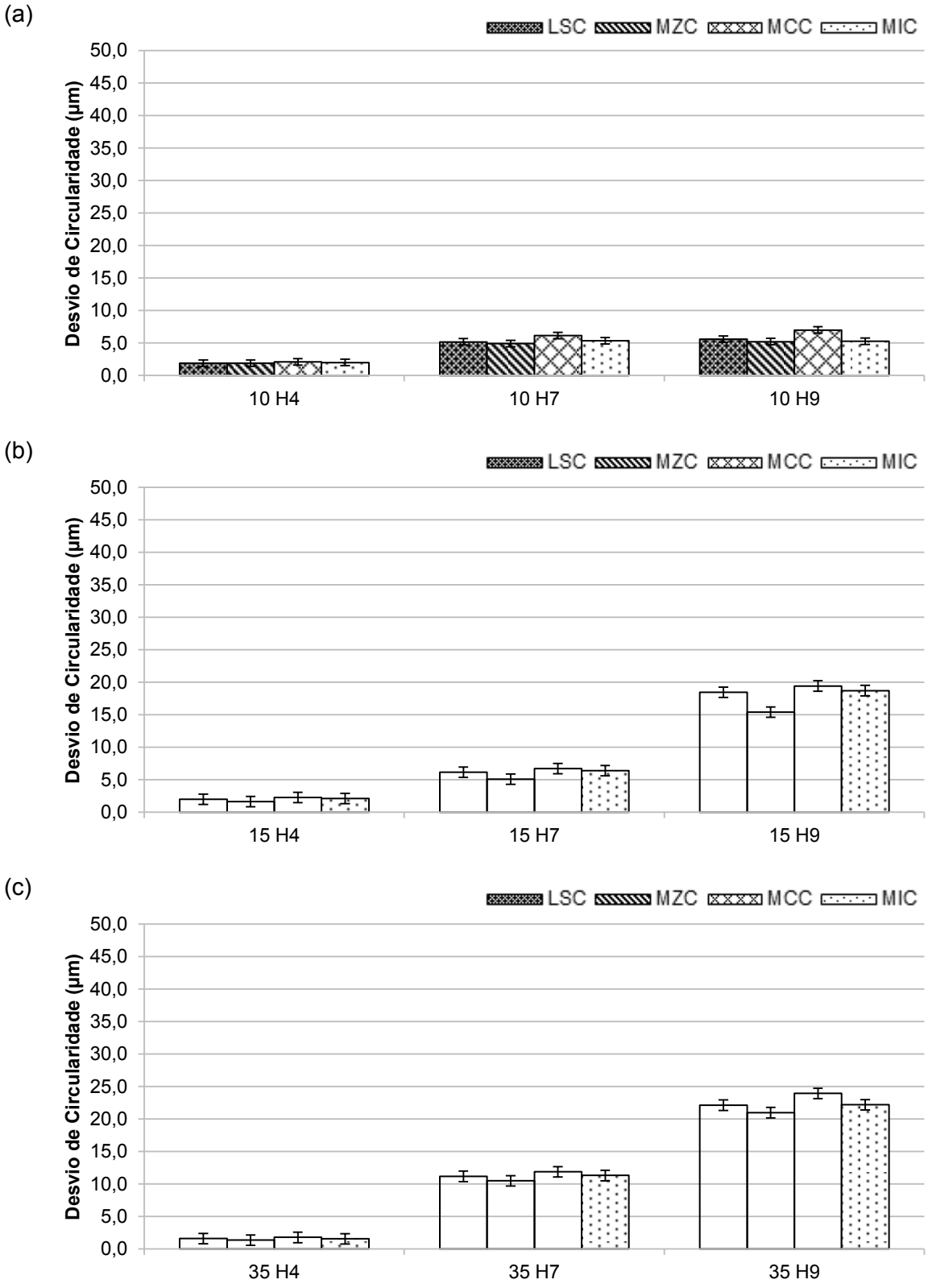
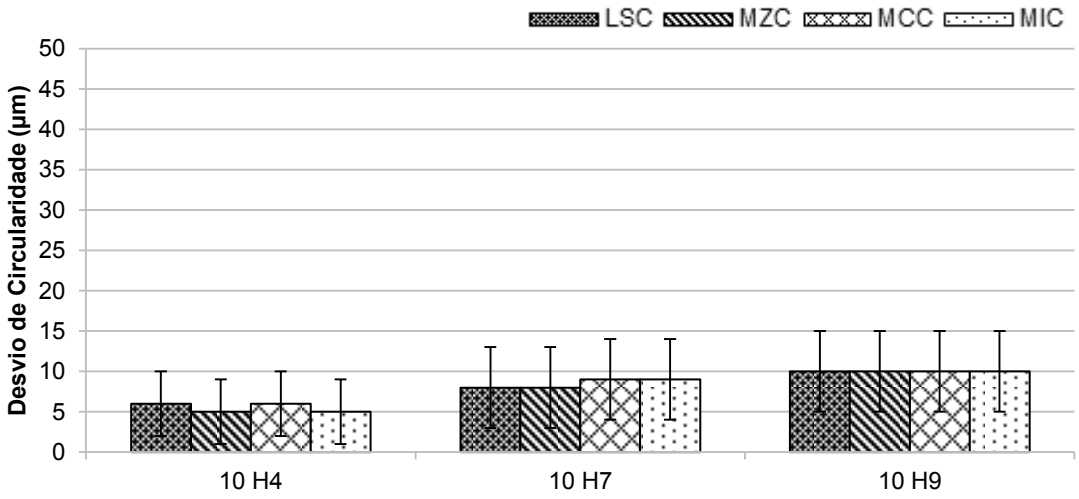
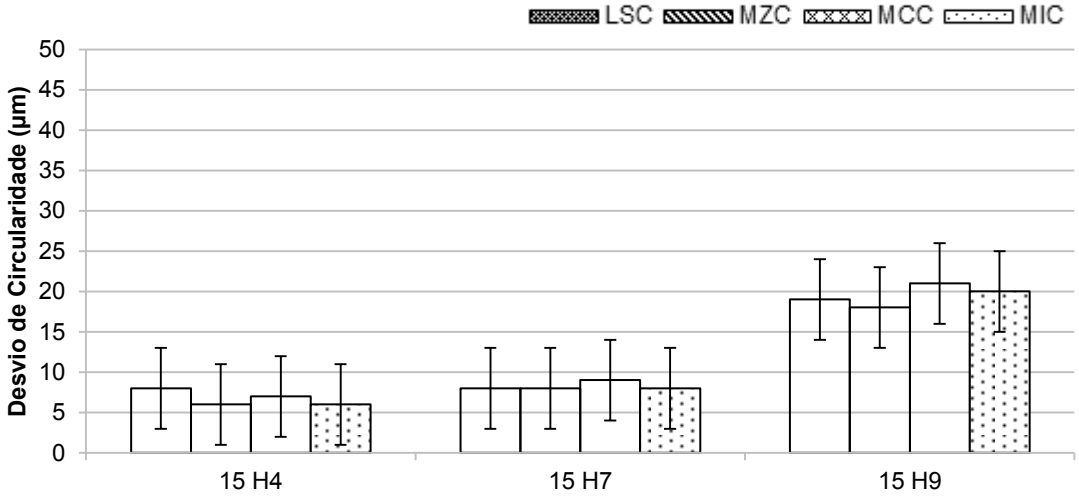


Figura 4.30 – Valores médios de desvio de circularidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Zeiss.

(a)



(b)



(c)

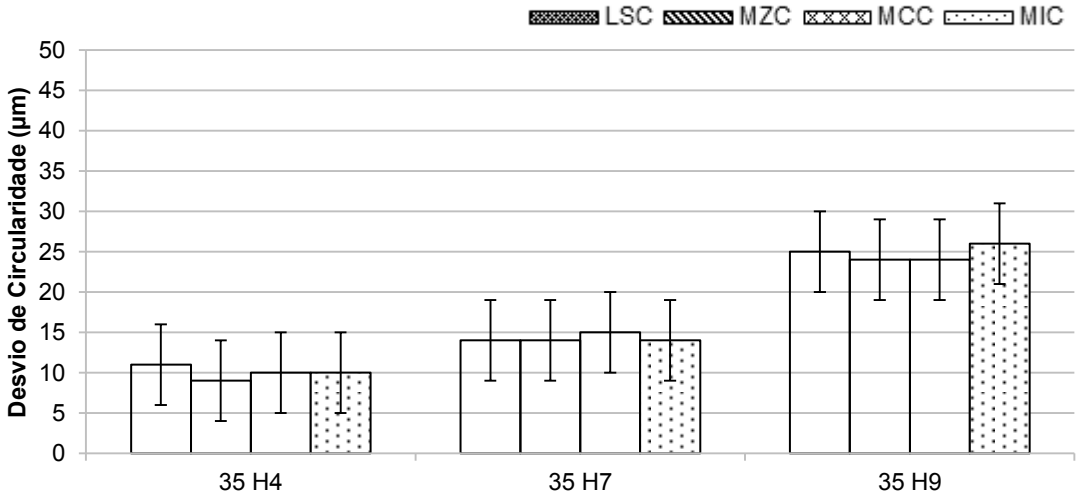
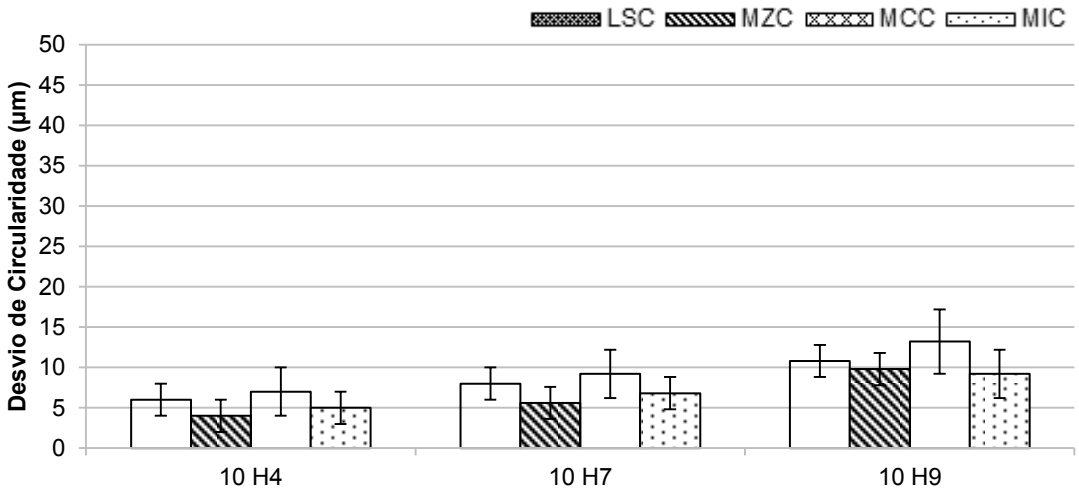
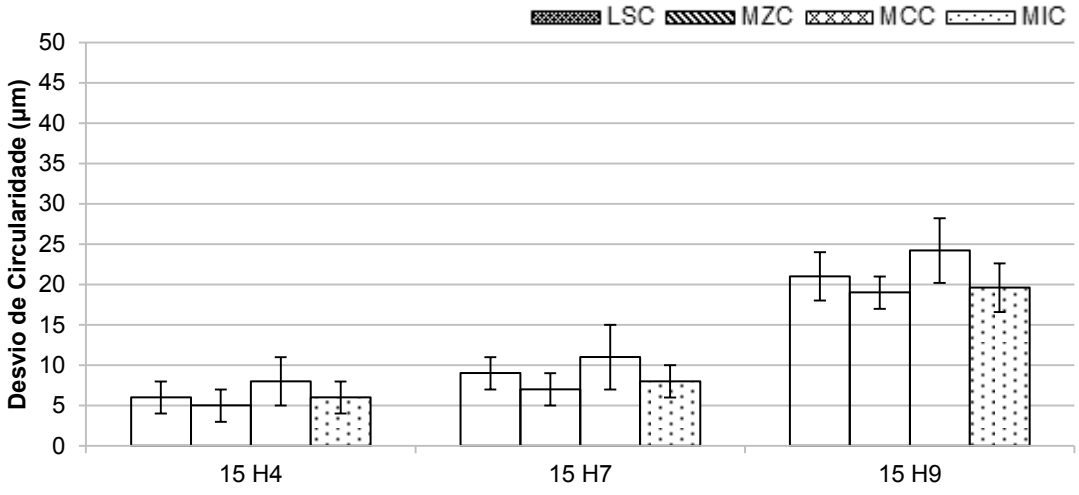


Figura 4.31 – Valores médios de desvio de circularidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Hexagon.

(a)



(b)



(c)

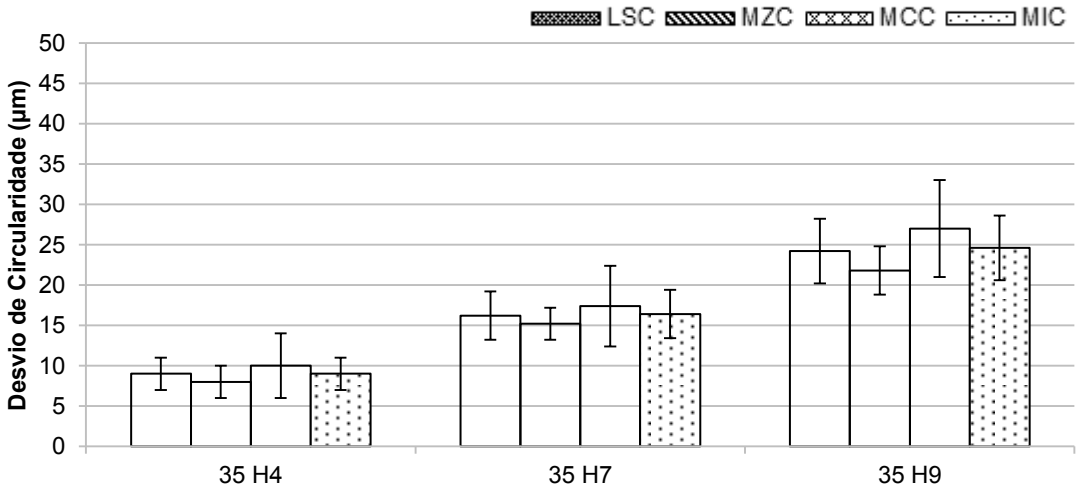
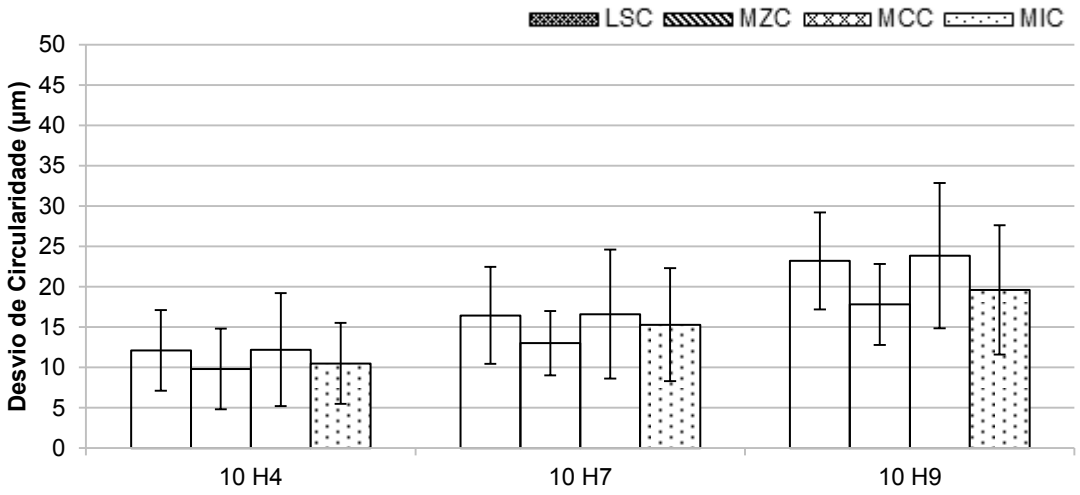
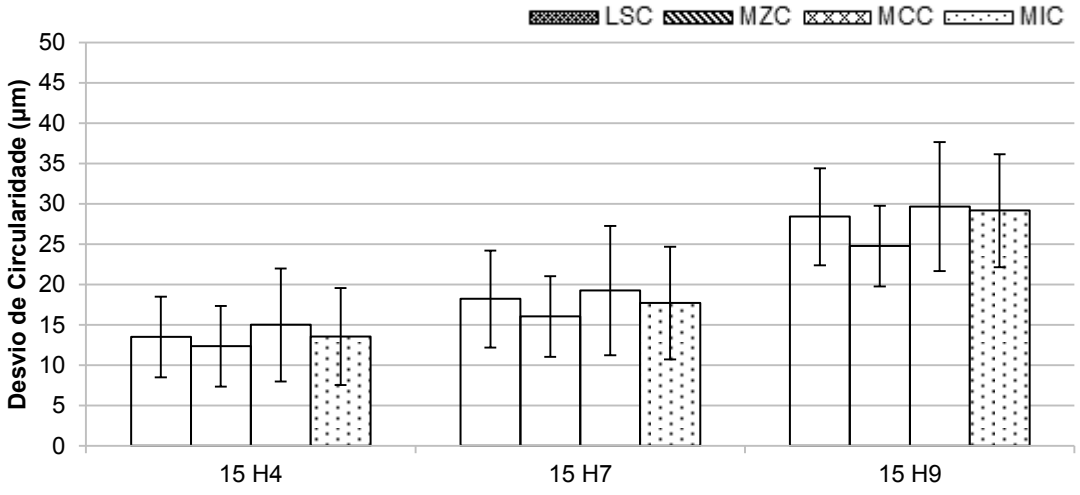


Figura 4.32 – Valores médios de desvio de circularidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo BR.

(a)



(b)



(c)

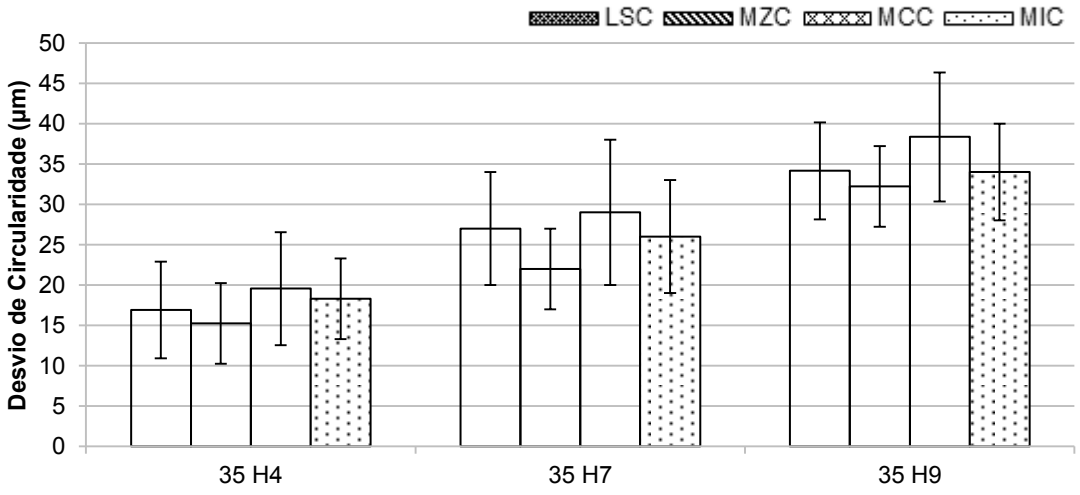


Figura 4.33 – Valores médios de desvio de circularidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, medidos na MMC Mitutoyo QM.

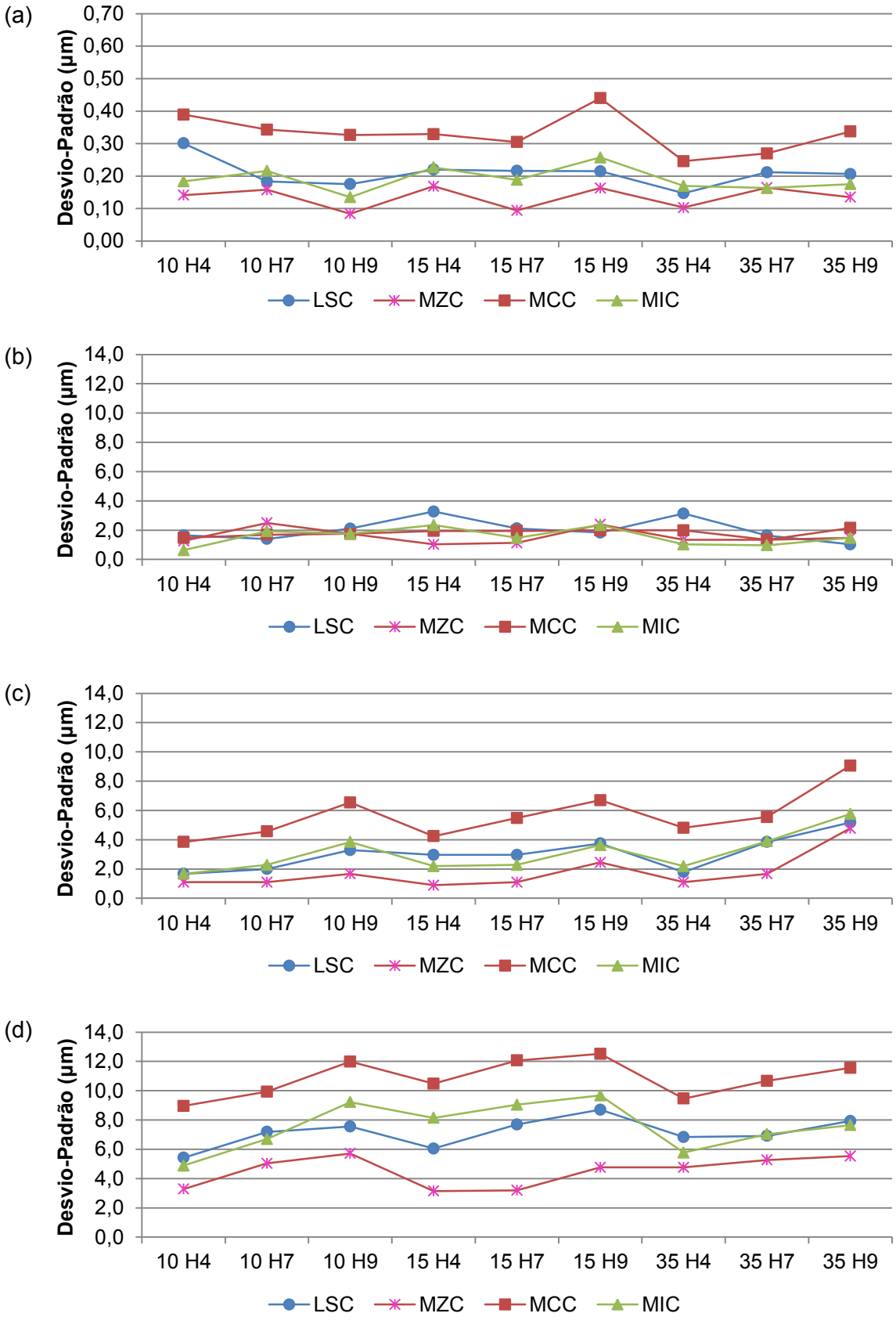


Figura 4.34 – Valores de desvio-padrão (95% de confiabilidade) obtidos na medição dos furos na MMC (a) Zeiss, (b) Hexagon, (c) Mitutoyo BR e (d) Mitutoyo QM.

As Tabelas 4.15 a 4.18 apresentam os resultados da análise de variância para a medição do desvio de circularidade dos furos da PLAFAMA nas quatro máquinas. O valor *p* (95% de confiança) indica que o fator método de ajuste afeta significativamente os valores de desvio de circularidade, exceto para os furos 10 H7, 10 H9 e 15 H7 na MMC Hexagon.

Tabela 4.15 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade efetuadas na MMC Zeiss.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	4,8360	1,61200	100,06	0,000
	Erro	36	0,5800	0,01611		
	Total	39	5,4160			
10 H7	Fator	3	8,3428	2,78092	197,46	0,000
	Erro	36	0,5070	0,01408		
	Total	39	8,8498			
10 H9	Fator	3	3,8330	1,27767	163,11	0,000
	Erro	36	0,2820	0,00783		
	Total	39	4,1150			
15 H4	Fator	3	1,2770	0,42567	20,32	0,000
	Erro	36	0,7540	0,02094		
	Total	39	2,0310			
15 H7	Fator	3	13,7460	4,58200	402,3	0,000
	Erro	36	0,4100	0,01139		
	Total	39	14,1560			
15 H9	Fator	3	103,845	34,6149	1587,44	0,000
	Erro	36	0,785	0,0218		
	Total	39	104,630			
35 H4	Fator	3	0,4648	0,154917	21,05	0,000
	Erro	36	0,2650	0,007361		
	Total	39	0,7298			
35 H7	Fator	3	11,473	3,82425	113,31	0,000
	Erro	36	1,215	0,03375		
	Total	39	12,688			
35 H9	Fator	3	54,4768	18,1589	1161,14	0,000
	Erro	36	0,5630	0,0156		
	Total	39	55,0398			

Tabela 4.16 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade efetuadas na MMC Hexagon.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	14,48	4,8250	11,21	0,000
	Erro	36	15,50	0,4306		
	Total	39	29,98			
10 H7	Fator	3	2,400	0,8000	0,87	0,467
	Erro	36	33,200	0,9222		
	Total	39	35,600			
10 H9	Fator	3	0,0750	0,02500	0,03	0,993
	Erro	36	30,7000	0,85278		
	Total	39	30,7750			
15 H4	Fator	3	12,10	4,033	3,06	0,040
	Erro	36	47,40	1,317		
	Total	39	59,50			
15 H7	Fator	3	2,000	0,6667	0,91	0,446
	Erro	36	26,400	0,7333		
	Total	39	28,400			
15 H9	Fator	3	53,80	17,933	15,44	0,000
	Erro	36	41,80	1,161		
	Total	39	95,60			
35 H4	Fator	3	11,28	3,758	3,61	0,022
	Erro	36	37,50	1,042		
	Total	39	48,77			
35 H7	Fator	3	12,10	4,033	3,06	0,041
	Erro	36	47,42	1,316		
	Total	39	59,51			
35 H9	Fator	3	29,30	9,7667	15,56	0,000
	Erro	36	22,60	0,6278		
	Total	39	51,90			

Tabela 4.17 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade efetuadas na MMC Mitutoyo BR.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	16,95	5,6500	9,42	0,000
	Erro	16	9,60	0,600		
	Total	19	26,55			
10 H7	Fator	3	15,00	5,0000	11,76	0,000
	Erro	16	6,80	0,4250		
	Total	19	21,80			
10 H9	Fator	3	16,95	5,6503	9,40	0,000
	Erro	16	9,61	0,600		
	Total	19	26,56			
15 H4	Fator	3	35,75	11,9167	15,89	0,000
	Erro	16	12,00	0,7500		
	Total	19	47,75			
15 H7	Fator	3	44,95	14,983	14,27	0,000
	Erro	16	16,80	1,050		
	Total	19	61,75			
15 H9	Fator	3	9,750	3,2500	7,65	0,002
	Erro	16	6,800	0,4250		
	Total	19	16,550			
35 H4	Fator	3	12,95	4,3167	5,95	0,006
	Erro	16	11,60	0,7250		
	Total	19	24,55			
35 H7	Fator	3	28,95	9,650	9,65	0,001
	Erro	16	16,00	1,000		
	Total	19	44,95			
35 H9	Fator	3	44,95	14,9833	22,20	0,000
	Erro	16	10,80	0,6750		
	Total	19	55,75			

Tabela 4.18 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de circularidade efetuadas na MMC Mitutoyo QM.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	71,00	23,667	3,61	0,017
	Erro	16	497,80	6,550		
	Total	19	568,80			
10 H7	Fator	3	91,04	30,346	6,14	0,001
	Erro	16	375,35	4,939		
	Total	19	466,39			
10 H9	Fator	3	335,9	111,98	10,29	0,000
	Erro	16	826,9	10,88		
	Total	19	1162,9			
15 H4	Fator	3	495,6	165,217	24,92	0,000
	Erro	16	503,9	6,630		
	Total	19	999,5			
15 H7	Fator	3	147,1	49,05	4,85	0,004
	Erro	16	768,7	10,12		
	Total	19	915,9			
15 H9	Fator	3	113,2	37,746	4,22	0,008
	Erro	16	679,8	8,944		
	Total	19	793,0			
35 H4	Fator	3	152,0	50,683	5,11	0,003
	Erro	16	753,5	9,914		
	Total	19	905,5			
35 H7	Fator	3	234,2	78,083	8,53	0,000
	Erro	16	695,3	9,149		
	Total	19	929,5			
35 H9	Fator	3	222,5	74,167	9,56	0,000
	Erro	16	589,7	7,759		
	Total	19	812,2			

4.4. Análise comparativa do desempenho dos métodos de ajuste na medição do diâmetro

A Tabela 4.19 apresenta uma análise comparativa do desempenho dos métodos de ajuste considerando as quatro máquinas de medir por coordenadas, onde “X” indica que o método forneceu valores fora da especificação de projeto do diâmetro dos furos.

Analisando-se os resultados exibidos pela MMC Zeiss, observa-se que o método de ajuste MCC não foi adequado para obtenção do diâmetro dos furos 10 H4 e 35 H4; por sua vez, o método MIC mostrou-se inadequado para o furo 15 H4. Para os furos com grau de tolerância-padrão IT7 e IT9, todos os métodos de ajuste mostraram-se apropriados.

Por sua vez, as MMCs Hexagon, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM exibiram comportamento similar dos métodos de ajuste durante o controle de diâmetro dos furos com grau de

tolerância-padrão IT4, sendo que neste caso todos os métodos mostraram-se inadequados. Entretanto, para os furos com grau de tolerância-padrão IT7 e IT9, observou-se desempenho diferente dos métodos de ajuste, em particular do MCC e MIC.

Nas MMCs Hexagon e Mitutoyo BR, notou-se que para todos os furos com grau de tolerância-padrão IT7 e IT9 o método de ajuste MIC não foi adequado, porquanto exibiu valores de diâmetro abaixo do limite inferior da zona de conformidade. Uma vez que estas máquinas apresentam tendência de fornecerem valores de diâmetro menores que o valor convencional, este comportamento metrológico compromete os resultados fornecidos principalmente por este método de ajuste.

Em contrapartida, na MMC Mitutoyo QM, para todos os furos IT7 e IT9 o método de ajuste MIC foi adequado, enquanto que o MCC forneceu valores fora da zona de conformidade. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que esta máquina apresenta valores de diâmetro maiores que o valor convencional, o que faz com que o método MCC apresente uma tendência de extrapolar o limite superior da zona de conformidade.

Quanto aos métodos de ajuste LSC e MZC, para as MMCs Hexagon e Mitutoyo QM estes métodos não foram adequados para obtenção do diâmetro de todos os furos com grau de tolerância-padrão IT7. Para a MMC Mitutoyo BR, os métodos LSC e MZC mostraram-se inadequados apenas para o furo 35 H7.

Analisando-se a escolha do método de ajuste como dependente da funcionalidade da peça, tomou-se como exemplo o conjunto cilindro-pistão de um compressor hermético, em que não deve haver contato metal-metal. Pela funcionalidade dos componentes, para a medição do diâmetro do furo do cilindro deve-se aplicar o método de ajuste MIC, e o método MCC para a medição do diâmetro do pistão.

Neste sentido, ao analisar os resultados obtidos pelas diferentes MMCs, a escolha do método de ajuste baseado apenas na funcionalidade da peça pode não ser eficiente no controle do diâmetro do conjunto cilindro-pistão, uma vez que o comportamento destes métodos varia, mesmo para MMC de um mesmo fabricante.

Ainda, os resultados decorrentes da aplicação do artefato-padrão PLAFAMA indicaram que, uma vez definido o método de ajuste condizente com a funcionalidade da peça, deve-se também verificar o comportamento deste na MMC em que serão realizadas as medições.

Se for detectada qualquer limitação de aplicabilidade do método escolhido por meio da avaliação de seu desempenho utilizando a PLAFAMA, então este método não deverá ser utilizado para aquela aplicação, uma vez que pode-se incorrer no erro de reprovar peças indevidamente ou de aprovar peças que estão fora da especificação. Neste caso, uma solução seria a correção do erro sistemático relacionado aos métodos de ajuste.

Tabela 4.19 – Análise comparativa do desempenho dos métodos de ajuste na medição do diâmetro.

Furo	Método de ajuste	MMC Zeiss	MMC Hexagon	MMC Mitutoyo BR	MMC Mitutoyo QM
10 H4	LSC		X	X	X
	MZC		X	X	X
	MCC	X	X	X	X
	MIC		X	X	X
10 H7	LSC		X		X
	MZC		X		X
	MCC				X
	MIC		X	X	
10 H9	LSC				
	MZC				
	MCC				X
	MIC		X	X	
15 H4	LSC		X	X	X
	MZC		X	X	X
	MCC		X	X	X
	MIC	X	X	X	X
15 H7	LSC		X		X
	MZC		X		X
	MCC				X
	MIC		X	X	
15 H9	LSC				
	MZC				
	MCC				X
	MIC		X	X	
35 H4	LSC		X	X	X
	MZC		X	X	X
	MCC	X	X	X	X
	MIC		X	X	X
35 H7	LSC		X	X	X
	MZC			X	X
	MCC				X
	MIC		X	X	
35 H9	LSC				
	MZC				
	MCC				X
	MIC		X	X	

4.5. Metodologia proposta para avaliação dos métodos de ajuste implementados em MCCs utilizando o artefato-padrão PLAFAMA

A seguir é descrita a metodologia proposta para aplicação do artefato-padrão PLAFAMA na avaliação do desempenho metrológico dos métodos de ajuste (mínimos

quadrados, mínima zona, mínimo circunscrito e máximo inscrito) implementados nos *softwares* dedicados às máquinas de medir por coordenadas.

O artefato-padrão PLAFAMA deve ser posicionado no volume de trabalho da máquina de medir por coordenadas, na posição onde esta apresenta melhor desempenho metrológico, de forma que a interferência de outras fontes de erros seja minimizada. O posicionamento deve possibilitar o acesso às faces laterais do mesmo. Para a fixação devem ser utilizados suportes rígidos para evitar possíveis deslocamentos indesejáveis durante o processo de medição.

Em seguida, deve-se proceder com o alinhamento do sistema de coordenadas, tomando como referências para o alinhamento dos eixos *X* e *Y* as faces A e B, respectivamente (Fig. 4.35). Adotar como coordenada *Z* igual a zero o plano onde a PLAFAMA encontra-se apoiada; isto é, a superfície do desempeno da máquina. Para o apalpamento, a ponta de medição deve ter diâmetro de 2 mm ou 3 mm.

Recomenda-se executar dez ciclos de medição, para MMC de comando numérico computadorizado (CNC), e cinco ciclos para MMC manual. Todas as medições devem ser efetuadas a temperatura ambiente de (20,0 ± 1,0) °C.

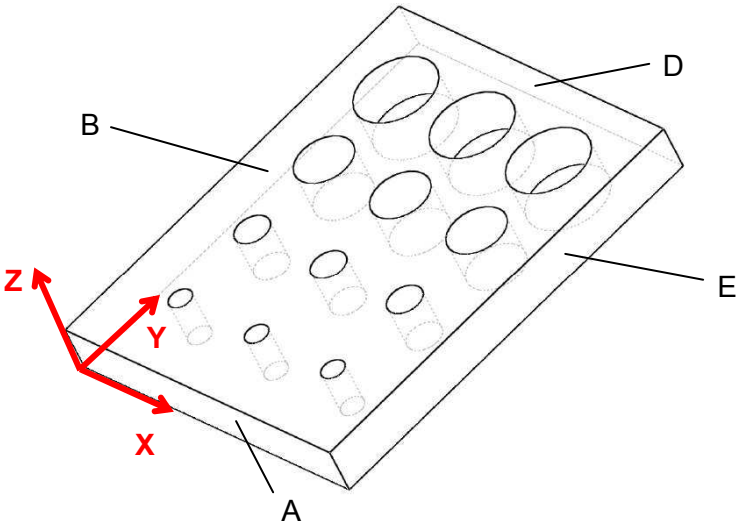


Figura 4.35 – Indicação da nomenclatura das faces laterais da PLAFAMA.

4.5.1. Medição do diâmetro e do desvio de circularidade

A medição do diâmetro e do desvio de circularidade deve ser realizada em uma seção transversal dos furos, na coordenada *Z* igual a 10 mm. Quanto ao número de pontos, para MMC CNC, 16, 24 e 56 pontos devem ser apalpados, para os furos com diâmetro nominal de 10 mm, 15 mm e 35 mm, respectivamente, enquanto que para MMC manual, o número de pontos recomendado é de 12, 20 e 32.

Os valores das características medidas devem ser obtidos a partir das geometrias substitutas ajustadas pelos quatro métodos, para que se possa efetuar uma comparação entre os valores medidos e, assim, caracterizar o desempenho dos métodos de ajuste implementados no software MMC avaliada.

4.5.2. Avaliação da incerteza de medição

Uma vez obtidos os valores médios do mensurando por cada método de ajuste, deve-se avaliar a incerteza associada aos resultados obtidos nas medições. Para tanto, recomenda-se utilizar a metodologia proposta no GUM (BIPM et al., 2008a).

Inicialmente, determina-se a incerteza-padrão combinada associada às coordenadas dos pontos *X, Y* e *Z* apalpados durante a medição. As variáveis de influência a serem consideradas são: resolução da MMC (R_{MMC}); incerteza-padrão associada à calibração da MMC (IC_{MMC}); erro do sistema de apalpamento (E_A); afastamento da temperatura em relação a 20 °C (T); variação da temperatura durante a medição ($\delta(T)$). O modelo matemático adotado é dado na Eq. (4.5).

$$C_i = L_i + \Delta R + \Delta IC_{MMC} + \Delta E_A + L_i \Delta T(\alpha_{Pe} + \alpha_E) + L_i \delta T(\alpha_{Pe} + \alpha_E) \quad (4.5)$$

Onde: C_i - coordenada *X*, *Y* ou *Z* considerada; L_i - média aritmética dos valores da coordenada *X*, *Y* ou *Z* indicados pela MMC; α_{Pe} - coeficiente de expansão térmica linear do material da peça; α_E - coeficiente de expansão térmica linear das escalas da máquina.

Para o cálculo da incerteza expandida associada ao diâmetro (*D*), deve-se utilizar o modelo matemático proposto na Eq. (4.6).

$$D = \Delta s(D) + 2 \cdot R = \Delta s(D) + 2\sqrt{(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2} \quad (4.6)$$

Onde: $\Delta s(D)$ - variabilidade associada aos valores do diâmetro; *R* - raio do círculo; X_c e Y_c - coordenadas do centro do círculo.

Por sua vez, o cálculo da incerteza expandida associada ao desvio de circularidade (D_{CIR}) deve ser efetuado utilizando-se o modelo matemático proposto na Eq. (4.7).

$$D_{CIR} = \Delta s(D_{CIR}) + P_{max} - P_{min} \quad (4.7)$$

Onde: $\Delta s(D_{CIR})$ - variabilidade associada aos valores do desvio de circularidade; P_{max} e P_{min} - distância máxima e mínima, respectivamente, de cada ponto P_i ao centro do círculo.

Para avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada deve-se considerar as informações apresentadas na Tab. 4.20, onde: *TA* - tipo de avaliação; *DP* - distribuição de probabilidade; *GL* - número de graus de liberdade; *CC* - informações retiradas do certificado de calibração; *me* - mensurando; *s* - desvio-padrão; *n* - tamanho da amostra; *R* - resolução; R_T - resolução do termômetro; I_T - incerteza da calibração do termômetro; α_w - coeficiente de expansão térmica linear das escalas da máquina; α_s - coeficiente de expansão térmica linear do material da peça.

Tabela 4.20 – Informações para avaliação da incerteza-padrão das variáveis de entrada.

Variável de entrada	TA	DP	GL	Equação
Variabilidade dos valores da coordenada	A	*t-Student*	n-1	$u(me) = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$
Resolução da MMC (R_{MMC})	B	retangular	∞	$u(\Delta R_{MMC}) = \frac{R_{MMC}}{2 \cdot \sqrt{3}}$
Incerteza da calibração da coordenada *X* ($IC_{MMC(X)}$)	B	CC	CC	$IC_{MMC(x)} = \frac{U_x}{k_x}$
Incerteza da calibração da coordenada *Y* ($IC_{MMC(y)}$)	B	CC	CC	$IC_{MMC(y)} = \frac{U_y}{k_y}$
Incerteza da calibração da coordenada *Z* ($IC_{MMC(z)}$)	B	CC	CC	$IC_{MMC(z)} = \frac{U_z}{k_z}$
Erro de apalpamento (E_A)	B	CC	CC	$u(\Delta E_A) = \frac{E_A}{\sqrt{6}}$
Afastamento da temperatura (*T*) em relação a 20 °C	B	*t-Student*	CC	$u(\Delta T) = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_T}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_T}{k_T}\right)^2}$
Coeficiente de expansão térmica linear (α)	B	retangular	CC	$u(\Delta\alpha) = \frac{0{,}01 \cdot (\alpha_w + \alpha_s)}{\sqrt{3}}$
Variação da temperatura (δT)	B	retangular	CC	$u(\Delta\delta T) = \frac{\delta(T)}{\sqrt{3}}$

4.5.3. Avaliação dos resultados

Para a comparação e caracterização do desempenho dos métodos de ajuste implementados no *software*, deve-se efetuar a avaliação dos resultados conforme sugerido a seguir.

Para a análise da exatidão dos métodos de ajuste, os valores médios do diâmetro dos furos obtidos na MMC, considerando cada método, devem ser comparados com o valor convencional indicado no certificado de calibração da PLAFAMA. Considerando o conjunto das *n* observações, o erro de medição (*EM*) pode ser determinado pela Eq. (4.8).

$$EM = \bar{x} - VC \tag{4.8}$$

Onde: $\bar{x}$ - valor médio das *n* observações; *VC* - valor convencional.

A repetibilidade dos valores dos mensurandos fornecidos pelos diferentes métodos de ajuste é obtida multiplicando-se o desvio-padrão por dois, para uma probabilidade de abrangência de 95%.

Uma vez determinada a incerteza associada aos resultados obtidos nas medições, esta deve ser considerada na análise dos resultados. Para tanto, deve-se determinar a zona de conformidade, que é calculada subtraindo-se dos limites superior e inferior da zona de especificação os valores da incerteza expandida (*U*) (Fig. 4.36).

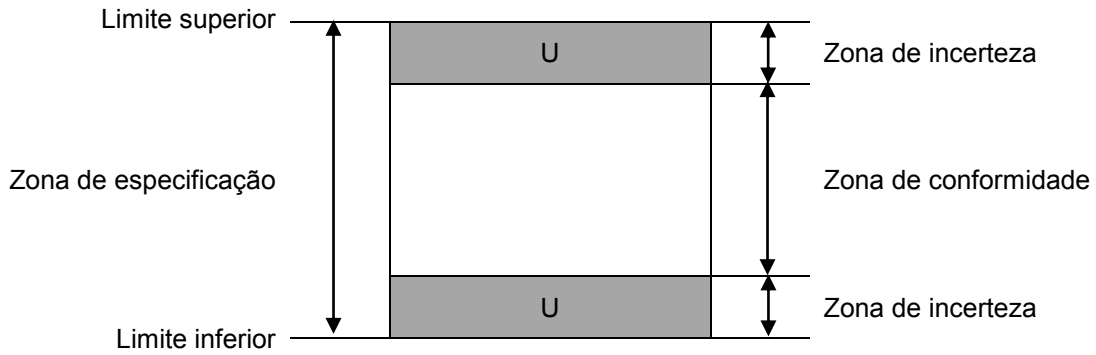


Figura 4.36 – Representação das zonas de especificação, de incerteza e de conformidade.

Aqueles métodos de ajuste que apresentarem valores médios do mensurando fora da zona de conformidade não devem ser utilizados para aquela aplicação. No entanto, caso a MMC apresente tendência de fornecer valores de diâmetro maiores ou menores que o valor convencional, deve-se proceder com a correção do erro sistemático relacionado aos métodos de ajuste.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliado o desempenho dos métodos de ajuste (mínimos quadrados, mínimo circunscrito, máximo inscrito e mínima zona) utilizados nos *softwares* dedicados às máquinas de medir por coordenadas. Para tanto, foi desenvolvido, calibrado e aplicado um artefato-padrão, nomeado como Placa de Furos para Avaliação dos Métodos de Ajuste (PLAFAMA).

A partir dos resultados obtidos na medição da PLAFAMA nas quatro máquinas, observou-se que os valores médios foram estatisticamente diferentes apenas para as características diâmetro de furo, desvio de circularidade e desvio de cilindricidade. Ainda, os valores obtidos de desvio de cilindricidade apresentaram comportamento similar àqueles do desvio de circularidade.

A metodologia proposta baseada na PLAFAMA mostrou-se apropriada para a avaliação do desempenho dos métodos de ajustes utilizados em *softwares* de MMCs, possibilitando identificar suas limitações, vantagens e desvantagens. Estas informações auxiliam os operadores de MMCs na escolha do método de ajuste mais adequado para uma determinada aplicação, bem como contribuem para a redução dos erros de medição e da incerteza associada.

Na medição do diâmetro dos furos, os maiores valores médios foram obtidos pelo método MCC, e os menores pelo método MIC. Os métodos LSC e MZC forneceram valores de diâmetro similares. A análise de variância mostrou que o método de ajuste afeta significativamente os valores do diâmetro dos furos para todas as MMCs avaliadas. O teste de Tukey indicou que há diferenças significativas entre os valores médios de diâmetro obtidos pelos métodos de ajuste MCC e MIC.

As máquinas Zeiss, Mitutoyo BR e Mitutoyo QM mostraram comportamento similar para os valores médios de desvio de circularidade. O método MZC forneceu o menor valor de desvio de circularidade, sendo este resultado condizente com a norma ISO 1101 (ISO, 2012). Por sua vez, o método MCC exibiu os valores máximos. Em todos os casos o método MZC mostrou os menores valores de desvio-padrão (95%) e, por esta razão, foi o mais preciso, enquanto que o método MCC foi o menos preciso. A análise de variância indicou que para todas as condições e máquinas avaliadas os métodos de ajuste afetam significativamente os valores de desvio de circularidade.

O fator que mais contribuiu para a incerteza final da medição do diâmetro e do desvio de circularidade nas MMCs Zeiss e Hexagon foi a incerteza da calibração da máquina, enquanto que para as MMCs Mitutoyo BR e Mitutoyo QM foi a variabilidade das leituras.

Para a MMC Zeiss, os métodos LSC e MZC são os mais recomendados, por apresentarem maior exatidão. Por sua vez, os métodos MCC e MIC forneceram valores de diâmetro mais próximos dos limites de especificação, e os valores de erro sistemático tornaram-se maiores à medida que o grau de tolerância-padrão aumentou. Por esta razão, a aplicação destes métodos deve ser evitada.

O método MCC é o mais recomendado para a medição do diâmetro nas MMCs Hexagon e Mitutoyo BR. Em contrapartida, os métodos LSC e MZC devem ser aplicados com atenção, uma vez que excedem ou se aproximam do limite inferior de tolerância para os furos H7 e H9. O método MIC não pode ser usado para a medição do diâmetro dos furos H7 e H9, uma vez que forneceu valores fora da zona de conformidade.

O método MIC é o mais sugerido para a medição do diâmetro dos furos H7 e H9 na MMC Mitutoyo QM. Os métodos LSC e MZC são adequados apenas para os furos H9. O método MCC não pode ser utilizado para obter qualquer valor de diâmetro nesta máquina.

A escolha do método de ajuste baseado na funcionalidade da peça não é suficiente para assegurar a confiabilidade dos resultados das medições em MMCs. O desempenho metrológico de cada método também deve ser avaliado e, para esta aplicação, a PLAFAMA pode ser utilizada por operadores e fabricantes de MMCs.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho, sugere-se:

- Aplicar a PLAFAMA em outros tipos de MMCs, como ponte fixa, braço horizontal e pórtico, visando avaliar o desempenho dos métodos de ajuste.
- Aplicar a PLAFAMA em MMCs de outros fabricantes.
- Investigar as causas da tendência diferenciada da MMC Mitutoyo QM, por meio da medição com diferentes operadores e do levantamento dos erros geométricos da máquina, utilizando para tal finalidade um interferômetro laser.
- Adequar a PLAFAMA para avaliação do desempenho dos métodos de ajustes em MMCs de médio e grande porte, utilizando valores de diâmetro maiores.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABACKERLI, A.J.; ORREGO, R.M.M. Uma Macrovisão sobre a Modelagem Cinemática de Máquinas de Medir por Coordenadas. Revista de Ciência & Tecnologia. v. 8. p. 31-43. 2001.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6158: Sistema de Tolerâncias e Ajustes. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 79 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6409: Tolerâncias Geométricas - Tolerâncias de Forma, Orientação, Posição e Batimento - Generalidades, Símbolos, Definições e Indicações em Desenho. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 79 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR ISO/IEC 17025: Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 20 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR NM ISO 1: Temperatura Padrão de Referência para Medições Industriais de Comprimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 2 p.

ALBERTIN, R.A.; SOARES JÚNIOR, L.S.; SILVA, J.B.A. Uma Proposta para Garantia da Qualidade Metrológica em Peças de Geometria Complexa. Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas. Ano 6, n. 3, p. 147-168, 2011.

ALMACINHA, J.A. Introdução à Nova Linguagem ISO de Especificação Geométrica de Produtos. Parte 2: Modelo para a Especificação e Verificação Geométricas. Revista Tecnometal. v. 162, p. 9-16, 2006.

ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores). Disponível em: < http://www.anfavea.com.br/estat%C3%ADsticas-2015.html >. Acesso em: 15 mar. 2016.

ARENHART, F.A. Planejamento e Melhoria de Processos de Medição de Forma por Scanning em Máquinas de Medir por Coordenadas. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ASME (American Society of Mechanical Engineers). ASME B89.4.10360.2-2008. Acceptance Test and Reverification Test for Coordinate Measuring Machines (CMMs) Part 2: CMMs Used for Measuring Linear Dimensions (Technical Report). New York: ASME, 2008. 78 p.

ASME (American Society of Mechanical Engineers). ASME B89.4.1-1997. Methods of Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines. New York: ASME, 1997. 78 p.

ASME (American Society of Mechanical Engineers). ASME Y14.5M-2009. Dimensioning and Tolerancing. New York: ASME, 2009. 224 p.

BAL-TEC. Catálogo Geral de Produtos. Disponível em: <http://www.precisionballs.com/all_ball_bar.php> Acesso em: 14 nov. 2013.

BARCZAK, A.L.C. Comparação entre algoritmos de mínimos quadrados e de zona mínima para desvios de circularidade. 1996. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica.

BIPM (Bureau Internacional des Poids et Measures). 2008a. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva Switzerland. 2008. 134 p.

BIPM (Bureau Internacional des Poids et Measures). 2008b. Evaluation of Measurement Data – Supplement 1 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method. Geneva Switzerland. 2008. 90 p.

BRYAN, J.B. International Status of Thermal Error Research. CIRP Annals - Manufacturing Tecnology. v. 39. p. 645-656, 1990.

BRYAN, J.B.; DOIRON, T. Temperature Fundamentals. In: HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2.ed. New York: CRC Press, 2011. 592 p.

BURDEKIN, M.S.; VOUTSADOPOULOS, C. Computer Aided Calibration of the Geometric Errors of Multi-Axis Coordinate Measuring Machines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. v. 195, p. 231-239, 1981.

CARDOZA, J.A.S. Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas. 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

CARPINETTI, L.C.R. Planejamento e Análise de Experimentos. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos: 2006.

CHAN, F.M.M. KING, T.G.; STOUT, K.J. The Influence of Sampling Strategy on a Circular Feature in Coordinate Measurements . Measurement. v. 19, n. 2, p. 73-81, 1996.

CHOU S.Y.; WOO T.C.; POLLOCK S.M. On Characterizing Circularity. Journal of Design and Manufacturing. p. 253-263, 1994.

DI GIACOMO, B. Computer Aided Calibration and Hybrid Compensation of Geometric Errors in Coordinate Measuring Machines. 1986. 418 f. PhD Thesis – The Victoria University of Manchester.

ELSHENNAWY, A.K.; HAM, I. Performance Improvement in Coordinate Measuring Machines by Error Compensation. Journal of Manufacturing Systems. v. 9. p. 151-158. 1990.

ESTLER, W.T.; PHILLIPS, S.D.; BORCHARDT, B.; HOPP, T.; LEVENSON, M.; EBERHARDT, K.; MCCLAIN, M.; SHEN, Y.; ZHANG, X. Practical Aspects of touch-trigger probe error compensation. Precision Engineering. v. 21, n. 1, p. 1-17, 1997.

ESTLER, W.T.; PHILLIPS, S.D.; BORCHARDT, B.; HOPP, T.; WITZGALL, C.; LEVENSON, M.; EBERHARDT, K.; MCCLAIN, M.; SHEN, Y.; ZHANG, X. Error Compensation for CMM Touch-Trigger Probes. Precision Engineering. v. 19, n. 2-3, p. 85-97, 1996.

FENG H.; ENDRIAS D.H.; TAHER M.A.; SONG H. An Accurate and Efficient Algorithm for Determining Minimum Circumscribed Circles and Spheres from Discrete Data Points. Computer-Aided Design. v. 45, n. 2, p. 105-112, 2013.

FLACK, D. CMM Measuring Strategies. National Physical Laboratory, NPL, UK, 2001.

FLACK, D.; BEVAN, K. Fundamental Good Practice in the Design and Interpretation of Engineering Drawings for Measurement Processes. National Physical Laboratory, ISSN 1368-6550, Guide 79, Hampton Road, Teddington, Middlesex, 2005.

GADELMAWLA E.S. Simple and Efficient Algorithms for Roundness Evaluation from the Coordinate Measurement Data. Measurement. v. 43, n. 2, p. 223-235, 2010.

GOCH G.; LÜBKE K. Tschebyscheff Approximation for the Calculation of Maximum Inscribed/Minimum Circumscribed Geometry Elements and Form Deviations. CIRP Annals - Manufacturing Tecnology. v. 57, n. 1, p. 517-520, 2008.

GONZÁLES-MADRUGA, D.; CUESTA, E.; PATIÑO, H.; BARREIRO, J.; MARTINEZ-PELLITERO, S. Evaluation of AACMM Using the Virtual Circles Method. Procedia Engineering. v. 63. p. 243-251. 2013.

GUYE, J. J. Metrological Inspection of Machining Centers, Jig Boring Machines and Measuring Machines Through a Statistical Approach. Sociéte Genovice d'Instruments de Physique. Geneva, 1978.

HOCKEN, R.; SIMPSON, J.A.; BORCHARDT, B.; LAZAR, J.; REEVE, C.; STEIN, P. Three Dimensional Metrology. CIRP Annals - Manufacturing Tecnology. v.26, n.1, p. 403-408, 1977.

HOCKEN, R.J.; RAJA, J.; UPPLIAPPAN, B. Sampling Issues in Coordinate Metrology. Manufacturing Review. v. 6. p. 282-294. 1993.

HOPP, H.T. Computational Metrology. Manufacturing Review. v. 6, n. 4, p. 295-304, 1993.

HUANG J.A. New Strategy for Circularity Problems. Precision Engineering. v. 25, n. 4, p. 301-308, 2001.

HUANG, J. An Exact solution for the roundness evaluation problems. Precision Engineering. v. 23. p. 2-8. 1999.

INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais de Termos Associados (VIM 2012). 1.ed. Luso-Brasileira. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. 94 p.

ISO (International Organization for Standardization). ISO 1101: Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical Tolerancing – Tolerances of Form, Orientation, Location and Run-out. Geneva: ISO, 2012. 110 p.

ISO (International Organization for Standardization). ISO 286-1: Geometrical Product Specifications (GPS) -- ISO Code System For Tolerances on Linear Sizes -- Part 1: Basis of Tolerances, Deviations and Fits. Geneva: ISO, 2010. 38 p.

ISO (International Organization for Standardization). ISO 286-2: Geometrical Product Specifications (GPS) -- ISO Code System for Tolerances on Linear Sizes -- Part 2: Tables of Standard Tolerance Classes and Limit Deviations for Holes and Shafts. Geneva: ISO, 2010. 52 p.

JINWEN, W.; YANLING, C.The Geometric Dynamic Errors os CMMs in Fast Scanning-Probing.Measurement. v. 44. p. 511-517. 2011.

JYWE, W.; LIU, C.; CHEN, C. The Min-Max Problem for Evaluating the Form Error of a Circle. Measurement. v. 26. p. 273-282. 1999.

MASON, R. L.; GUNST, R. F.; HESS, J. L. Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science. 2. ed. John Wiley & Sons, New York. 2003.

MAY, F.P. Incerteza na Medição por Coordenadas com Ênfase na Contribuição da Forma da Peça e da Estratégia de Medição. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MEGIDDO, N. Linear Time Algorithms for Linear Programming in R3 and Realted Problems. Society for Industry and Applied Mathematics, v. 12, n. 4, p. 759-776, 1983.

MIGUEL, P.A.C.; KING, T.; ABACKERLI, A.J. CMM Touch Trigger Performance Verification Using a Probe Test Apparatus. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. v. 25, n. 2, p. 147-153, 2003.

MITUTOYO. Catálogo Geral de Produtos PG705. Disponível em: <http://www.mitutoyo.com.br/site/produtos/pdf/catalogo.pdf> Acesso em: 14 nov. 2013.

MONTGOMERY, D. C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004, 516 p.

MORAIS, C. A. G. Modelos de Sintetização Plena e Reduzida de Erros em Máquinas de Medir por Coordenadas. São Carlos, 2012. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

MORSE, E. Operation a Coordinate Measuring Machine. In: HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2.ed. New York: CRC Press, 2011. 592 p.

MURTHY T.S.R. A Comparison of Different Algorithms for Circularity Evaluation. Precision Engineering. v. 8, n. 1, p. 19-23, 1986.

ORREGO, R.M.; DI GIACOMO B.; ABACKERLI, A. J. Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: Considerações Gerais. Revista de Ciência & Tecnologia. v. 8, n. 16, p. 43-56, 2000.

PATIÑO, H.; GONZALES-MADRUGA, D.; CUESTA, E.; ALVAREZ, B.; BARREIRO, J. Study of Virtual Features in the Perfomance of Coordinate Measuring Arms. Procedia Engineering. v. 69. p. 433-441. 2014.

PEREIRA, P.H.; NI, J. Environmental Control. In: HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2.ed. New York: CRC Press, 2011. 592 p.

PHILLIPS, S.D. Performance Evaluation. In: HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2.ed. New York: CRC Press, 2011. 592 p.

PIEKAR, D. S. H. Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PIRATELLI-FILHO, A. FERNANDES, F.H.T.; ARENCIBIA, R.V. Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs Evaluation. Precision Engineering. v. 36. p. 349-355. 2012.

PIRATELLI-FILHO, A. Método para Avaliação do Desempenho de Máquinas de Medir a Três Coordenadas através de Planejamento de Experimentos. 1997. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

PORATH, M. C. Konstruktion und Erprobung spezieller Form-Prüfkörper und Konzeption einer Vorgehensweise zur modellbasierten Identifizierung und Quantifizierung von Einflussgrössen für die Formprüfung auf Koordinatenmessgeräten. Aachen, 2005. 111 f. Masterarbeit - Lehrstuhl für fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement - WZL/RWTH/AACHEN.

RAGHUNANDAN, R.; RAO, P. V. Selection of Sampling Points for Accurate Evaluation of Flatness Error Using Coordinate Measuring Machine. Journal of Materials Processing Technology. v. 202. p. 240-245. 2008.

RAJAMOHAN, G. SHUNMUGAM, M.S.; SAMUEL, G.L. Effetct of Probe Size and Measurement Strategies on Assessment of Freeform Profile Deviations Using Coordinate Measuring Machine. Measurement. v. 44, p. 832-841, 2011.

RENISHAW. Sistema de Apalpados por Toque. Guia do Usuário H-1000-5021-06-B Disponível em: <http://www.renishaw.com.br/pt/downloads-de-manuais-e-guias-de-instalacao--14271> Acesso em: 30 abr. 2016.

SAMUEL, G.L.; SHUNMUGAM M.S. Evaluation of Circularity from Coordinate and Form Data Using Computational Geometric Techniques. Precision Engineering. v. 24, n. 3, p. 251-263, 2000.

SATO D.P.V. Determinação da Incerteza de Medição a Três Coordenadas. 2002. Relatório de Pós-Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos.

SCHWENKE, H.; KANPP, W.; HAITJEMA, H.; WECKENMANN, A. Geometric Error Measurement and Compensation of Machines-An Update. CIRP Annals - Manufacturing Tecnology. v. 57. p. 660-675. 2008.

SHAKARJI, C.M. Coordinate Measuring System Algorithm and Filters. In: HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2.ed. New York: CRC Press, 2011. 592 p.

SHAKARJI, C.M.; CLEMENT, A. Reference Algorithms for Chebyshev and One-Sided Data Fitting for Coordinate Metrology. CIRP Annals, Manufacturing Tecnology. v. 53, n. 1, p. 439-442, 2004.

SOUSA, A.R.; WANDEK, M. Deficiências da Metrologia Industrial no Brasil no Correto Entendimento do GD&T e na Definição de Estratégias de Medição Consistentes para o seu Controle Geométrico. Anais do V Congresso Brasileiro de Metrologia. Salvador, Bahia.

SUI W.; ZHANG D. Four Methods for Roundness Evaluation. Physics Procedia. v. 24, p. 2159-2164, 2012.

VALDÉS, R.A. Equacionamento das Componentes do Erro Volumétrico em Máquinas de Medir a Três Coordenadas. 1999. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

VALDÉS, R.A. Sintetização de erros termicamente induzidos em Máquinas de Medir a Três Coordenadas. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

VALDÉS, R.A.; SOUZA, C.C.; COSTA, H.L.; PIRATELLI-FILHO, A. Simplified Model to Estimate Uncertainty in CMM. Journal of the Brazilian Society of Mechanical. v. 37, n. 1, 2015.

WALKER, R. CMM Form Tolerance Algorithm Testing, GIDEP Alert X1-A-88-01. Government-industry data exchange, DOD, Washington, D.C. 1988.

WECKENMANN, A.; EITZERT, H.; GARMER, M.; WEBER, H. Functionality-oriented Evaluation and Sampling Strategy in Coordinate Metrology. Precision Engineering. v. 17, n. 4, p. 244-252, 1995.

WECKENMANN, A.; GEWANDE, B.; KOORDINATENMESSTECHNIK. Flexible Messstrategien für Maß, Form und Lage. München, 1999.

WECKENMANN, A.; HEINRICHOWSKI M.; MORDHORST, H.J. Design of Gauges and Multipoint Measuring Systems Using Coordinate-Measuring-Machine data End Computer Simulation. Precision Engineering. v. 13. p. 203-207. 1991.

WECKENMANN A.; HARTMAN, W. Function-oriented Measurements – the Path from Macro to Micro and Nano Range. Procedia Engineering. n. 63 p. 861-872, 2013.

WECKENMANN A.; KNAUER, M. The Influence of Measurement Strategy on the Uncertainty of CMM-Measurements. CIRP Annals - Manufacturing Tecnology. v.47, n.1, p. 451-454, 1998.

WECKENMANN A.; KNAUER, M.; KILLMAIER, T. Uncertainty of Coordinate Measurement on Sheet-Metal Parts in the Automotive Industry. Journal of Materials Processing Technology. v.115, p. 9-13, 2001.

WEN X.; XIA Q.; ZHAO Y. An Effective Genetic Algorithm for Circularity Error Unified Evaluation. Internacional Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 46, n. 14, p. 1770-1777, 2006.

WILHELM, R.G.; HOCKEN, R.; SCHWENKE, H. Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement. CIRP Annals - Manufacturing Tecnology. v. 50. p. 553-563. 2001.

XIUMING L.; ZHAOYAO S. The Relationship between the Minimum Zone Circle and the Maximum Inscribed Circle and the Minimum Circumscribed Circle. Precision Engineering. v. 33, n. 3, p. 284-290, 2009.

ZHANG, G.; VEALE, R.; CHARLTON, T.; BORCHARD, B.; HOCKEN, R. Error Compensation of Coordinate Measuring Machines. CIRP Annals - Manufacturing Tecnology. v. 34, p. 445-448, 1985.

ZHANG, X.; ZHANG H.; HE X.; XU M.; JIANG X. Chebyshev fitting of complex surfaces for precision metrology. Measurement. v. 46, n. 9, p. 3720-3724, 2013.

ZHU L.; DING H.; XIONG Y. A Steepest Descent Algorithm for Circularity Evaluation. Computer-Aided Design. v. 35, n. 3, p. 255-265, 2003.

ZIRONDI, R. B. Uma Contribuição ao Modelo de Sintetização de Erros em Máquinas de Medir a Três Coordenadas. 2001. Qualificação de Doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.

ANEXOS

Anexo I – Certificado de calibração MMC Mitutoyo BR

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0031

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

Cliente : FUNDACAO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA
Endereço :Avenida Amazonas, 2121 - Campus Umuarama - Uberlandia - MG. - CEP - 38400-902

Ordem de Serviço : 035.766/001

I. Objeto Calibrado :

Máquina de Medição por Coordenadas
Fabricante : Mitutoyo
MMC Modelo : BRM-443
No de Série : 0021902 / Código : 196-667-65
Identif. do Cliente: N.C
Faixa Nominal : 400 x 400 x 300 mm
Contador Digital / Controlador
Modelo : N.C
No Série : N.C
Resolução : 0,0005 mm
Cabeçote
Modelo : MH20i
No Série : 7F8912
Probe
Modelo : TP20
No Série : 6T4567
Rack
Modelo : N.C
No Série : N.C
Programa de Medição
Programa : Geopak Win
Versão : 3.0R16
Dongle No. : 10-10336238

II. Notas:

1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V_{ef} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
3. Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.
4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PML-0030 revisão 3.
6. Condição ambiental: Temperatura ambiente: (20,5 ± 0,5)°C
7. Endereço e local da calibração são os mesmos.

III. Padrões utilizados :

Padrão Escalonado		Termômetro		Esfera Padrão	
No Série :	500034	No Série :	T1FA016	No Série :	D0106
Certificado No :	04980/13	Certificado No :	LV22179/12	Certificado No :	00848/12
Emitido em :	14/05/2013	Emitido em :	18/06/2012	Emitido em :	09/02/2012
Validade :	11/2013	Validade :	06/2014	Validade :	02/2014

Data da Calibração : 28 de Maio de 2013
Data da Emissão : 08 de Julho de 2013

Carlos Kazuo Sugiuke
Chefe Laboratório de Metrologia

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
•Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

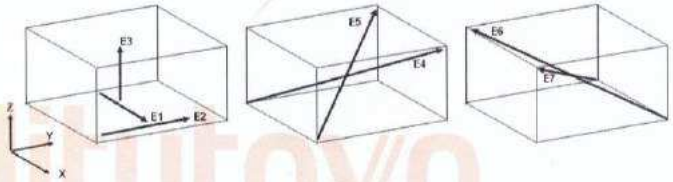
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

IV. Resultado das Medições :

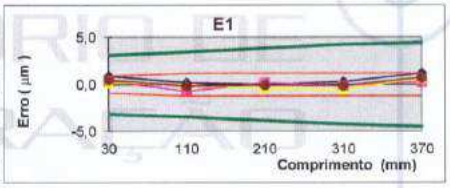
4.1. Verificações iniciais do equipamento :
a . Movimento da Máquina : OK
b . Condições da área de Medição : OK
c . Avaliação do Sist. Pneumático : OK
d . Limpeza das superfície de ref. : OK

4.2. Resultado da Medição:



4.2.1. Resultado da medição do eixo " X ", (E1)

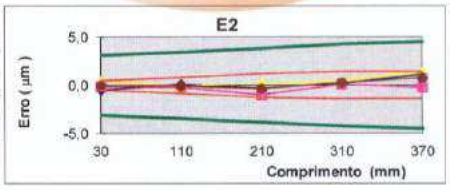
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,4	0,2	0,5
110	0,2	-0,7	0,0	-0,2
210	0,0	0,2	-0,4	-0,1
310	0,3	-0,1	-0,6	-0,1
370	1,2	0,3	0,7	0,7



Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 +L/1500) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
Fator de abrangência (k) = 2,03
Graus de liberdade (Veff) = 88

4.2.2. Resultado da medição do eixo" Y ", (E2)

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1º. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,5	-0,1	0,5	0,0
110	0,1	-0,2	-0,1	-0,1
210	-0,3	-1,0	0,2	-0,4
310	0,2	0,1	0,5	0,3
370	1,1	-0,2	1,4	0,8



Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 +L/3000) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
Fator de abrangência (k) = 2,08
Graus de liberdade (Veff) = 33

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
•Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

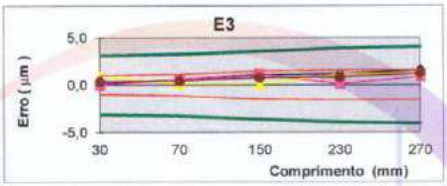
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

4.2.3. Resultado da medição do eixo " Z ", (E3)

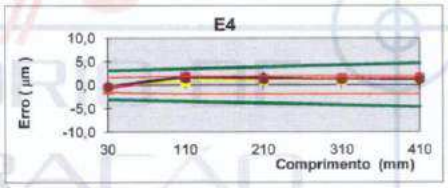
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,1	0,0	1,0	0,4
70	0,6	0,6	0,1	0,4
150	1,1	1,2	0,1	0,8
230	1,2	0,1	1,2	0,8
270	1,6	0,9	1,3	1,3



Incerteza de medição expandida (U) = (0,9 +L/3000) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
Fator de abrangência (k) = 2,11
Graus de liberdade (Veff) = 24

4.2.4. Resultado da medição do volume, (E4)

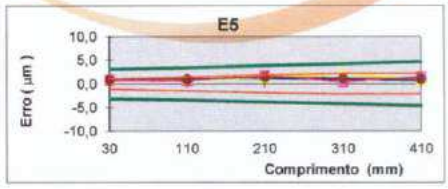
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4
110	1,9	1,7	0,9	1,5
210	1,6	1,2	1,1	1,3
310	1,2	1,4	1,1	1,2
410	1,1	1,5	1,4	1,3



Incerteza expandida de medição (U) = (0,7 +L/2600) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
Fator de abrangência (k) = 2,02
Graus de liberdade (Veff) = 148

4.2.5. Resultado da medição do volume, (E5)

Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,8	1,1	0,9
110	1,1	0,7	1,0	0,9
210	1,2	1,8	1,3	1,4
310	0,9	0,4	2,1	1,1
410	0,7	1,5	0,9	1,0



Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 +L/2900) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
Fator de abrangência (k) = 2,04
Graus de liberdade (Veff) = 59

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
•Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5836 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

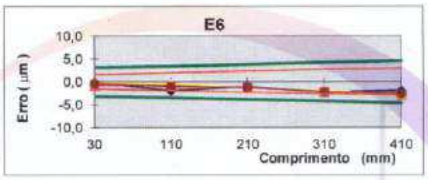
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº. 0031

4.2.6. Resultado da medição do volume, (E6)

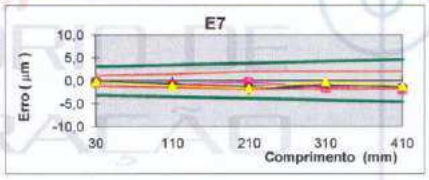
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4
110	-1,9	-0,9	-0,5	-1,1
210	-1,1	-1,3	-1,3	-1,2
310	-2,2	-2,3	-1,9	-2,1
410	-1,9	-2,9	-2,7	-2,5



Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 +L/2800) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
Fator de abrangência (k) = 2,04
Graus de liberdade (Veff) = 65

4.2.7. Resultado da medição do volume, (E7)

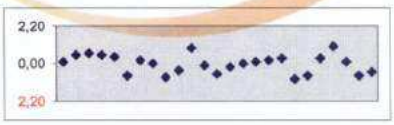
Comprimento (L) (mm)	Erro (µm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2
110	-0,6	-0,9	-1,1	-0,9
210	-1,9	-0,3	-1,7	-1,3
310	-1,2	-1,6	-0,2	-1,0
410	-1,3	-1,9	-1,2	-1,5



Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 +L/3000) µm , onde: L = comprimento em " mm ".
Fator de abrangência (k) = 2,07
Graus de liberdade (Veff) = 38

4.2.8. Erro de Apalpação (P)

Erro de apalpação = (1,9 ± 1,2) µm
Fator de abrangência (k) = 2,00
Graus de liberdade (Veff) = infinito



5. Observações Gerais :

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
•Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

Anexo II – Certificado de calibração anel-padrão de VC 15,996 mm

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0031

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 8262/10

Cliente: " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITARIO."
Endereço: Avenida Engenheiro Diniz , 1178 - Uberlândia - MG

Ordem de Serviço: 051.297

1 - Objeto calibrado:

Calibrador Anel Liso Cilíndrico
Fabricante: Mitutoyo
Código: 177-177
Nº. de Série: 083047
Identificação do proprietário: Não consta

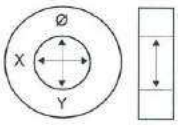
2 - Padrão utilizado na calibração:

Calibrador Anel Liso Cilíndrico	Número: 881420
Certificado Nº. DIMCI 2342/09 - INMETRO	Validade: 09/2012
Máquina de Medição Longitudinal	Número: 2442
Certificado Nº. 0240/09 - RBC - Mitutoyo.	Validade: 01/2011

3 - Procedimento de medição: Pml - 0010 Versão: 1/3

O diametro do anel foi calibrado nos eixo X e Y, na altura media , conforme figura abaixo.

4 - Resultado da calibração: O resultado é a média das calibrações.



Diâmetro Gravado (mm)	Resultado (mm)		Incerteza de Medição (mm)
15,996	Sentido " X "	15,9965	0,0010
	Sentido " Y "	15,9964	0,0010

5 - Incerteza de medição:

A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência k = 2 para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

6 - Nota: Temperatura ambiente: (20,0 ± 0,5) °C

Data da calibração: 26 de Junho de 2010

Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Depto Garantia da Qualidade
Emissão: 26/06/10

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
•Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

Anexo III – Certificado de calibração anel-padrão de VC 40,000 mm

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0031

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 8265/10

Cliente: " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITARIO."
Endereço: Avenida Engenheiro Diniz , 1178 - Uberlândia - MG

Ordem de Serviço: 051.297

1 - Objeto calibrado:

Calibrador Anel Liso Cilíndrico
Fabricante: Mitutoyo
Código: 177-290
Nº. de Série: 090576
Identificação do proprietário: Não consta

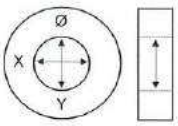
2 - Padrão utilizado na calibração:

Calibrador Anel Liso Cilíndrico	Número: 881420
Certificado Nº. DIMCI 2342/09 - INMETRO	Validade: 09/2012
Máquina de Medição Longitudinal	Número: 2442
Certificado Nº. 0240/09 - RBC - Mitutoyo.	Validade: 01/2011

3 - Procedimento de medição: Pml - 0010 Versão: 1/3

O diametro do anel foi calibrado nos eixo X e Y, na altura media , conforme figura abaixo.

4 - Resultado da calibração: O resultado é a média das calibrações.



Diâmetro Gravado (mm)	Resultado (mm)		Incerteza de Medição (mm)
40,000	Sentido " X "	39,9997	0,0010
	Sentido " Y "	40,0002	0,0010

5 - Incerteza de medição:

A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência k = 2,1 para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

6 - Nota: Temperatura ambiente: (20,0 ± 0,5) °C

Data da calibração: 26 de Junho de 2010

Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Depto Garantia da Qualidade
Emissão: 26.06.10

Mitutoyo LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO BRASIL

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
•Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

Anexo IV – Certificado de calibração máquina universal de medir comprimentos

LMD LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL	Data: 01/07/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 1 de 5
Certificado de Calibração: CCA-0009/2012		

1. Cliente

Nome ou Razão Social: Laboratório de Metrologia Dimensional
Endereço: Avenida João Naves de Ávila, 2121
Telefone: (34) 3239-4584
E-mail: Não consta

2. Instrumento de medição

Instrumento: Máquina Universal de Medir Comprimentos
Tipo: Analógico
Fabricante: Carl Zeiss Jena
Faixa de medição: 100 mm
Resolução: 0,1 µm
Identificação: U 32 743 251
Última calibração: Não consta

3. Calibração

Ordem do serviço: 01/2012
Data do pedido: 15/06/2012
Data da calibração: 27/06/2012

4. Descrição

A análise visual da máquina constatou: marcas de oxidação na superfície do fuso; partículas das mais diversas impurezas (poeira, vaselina com aspecto degradável, fiapos, óleo proveniente do contato com as mãos, dentre outros) nas guias por onde se deslocam os cabeçotes e nas superfícies de medição fixa e móvel; na lente externa da ocular foi observada uma camada de poeira.

Foi efetuada uma limpeza geral da máquina utilizando um pano embebido em álcool, cotonetes e escovas. Em seguida foi aplicada uma camada fina de vaselina sólida sobre todas as superfícies, que podem sofrer oxidação (fuso, fases de medição e guias) de modo a garantir a conservação e prevenir danos futuros.

Observou-se que a máquina não esta perfeitamente nivelada, entretanto, por não possuir as chaves apropriadas para esse fim não foi melhorado o nivelamento. A imagem fornecida pela ocular mostra as três escalas com nitidez. Aparentemente, todos os componentes funcionam de forma adequada.

A inspeção visual dos blocos padrão não revelou nenhuma anomalia, quanto a sua conservação.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.

5. Condições ambientais

Temperatura: $(20 \pm 1)\ °C$

6. Padrões e equipamentos

Tipo: Jogo de Bloco Padrão classe 0
Fabricante: Starrett
Identificação: Ref.: RS12.MA1
Faixa nominal: 2,5 a 75 mm
Número do Certificado de Calibração: 1505/11
Incerteza expandida:

Incerteza dos blocos padrão	
VN [mm]	IM (U) [µm]
2,5	0,08
5,1	0,08
7,7	0,08
10,3	0,09
12,9	0,09
15,0	0,09
17,6	0,09
20,2	0,09
22,8	0,09
25,0	0,09
50,0	0,11
75,0	0,12

VN = Valor Nominal; **IM** = Incerteza de Medição
Nota: k igual a 2 para todos os casos

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.

LMD LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL	Data: 01/07/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 3 de 5
Certificado de Calibração: CCA-0009/2012		

6. Resultados da calibração

Resultado da calibração (mm)							
VVC	L1	L2	L3	L4	L5	Média	Desvio Padrão
0	0	0	0	0	0	0	0
2,5	2,5000	2,5000	2,5000	2,5000	2,5000	2,5000	0
7,7000	7,7003	7,7002	7,7000	7,7003	7,7001	7,7002	0,000130
10,3000	10,3005	10,3002	10,3004	10,3005	10,3006	10,3004	0,000152
17,6000	17,6004	17,6002	17,6003	17,6003	17,6003	17,6003	0,000071
20,2000	20,2004	20,2005	20,2004	20,2003	20,2003	20,2004	0,000084
25,0000	25,0008	25,0004	25,0007	25,0004	25,0004	25,0005	0,000195
50,0000	50,0002	50,0002	50,0003	50,0000	50,0000	50,0001	0,000134
75,0000	75,0006	75,0002	75,0003	75,0001	75,0003	75,0003	0,000187
87,9000	87,9003	87,9004	87,9006	87,9005	87,9002	87,9004	0,000158
100,0000	100,0002	100,0004	100,0002	100,0000	100,0001	100,0002	0,000148

Resultado da calibração			
VVC (mm)	Erro (µm)	Erro + 2s (µm)	Erro -2s (µm)
0	0	0	0
2,5	0	0	0
7,7000	0,18	0,44	-0,08
10,3000	0,44	0,74	0,14
17,6000	0,30	0,44	0,16
20,2000	0,38	0,55	0,21
25,0000	0,54	0,93	0,15
50,0000	0,14	0,41	-0,13
75,0000	0,30	0,67	-0,07
87,9000	0,40	0,72	0,08
100,0000	0,18	0,48	-0,12

Observações:

VVC - variabilidade das leituras;

VI – valor de indicação médio;

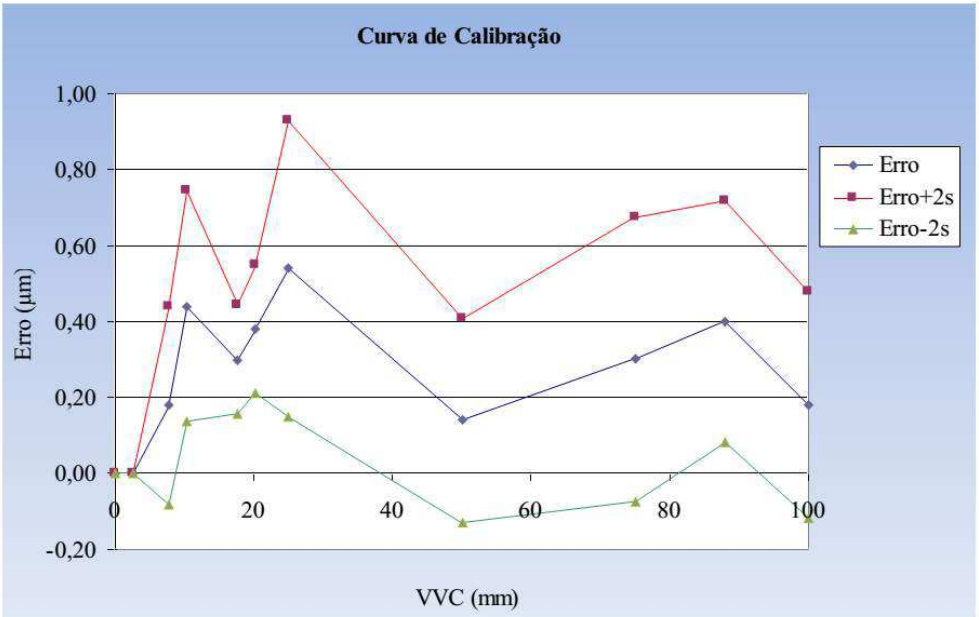
Tendência – valor de indicação médio (VI) menos o valor verdadeiro convencional (VVC);

[k] – fator de abrangência.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.

LMD LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL	Data: 01/07/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 4 de 5
Certificado de Calibração: CCA-0009/2012		

7. Curva de calibração



8. Incerteza da calibração

Componentes de incerteza				
VVC (mm)	**u_c (µm)**	**GLE**	**k**	**U (µm)**
0	0,0833	48,0693	0,011	**0,2**
2,5000	0,0835	48,5345	2,011	**0,2**
7,7000	0,1036	21,736	2,080	**0,2**
10,3000	0,1419	9,024	2,266	**0,3**
17,6000	0,1279	21,83	2,080	**0,3**
20,2000	0,1096	294,90	1,903	**0,2**
25,0000	0,1450	30,60	2,042	**0,3**
50,0000	0,2054	549,72	1,964	**0,4**
75,0000	0,2041	610,57	1,974	**0,6**
87,9000	0,3372	2065,27	1,961	**0,7**
100,0000	0,3773	4185,90	1,961	**0,7**

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.

LMD LABORATÓRIO DE METROLOGIA DIMENSIONAL	Data: 01/07/2012	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Gerência da Qualidade	Página: 5 de 5

Certificado de Calibração: CCA-0009/2012

A incerteza expandida relatada é declarada como a incerteza padrão combinada de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t corresponde a um nível de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza da calibração foi determinada de acordo com a terceira edição do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição.

PARECER:
A Máquina Universal de Medir Comprimentos esta apta para uso

Data da Emissão: Uberlândia, 3 de julho de 2012.

Rosenda V.

Rosenda Valdés Arencibia
Responsável Técnico

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao objeto submetido à medição nas condições especificadas. Sua reprodução só poderá ser completa, sem nenhuma alteração.
Av. João Naves de Ávila, 2121 – UFU, CAMPUS Santa Mônica, Bloco 1O Uberlândia - MG. CEP 38400-902. Fone (34) 3239 4584

Anexo V – Certificado de calibração termohigrômetro digital Instrutherm

PRECISÃO METROLÓGICA elus INSTRUMENTAÇÃO

Certificado de Calibração

Calibração NBR ISO/IEC 17025 — CAL 0439

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 1 / 2

CONTRATANTE :	Universidade Federal de Uberlândia - UFU
ENDEREÇO :	Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG
INTERESSADO :	O mesmo
ENDEREÇO :	O mesmo
INSTRUMENTO :	Termohigrômetro Digital
FABRICANTE :	Instrutherm
MODELO :	HT-260
IDENTIFICAÇÃO :	Não especificado
NÚMERO DE SÉRIE :	06120362

DATA DA CALIBRAÇÃO :	19/06/2013	LOCAL DA CALIBRAÇÃO:	Laboratório Elus
PRÓXIMA CALIBRAÇÃO :	Determinado pelo cliente	TEMPERATURA DO AR :	23°C ± 5°C
DATA DA EMISSÃO :	20/06/2013	UMIDADE RELATIVA AR :	45%UR a 70%UR

PADRÕES UTILIZADOS :

Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :

- A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.

OBSERVAÇÕES :

- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto.
- Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.
- k= fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) / Veff= graus de liberdade efetivo. / I.M.= Incerteza de Medição.

Julio Cesar Pereira de Souza
Gerente Técnico Substituto

RODRIGO GOMES CORDEIRO
GERENTE TÉCNICO

TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA

A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Rua Dendezeiro, 29 I Jd. Matarazzo I São Paulo I SP I 03813-130 I Tel 11 2214-0049 I Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br

PRECISÃO METROLÓGICA
elus
INSTRUMENTAÇÃO

Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 2 / 2

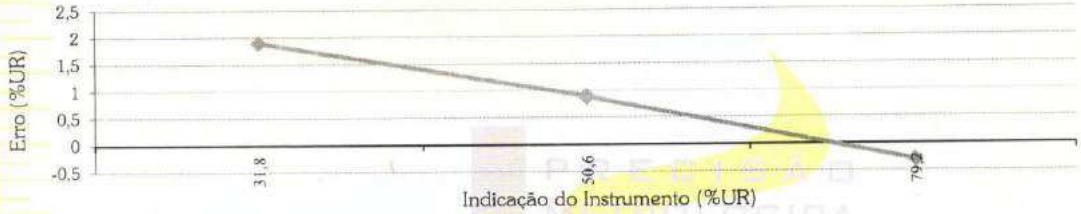
Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

UMIDADE RELATIVA DO AR SENSOR EXTERNO : TEMPERATURA DA CALIBRAÇÃO - 20°C

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado
Faixa de medição: 0 ~ 100 %UR, divisão de escala: 0,1 %UR.

Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞



TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado
Faixa de medição: -20 ~ 60 °C, divisão de escala: 0,1 °C.

Imersão (mm)	Indicação do Instrum. (°C)	Valor Verdadeiro (°C)	Erro (°C)	I.M. (°C)	k	Veff
---	20,6	20,0	0,6	0,3	2,00	∞
---	25,9	25,0	0,9	0,3	2,00	∞
---	31,3	30,0	1,3	0,3	2,00	∞



A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Rua Dendezeiro, 29 I Jd. Matarazzo I São Paulo I SP I 03813-130 I Tel 11 2214-0049 I Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br

Anexo VI – Certificado de calibração MMC Zeiss

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025
CAL 0234

Certificado de Calibração n.° 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

1. Solicitante do Serviço

1.1. Cliente: Universidade Federal de Uberlândia

1.2. Endereço: Av. João Neves de Avila, 2121 Uberlândia - MG

2. Máquina de Medição por Coordenadas Calibrada

2.1. Modelo: Contura G2

2.2. Fabricante: Carl Zeiss

2.3. Nº de Série: # 502976

2.4. Cabeçote: RDS / VAST xxt

2.5. Software: Calypso

2.6. Local: LTAD

3. Especificação do Fabricante

3.1. Tolerância de Medição Declarada:
(ISO 10360-2) (L = mm)
E = 1,9 + L / 300 µm

3.2. Erro de Apalpação: 1,9 µm

3.4. Resolução (µm): 0,2

3.3. Volume de Medição:
X = 1000 mm
Y = 1200 mm
Z = 600 mm

4. Rastreabilidade dos Padrões de Referência

4.1. Identificação	4.2. Descrição	4.3. Nº do Certificado	4.4. Emitente	4.5. Data Calibração	4.6. Validade (anos)
IMT-028	Padrão Escalonado 700 mm (SE0700102)	DIMCI 1888/2011	Inmetro	25/08/2011	2
IMT-040	Termometro Digital (01627410)	CZA01/2011	Norberto Mischi	04/07/2011	2
IMT-054	Esfera de Referência 30 mm (H8328)	4193/10	CERTI	26/07/2010	5
IMT-062	Padrão Escalonado 1100 mm (SE1100146)	DIMCI 1092/2011	Inmetro	11/05/2011	2

5. Procedimento de Calibração Utilizado

5.1. Baseado no procedimento interno POP-LAB-04 rev. 02 que segue as diretrizes da norma ISO 10360-2.

6. Notas

6.1. Este certificado atende aos requisitos de acreditação do CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida;

6.2. O presente certificado refere-se exclusivamete a Máquina de Medição por Coordenadas submetida à calibração nas condições especificadas;

6.3. É proibida a reprodução parcial ou total deste certificado, sem prévia autorização.

EXECUTANTE: Peterson Nagay
Técnico IMT

SIGNATÁRIO AUTORIZADO: Eng. Eduardo Rodrigues
Gerente da Qualidade

ZEISS Calibração

Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025
CAL 0234

Certificado de Calibração n.º 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

7. Condições de Temperatura durante a Calibração

7.1. Temperatura Ambiente:
(19,2 ± 0,5) ºC

7.2. Posições Avaliadas	Início da Avaliação				Término da Avaliação			
	Escala X (°C)	Escala Y (°C)	Escala Z (°C)	Padrão (°C)	Escala X (°C)	Escala Y (°C)	Escala Z (°C)	Padrão (°C)
Linear Eixo X	20,0	----	----	19,4	20,0	----	----	19,4
Linear Eixo Y	----	20,0	----	19,4	----	20,0	----	19,2
Linear Eixo Z	----	----	20,0	19,3	----	----	20,0	19,4
Volumétrica 1	20,0	20,0	20,0	19,7	20,0	20,0	20,0	19,5
Volumétrica 2	20,0	20,0	20,0	19,5	20,0	20,0	20,0	19,4
Volumétrica 3	20,0	20,0	20,0	19,6	20,0	20,0	20,0	19,5
Volumétrica 4	20,0	20,0	20,0	19,7	20,0	20,0	20,0	19,6

8. Resultados

8.1. Incerteza de Medição:
A incerteza expandida declarada é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência k, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

8.2. Avaliação do Erro de Apalpação:
Utilizando um apalpador com a direção do eixo da haste não paralela aos três eixos da MMC, a esfera de referência padrão (item 4.2) é medida com 25 pontos utilizando o elemento esfera do software de medição. A amplitude dos afastamentos radiais (erro de forma), Rmax – Rmin, em relação a esfera média calculada utilizando estes 25 pontos, determinada pelo método dos mínimos quadrados (Gauss) é o valor do erro de apalpação, sendo que o valor apresentado a seguir é a média de três medições avaliadas em conjunto.

Desvio Médio: *-0,2 µm* **Incerteza de Medição Calculada:** *U = ± 0,5 µm*

8.3. Desvios Encontrados:
São determinados pela diferença entre o valor indicado pela MMC e o valor verdadeiro convencional (VVC) das distâncias dos respectivos blocos do padrão escalonado, sendo que os valores apresentados são uma média de 10 medições avaliadas em conjunto.
Desvio = Valor Indicado - Valor Verdadeiro Convencional (VVC)
O padrão escalonado (item 4.2) foi colocado em 7 posições diferentes dentro do volume da MMC, sendo 3 paralelas aos eixos X, Y e Z e 4 diagonais espaciais (volumétricas).

8.3.1. "Ajustes" da MMC antes de iniciar a calibração:
A máquina de medição por coordenadas foi ajustada antes da calibração, onde os ajustes não fazem parte do escopo de acreditação do laboratório de calibração da Carl Zeiss do Brasil.

Desvio Médio: Os desvios médios encontrados durante a calibração estão relatados nas tabelas das páginas 3 a 9 conforme descrito no item 8.3 deste certificado.

Incerteza de Medição Calculada: *U = ± (0,7 + L / 278) µm* ***,onde: L = posição em " mm ".*** ***para K =*** *2,00*

Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0234

Certificado de Calibração n.° 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

8.3.2. Medição Linear do Eixo "X":



Notas:

1) As tolerâncias dos desvios são obtidas através das fórmulas declaradas pelo fabricante descritas na página 1 item 3 deste certificado;

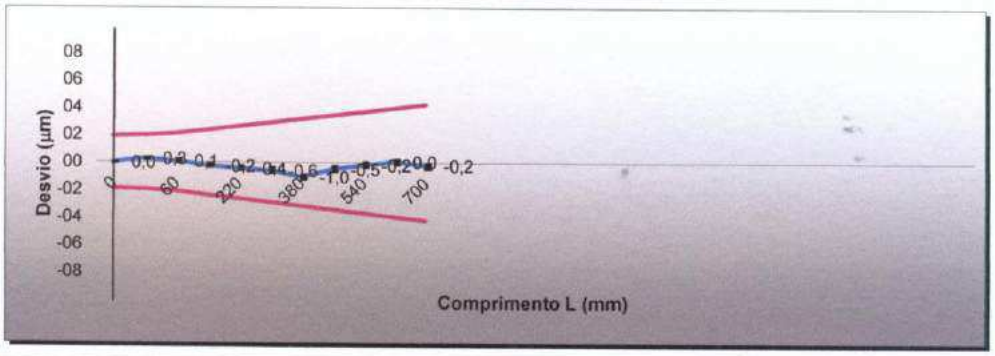
2) Os apalpadores utilizados para esta medição pertencem ao laboratório da CZB;

3) Se necessário, será feito acoplamento do padrão quando o valor de 50% do eixo medido for maior que o comprimento físico do padrão utilizado.

Coeficiente de Expansão		
Bloco Padrão:	11,5	* 10E-6 1/°C
Escala:	0,0	* 10E-6 1/°C

Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)	Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)
0	0,0	0,0000	± 1,9				
20	0,3	19,9988	± 2,0				
60	0,1	59,9777	± 2,1				
140	-0,2	139,9464	± 2,4				
220	-0,4	219,9076	± 2,6				
300	-0,6	299,8641	± 2,9				
380	-1,0	379,8207	± 3,2				
460	-0,5	459,7761	± 3,4				
540	-0,2	539,7360	± 3,7				
620	0,0	619,6900	± 4,0				
700	-0,2	699,6509	± 4,2				

Gráfico da Média dos Desvios



Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0234

Certificado de Calibração n.º 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

8.3.3. Medição Linear do Eixo "Y":



Notas:

1) As tolerâncias dos desvios são obtidas através das fórmulas declaradas pelo fabricante descritas na página 1 item 3 deste certificado;

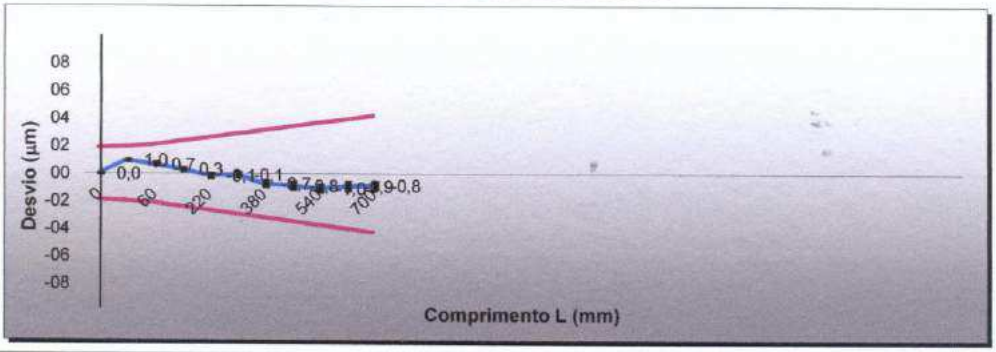
2) Os apalpadores utilizados para esta medição pertencem ao laboratório da CZB;

3) Se necessário, será feito acoplamento do padrão quando o valor de 50% do eixo medido for maior que o comprimento físico do padrão utilizado.

Coeficiente de Expansão		
Bloco Padrão:	11,5	* 10E-6 1/°C
Escala:	0,0	* 10E-6 1/°C

Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)	Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)
0	0,0	0,0000	± 1,9				
20	1,0	19,9988	± 2,0				
60	0,7	59,9777	± 2,1				
140	0,3	139,9464	± 2,4				
220	-0,1	219,9076	± 2,6				
300	-0,1	299,8641	± 2,9				
380	-0,7	379,8207	± 3,2				
460	-0,8	459,7761	± 3,4				
540	-1,0	539,7360	± 3,7				
620	-0,9	619,6900	± 4,0				
700	-0,8	699,6509	± 4,2				

Gráfico da Média dos Desvios



Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0234

Certificado de Calibração n.° 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

8.3.4. Medição Linear do Eixo "Z":



Notas:

1) As tolerâncias dos desvios são obtidas através das fórmulas declaradas pelo fabricante descritas na página 1 item 3 deste certificado;

2) Os apalpadores utilizados para esta medição pertencem ao laboratório da CZB;

3) Se necessário, será feito acoplamento do padrão quando o valor de 50% do eixo medido for maior que o comprimento físico do padrão utilizado.

Coeficiente de Expansão		
Bloco Padrão:	11,5	* 10E-6 1/°C
Escala:	0,0	* 10E-6 1/°C

Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)	Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)
0	0,0	0,0000	± 1,9				
20	-0,3	19,9988	± 2,0				
60	0,0	59,9777	± 2,1				
140	0,0	139,9464	± 2,4				
220	-0,1	219,9076	± 2,6				
300	0,1	299,8641	± 2,9				
380	0,0	379,8207	± 3,2				
460	0,4	459,7761	± 3,4				
540	0,5	539,7360	± 3,7				

Gráfico da Média dos Desvios



Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0234

Certificado de Calibração n.º 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

8.3.5. Medição Volumétrica - Posição 1:



Notas:

1) As tolerâncias dos desvios são obtidas através das fórmulas declaradas pelo fabricante descritas na página 1 item 3 deste certificado;

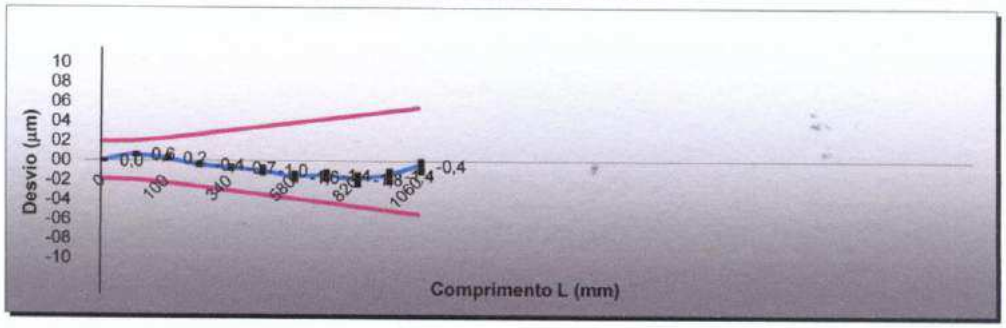
2) Os apalpadores utilizados para esta medição pertencem ao laboratório da CZB;

3) Se necessário, será feito acoplamento do padrão quando o valor de 66% do eixo diagonal medido for maior que o comprimento físico do padrão utilizado.

Coeficiente de Expansão		
Bloco Padrão:	11,5	* 10E-6 1/°C
Escala:	0,0	* 10E-6 1/°C

Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)	Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)
0	0,0	0,0000	± 1,9				
20	0,6	19,9506	± 2,0				
100	0,2	100,0064	± 2,2				
220	-0,4	219,8604	± 2,6				
340	-0,7	339,9369	± 3,0				
460	-1,0	459,8741	± 3,4				
580	-1,6	579,8543	± 3,8				
700	-1,4	699,8355	± 4,2				
820	-1,8	819,8656	± 4,6				
940	-1,4	939,7811	± 5,0				
1060	-0,4	1059,8687	± 5,4				

Gráfico da Média dos Desvios



Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025
CAL 0234

Certificado de Calibração n.º 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

8.3.6. Medição Volumétrica - Posição 2:



Notas:

1) As tolerâncias dos desvios são obtidas através das fórmulas declaradas pelo fabricante descritas na página 1 item 3 deste certificado;

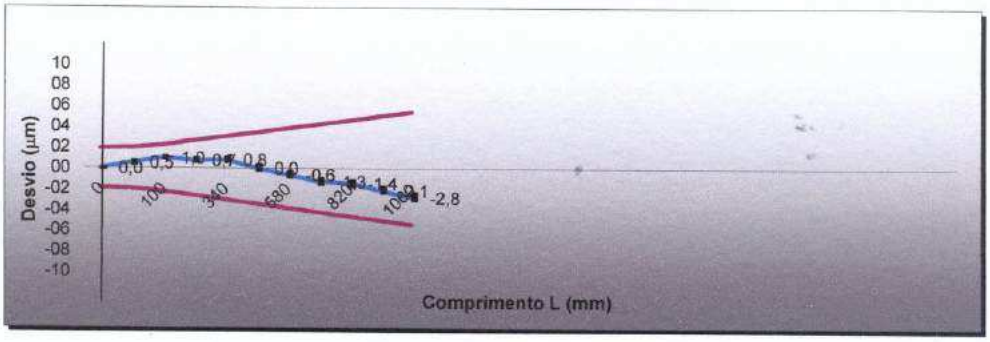
2) Os apalpadores utilizados para esta medição pertencem ao laboratório da CZB;

3) Se necessário, será feito acoplamento do padrão quando o valor de 66% do eixo diagonal medido for maior que o comprimento físico do padrão utilizado.

Coeficiente de Expansão		
Bloco Padrão:	11,5	* 10E-6 1/°C
Escala:	0,0	* 10E-6 1/°C

Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)	Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)
0	0,0	0,0000	± 1,9				
20	0,5	19,9506	± 2,0				
100	1,0	100,0064	± 2,2				
220	0,7	219,8604	± 2,6				
340	0,8	339,9369	± 3,0				
460	0,0	459,8741	± 3,4				
580	-0,6	579,8543	± 3,8				
700	-1,3	699,8355	± 4,2				
820	-1,4	819,8656	± 4,6				
940	-2,1	939,7811	± 5,0				
1060	-2,8	1059,8687	± 5,4				

Gráfico da Média dos Desvios



Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0234

Certificado de Calibração n.° 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

8.3.7. Medição Volumétrica - Posição 3:



Notas:

1) As tolerâncias dos desvios são obtidas através das fórmulas declaradas pelo fabricante descritas na página 1 item 3 deste certificado;

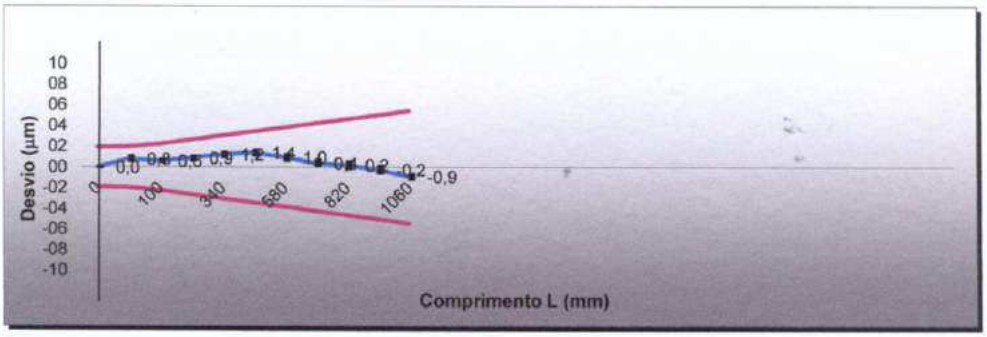
2) Os apalpadores utilizados para esta medição pertencem ao laboratório da CZB;

3) Se necessário, será feito acoplamento do padrão quando o valor de 66% do eixo diagonal medido for maior que o comprimento físico do padrão utilizado.

Coeficiente de Expansão		
Bloco Padrão:	11,5	* 10E-6 1/°C
Escala:	0,0	* 10E-6 1/°C

Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)	Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)
0	0,0	0,0000	± 1,9				
20	0,8	19,9506	± 2,0				
100	0,6	100,0064	± 2,2				
220	0,9	219,8604	± 2,6				
340	1,2	339,9369	± 3,0				
460	1,4	459,8741	± 3,4				
580	1,0	579,8543	± 3,8				
700	0,4	699,8355	± 4,2				
820	0,2	819,8656	± 4,6				
940	-0,2	939,7811	± 5,0				
1060	-0,9	1059,8687	± 5,4				

Gráfico da Média dos Desvios



Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

ZEISS

Laboratório de Calibração na Área Dimensional
IMT SERVIÇOS

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0234

Certificado de Calibração n.º 046 /2012

Data da Calibração: 2-mar-12 Data de Emissão: 28-mar-12

8.3.8. Medição Volumétrica - Posição 4:



Notas:

1) As tolerâncias dos desvios são obtidas através das fórmulas declaradas pelo fabricante descritas na página 1 item 3 deste certificado;

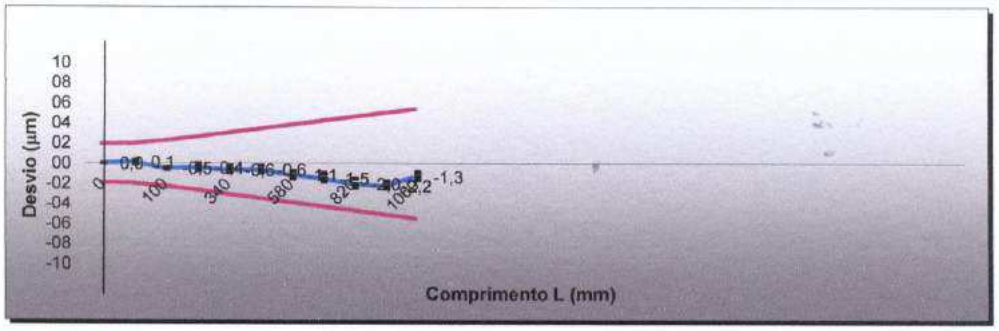
2) Os apalpadores utilizados para esta medição pertencem ao laboratório da CZB;

3) Se necessário, será feito acoplamento do padrão quando o valor de 66% do eixo diagonal medido for maior que o comprimento físico do padrão utilizado.

Coeficiente de Expansão		
Bloco Padrão:	11,5	* 10E-6 1/°C
Escala:	0,0	* 10E-6 1/°C

Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)	Comprimento L Avaliado (mm)	Desvio Médio (µm)	VVC do Padrão (mm)	Tolerância dos Desvios (µm)
0	0,0	0,0000	± 1,9				
20	0,1	19,9506	± 2,0				
100	-0,5	100,0064	± 2,2				
220	-0,4	219,8604	± 2,6				
340	-0,6	339,9369	± 3,0				
460	-0,6	459,8741	± 3,4				
580	-1,1	579,8543	± 3,8				
700	-1,5	699,8355	± 4,2				
820	-2,0	819,8656	± 4,6				
940	-2,2	939,7811	± 5,0				
1060	-1,3	1059,8687	± 5,4				

Gráfico da Média dos Desvios



Carl Zeiss do Brasil Ltda.
Av. das Nações Unidas, 21.711 - CEP 04795-100 - Jurubatuba - São Paulo - SP - Brasil
Fone: (0xx11) 5693-5541 - Fax: (0xx11) 5547-9671 - e-mail: qualidade@zeiss.org

Anexo VII – Certificado de calibração termohigrômetro digital EPTEC

RCQ
Controle de Qualidade

Laboratório de Metrologia Temperatura
Certificado de Calibração N.° TI0322/12 Página 1 de 1

CLIENTE

Fundação de Apoio Universitário - FAU
Avenida Engenheiro Diniz 1178 - Centro - Uberlândia - MG

DESCRIÇÃO DO OBJETO

OBJETO:	TERMOHIGRÔMETRO DIGITAL	**FAIXA DE INDICAÇÃO:**	- 40 à 70°C / 0 à 100 %
FABRICANTE:	EPTECH	**CÓDIGO IDENTIFICAÇÃO:**	NÃO CONSTA
TIPO/MODELO:	RHT20	**PROTOCOLO N°:**	0884/12
N° SÉRIE:	10058682	**VALOR DE 1 DIVISÃO (°c):**	0,1°C
TIPO DE SENSOR:	NÃO IDENTIFICADO	**VALOR DE 1 DIVISÃO (%):**	0,1%
MODO DE MEDIÇÃO: IN			

EQUIPAMENTOS E/OU PADRÕES

Código	Descrição	Número Certificado	Data Calibração	Data Validade	Calibrado por	Rastreabilidade
RCQ-149T	Termohigrômetro Digital	LV 15249/11	27/6/2011	30/6/2012	Visomes	INMETRO RBC: 0127
RCQ-149U	Termohigrômetro Digital	LV 15249/11	27/6/2011	30/6/2012	Visomes	INMETRO RBC: 0127

PROCEDIMENTO DA CALIBRAÇÃO

1. A calibração foi realizada por comparação ao padrão referenciado acima, segundo procedimento de calibração PC-T07 Rev 0.

Temperatura

Temperatura de Referência /°C	Objeto Calibrado /°C	Correção /°C	veff	k	U
	Média				/°C
18,2	18,3	-0,1	∞	2,00	0,3
23,5	23,7	-0,2	∞	2,00	0,3
28,7	28,8	-0,1	∞	2,00	0,3

Umidade Relativa do Ar

Umidade de Referência %	Objeto Calibrado %	Correção /%	veff	k	U
	Média				%
46	52	-6	∞	2,00	3
53	58	-5	∞	2,00	3
61	67	-6	∞	2,00	3

Data da Calibração: 16/04/2012

NOTAS:

1. *Este Certificado de Calibração só deve ser reproduzido por completo.*
2. *Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a qualquer lotes.*
3. *As Incertezas expandidas (U) relatadas são baseadas em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivo, para um nível de confiança de aproximadamente 95%, conforme o documento de referência EA-4/02.*
4. *Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura (ITS-90).*
5. *A temperatura durante o período de calibração encontrava-se em 23 °C ± 5 °C e a umidade relativa entre 45% e 70 %.*

OBSERVAÇÕES

1. *Correção = Valor adicionado algebricamente ao resultado não corrigido de uma medição para compensar um erro sistemático.*
2. *veff = Grau de Liberdade efetivo.*
3. *k= Fator de abrangência.*
4. *U= Incerteza expandida.*
5. *Temperatura Referência = Temperatura medida pelo padrão.*
6. *Umidade de Referência = Umidade medida pelo padrão.*

Calibrado por: **Tiago de Melo Araújo**
Metrologista

Marcos de Souza Lopes
Metrologista / Signatário Autorizado
Crea nº 2008154278

RCQ Controle da Qualidade Ltda. - Rua Toriba, 474, Colégio, Rio de Janeiro - RJ - CEP 21545-260
Tel.: (021) 3014-3072 / 3373-1440 / 3373-1347 - E-mail: rcqlab@rcq.com.br Home Page: www.rcq.com.br

Anexo VIII – Certificado de calibração MMC Hexagon

HEXAGON METROLOGY

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO
PELA CGCRE SOB O Nº 292

CAL 0292

Certificado de Calibração Nº DEA 699-13

DADOS DO SOLICITANTE

NOME : USP - ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS
ENDEREÇO : AVENIDA TRABALAHADORES SÃOCARLENSE, 400
CIDADE : SÃO CARLOS ESTADO : SP CEP : 13566-590

IDENTIFICAÇÃO DO ITEM CALIBRADO

MODELO	: CROMA 06.08.06	Nº SÉRIE	: 42120291	TIPO DE MÁQUINA	: Pórtico
SOFTWARE	: PC DMIS CAD ++	VERSÃO	: 2012 RELEASE	RESOLUÇÃO	: 0.039 (µm)
CABEÇOTE	: TESASTAR-M	Nº SÉRIE	: 5M 0027 00	IDENT. CLIENTE	: -
APALPADOR	: TESASTAR-MP	Nº SÉRIE	: 5V 0006 01	FAIXA DE MEDIÇÃO	: 0 a 800 mm
PONTA	: 4X20	EXTENSÃO	: -		

PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO

DESCRIÇÃO	IDENTIFICAÇÃO	CERTIFICADO Nº	ÓRGÃO	VALIDADE
Step Gauge - 1020 mm	200807/MB002	DIMCI 0086/2013	INMETRO	jan-2015
Esfera 25 mm	K0588	6341/12	CERTI	nov-2014
Termômetro Omega	10282838-4	IOPE-RT-011-13/417	IOPE	fev-2015

TEMPERATURA MÁXIMA E MINIMA DURANTE TODO O PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.

MINÍMA : 21.3 °C MÁXIMA : : 21.8 °C

ESPECIFICAÇÃO DO FABRICANTE (MPEe E MPEp)

ERRO DE EXATIDÃO (MPEe) : 2.8 + 1.0 L / 300 µm ERRO DE APALPAÇÃO (MPEp) : 3.5 µm

Notas :

1 - CALIBRAÇÃO EFETUADA CONFORME INSTRUÇÃO INTERNA IQ9-03 (VER RESUMO DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO NESTE CERTIFICADO)
2 - OS RESULTADOS DESTE CERTIFICADO REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE AO INSTRUMENTO SUBMETIDO À CALIBRAÇÃO NAS CONDIÇÕES ESPECIFICADAS, NÃO SENDO EXTENSIVO A QUALQUER LOTE.
3 - A REPRODUÇÃO DESTE CERTIFICADO SÓ PODERÁ SER TOTAL E COM AUTORIZAÇÃO DA HEXAGON METROLOGY SISTEMAS DE MEDIÇÃO LTDA.
4 - A INCERTEZA EXPANDIDA É OBTIDA MULTIPLICANDO-SE A INCERTEZA PADRÃO COMBINADA PELO FATOR DE ABRANGÊNCIA K PARA UM NÍVEL DE APROXIMADAMENTE 95%.
5 - TODOS OS RESULTADOS OBTIDOS SÃO CALCULADOS PARA UMA TEMPERATURA DE 20ºC.
6 - NA FÓRMULA DO "MPEe" E DA "INCERTEZA DE MEDIÇÃO", "L" CORRESPONDE AO COMPRIMENTO MEDIDO EM MILIMETROS.
7 - SE A MÁQUINA SOFRE AJUSTE, O CERTIFICADO VIRÁ ACRESCIDO DAS LETRAS "A" E "D", ONDE A = ANTES DO AJUSTE E D = DEPOIS DO AJUSTE. AJUSTE NÃO FAZ PARTE DO ESCOPO DE ACREDITAÇÃO.
8 - CALIBRAÇÃO EXECUTADA PELO TÉCNICO:- ELADIO RANGEL
9 - CALIBRAÇÃO REALIZADA COM A COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA DA MAQUINA DESLIGADA. (QUANDO APLICÁVEL)

20 de novembro de 2013 — DATA DA CALIBRAÇÃO

3 de dezembro de 2013 — DATA DA EMISSÃO

ALEXANDRE TADEU
Signatário Autorizado

Av. Eng. Eusébio Stevaux, 2496 - Jurubatuba - 04696-000 - São Paulo - SP - BR
T. + 55 11 5525 6000 F. +55 11 5687 2191
www.hexagonmetrology.com.br

HEXAGON METROLOGY

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO PELA CGCRE SOB O Nº 292

CAL 0292

Certificado de Calibração Nº DEA 699-13

MÉTODO DE CALIBRAÇÃO - EXATIDÃO (MPEe)

PARA ESTE PROCESSO FOI UTILIZADO O PADRÃO ESCALONADO

FORAM TOMADOS 5 PONTOS NA ESCALA, SENDO QUE O MENOR É <=30mm E O MAIOR ATINGINDO 66% DA DIAGONAL FORMADA PELOS 3 EIXOS.

FORAM REALIZADAS 3 MEDIÇÕES EM 7 POSIÇÕES DIFERENTES COMO MOSTRAM AS FOTOS ABAIXO (O PADRÃO NAS FOTOS É APENAS PARA ILUSTRAR AS POSIÇÕES).



POSIÇÃO 1 (MAIOR EIXO)



POSIÇÃO 2



POSIÇÃO 3



POSIÇÃO 4



POSIÇÃO 5



POSIÇÃO 6



POSIÇÃO 7

MÉTODO DE CALIBRAÇÃO - ERRO DE APALPAÇÃO (MPEp)



PARA ESTE TESTE FOI UTILIZADA A ESFERA PADRÃO CERTIFICADA DE PROPRIEDADE DA HEXAGON METROLOGY DE DIÂMETRO APROXIMADO DE 25mm, POSICIONADA NO CENTRO DA MÁQUINA, COMO MOSTRA A FOTO AO LADO.

COM O APALPADOR DO CLIENTE POSICIONADO A UM ÂNGULO NÃO PARALELO AOS EIXOS DA MÁQUINA, FORAM TOCADOS 25 PONTOS DISTRIBUÍDOS NA ÁREA DA CALOTA ESFÉRICA. O RESULTADO DESTA MEDIÇÃO É A AMPLITUDE DOS RAIOS POLARES MEDIDOS. ESTE TESTE É REPETIDO 3 VEZES.

HEXAGON METROLOGY

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO PELA CGCRE
SOB O Nº 292

CAL 0202

Certificado de Calibração Nº DEA 699-13

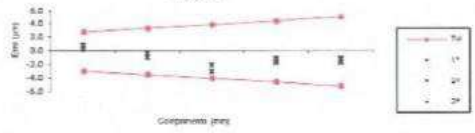
RESULTADO MÉDIO DAS MEDIÇÕES

U1 (valores em mm)						U3 (valores em mm)							
POSIÇÃO 1		POSIÇÃO 2		POSIÇÃO 3		POSIÇÃO 4		POSIÇÃO 5		POSIÇÃO 6		POSIÇÃO 7	
RESULTADOS MÉDIOS	ERRO (µm)	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO (µm)	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO (µm)	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO (µm)	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO (µm)	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO (µm)	RESULTADOS MÉDIOS	ERRO (µm)
19.9058	0.4	19.9045	-0.9	19.9044	-1.0	19.9062	0.8	19.9060	0.6	19.9066	1.2	19.9064	1.0
180.0127	-0.6	180.0117	-1.6	180.0141	0.8	180.0113	-2.0	180.0145	1.2	180.0159	2.6	180.0156	2.3
339.9638	-2.4	259.9859	-2.7	259.9903	1.7	420.0145	-0.5	420.0151	0.1	420.0182	3.2	420.0185	3.5
499.8840	-1.5	459.9314	-2.7	420.0181	3.1	619.9849	-1.8	619.9875	0.8	619.9893	2.6	619.9891	2.4
699.9316	-1.4	579.8245	-2.9	539.9914	2.7	819.9479	-3.4	819.9518	0.5	819.9554	4.1	819.9536	2.3
ERRO MÁX.	-2.4	ERRO MÁX.	-2.9	ERRO MÁX.	3.1	ERRO MÁX.	-3.4	ERRO MÁX.	1.2	ERRO MÁX.	4.1	ERRO MÁX.	3.5
AMPLITUDE	1.0	AMPLITUDE	1.6	AMPLITUDE	0.9	AMPLITUDE	2.0	AMPLITUDE	0.9	AMPLITUDE	0.6	AMPLITUDE	1.6

TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA			TEMPERATURA		
X:	21.35	°C	X:	21.35	°C	X:	21.62	°C	X:	21.6	°C	X:	21.65	°C	X:	21.62	°C	X:	21.64	°C
Y:	21.3	°C	Y:	21.3	°C	Y:	21.51	°C	Y:	21.65	°C	Y:	21.72	°C	Y:	21.57	°C	Y:	21.58	°C
Z:	21.44	°C	Z:	21.47	°C	Z:	21.38	°C	Z:	21.42	°C	Z:	21.47	°C	Z:	21.48	°C	Z:	21.48	°C
PADRÃO	21.38	°C	PADRÃO	21.38	°C	PADRÃO	21.57	°C	PADRÃO	21.69	°C	PADRÃO	21.77	°C	PADRÃO	21.64	°C	PADRÃO	21.64	°C

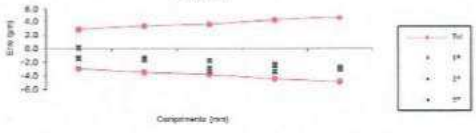
GRÁFICO DE DISPERÇÃO

Posição 1



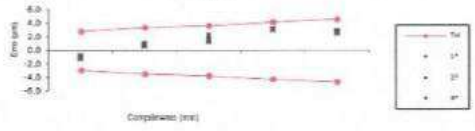
INCERTEZA $U1_{95}$ ± 2.9 + L/ 1033 µm PARA K= 2.00

Posição 2



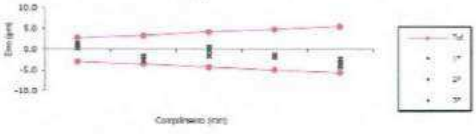
INCERTEZA $U1_{95}$ ± 3 + L/ 5726 µm PARA K= 2.00

Posição 3



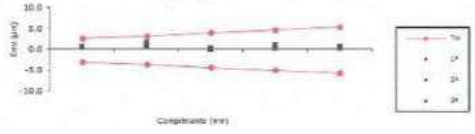
INCERTEZA $U1_{95}$ ± 2.8 + L/ 1180 µm PARA K= 2.00

Posição 4



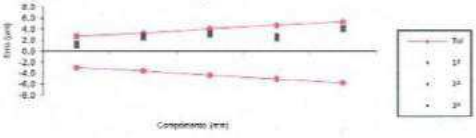
INCERTEZA $U3_{95}$ ± 2.9 + L/ 527 µm PARA K= 2.00

Posição 5



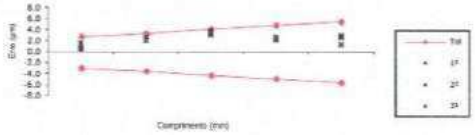
INCERTEZA $U3_{95}$ ± 2.8 + L/ 483 µm PARA K= 2.00

Posição 6



INCERTEZA $U3_{95}$ ± 2.8 + L/ 888 µm PARA K= 2.00

Posição 7



INCERTEZA $U3_{95}$ ± 2.9 + L/ 824 µm PARA K= 2.00

ERRO DE APALPAÇÃO MÉDIO (MPEp): 2.43 µm Up 95 : ± 0.37 µm
AMPLITUDE DO ERRO DE APALPAÇÃO : 0.30 µm PARA K= 2

NOTAS:

1) ERRO É O RESULTADO ENTRE VALOR MEDIDO - VALOR VERDADEIRO.

2) AMPLITUDE É A DIFERENÇA ENTRE O MAIOR E O MENOR VALOR OBTIDO DE 3 MEDIÇÕES EM UM MESMO PONTO

3) OS RESULTADOS MÉDIOS APRESENTADOS NESTA PÁGINA, É A MÉDIA DE 3 MEDIÇÕES.

Anexo IX – Certificado de calibração MMC Mitutoyo QM

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

35 Mitutoyo anos

LABORATÓRIO DE METROLOGIA
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0031

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratorio de Metrologia - LM - UNB.
Endereço :UNB - Campus UniversitárioDarcy Ribeiro - Asa Norte - Brasilia, DF.
Local da calibração:UNB - Campus UniversitárioDarcy Ribeiro - Asa Norte - Brasilia, DF.

Ordem de Serviço : 024.012/001

I. Identificação do Equipamento Calibrado :

Máquina Tridimensional de Medição por Coordenadas
Fabricante : Mitutoyo
MMC Modelo : QM-353
No de Série : .0072807 / Código : 198-314
Identif. do Cliente: N/C
Faixa Nominal : 300 x 500 x 300 mm
Contador Digital / Controlador
Modelo : UD1-VC
No Série : N/C
Resolução : 0,0005 mm
Cabeçote
Modelo : MH20
No Série : 5L7792
Probe
Modelo : TP20-SF
No Série : 7K0621
Rack
Modelo : -
No Série : -
Programa de Medição
Programa : MCOSMOS-Manual
Versão : V3.0R16
Dongle No. : 10-10248519

II. Notas:

1. A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência k=2,1 , para um nivel de confiança de aproximadamente 95%.
2. Erro = Valor indicado - Valor Verdadeiro Convencional.
3. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
4. A máquina foi verificada conforme Procedimento PML-0030 na sua versão 1/2.
5. Condição ambiental: Temperatura : 20,1 ± 0,5°C

III. Padrões utilizados :

Padrão Escalonado	*Termohigrômetro*	*Esfera Padrão*
No Série : 9211320	*No Série : T1F7008*	*No Série : D2455*
Certificado No : 2824/08	*Certificado No : LV9362/06*	*Certificado No : 2909/07*
Emitido em : 5/4/2008	*Emitido em : 8/9/2006*	*Emitido em : 13/4/2007*
Validade : 10/2008	*Validade : 09/2008*	*Validade : 04/2009*

Data da Calibração : 8/8/2008

Carlos Kazuo Suetake
Chefe Laboratório de Metrologia
Emissão: 19/08/08

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de U
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031

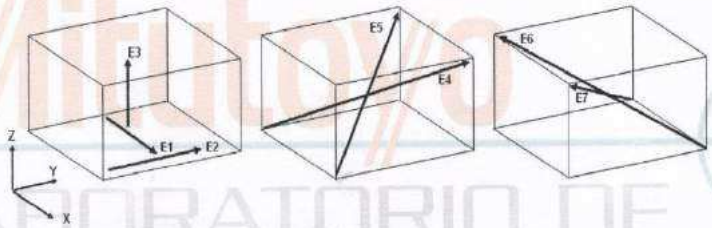
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratorio de Metrologia - LM - UNB.

IV. Resultado das Medições :

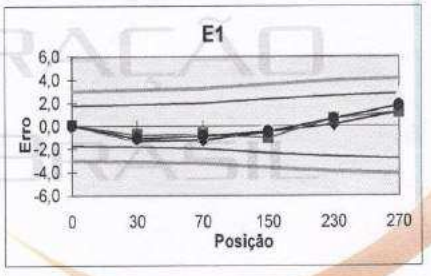
4.1. Verificações iniciais do equipamento :
a . Movimento da Máquina : OK
b . Condições da área de Medição : OK
c . Avaliação do Sist. Pneumático : OK
d . Limpeza das superfície de ref. : OK

4.2. Verificação do equipamento:



4.2.1. Exatidão de medição Posição E1 - unidade : µm

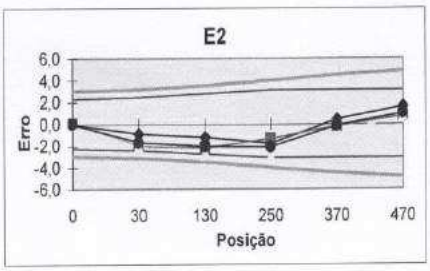
Posição (L) (mm)	Erro (µm) 1a.	2a.	3a.	erro médio
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-1,3	-0,8	-1,2	-1,1
70	-1,2	-0,7	-0,7	-0,9
150	-0,5	-1,0	0,0	-0,5
230	0,1	0,6	1,2	0,6
270	1,2	1,2	2,8	1,7



U = 1,2 +L/900 µm , onde: L = posição em " mm ".

4.2.2. Exatidão de medição Posição E2 - unidade : µm

Posição (L) (mm)	Erro (µm) 1a.	2a.	3a.	erro médio
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,9	-2,0	-2,1	-1,7
130	-1,2	-2,2	-2,8	-2,1
250	-1,8	-1,4	-3,1	-2,1
370	0,4	-0,2	-0,7	-0,2
470	1,6	0,7	0,6	1,0



U = 1,2 +L/800 µm , onde: L = posição em " mm ".

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

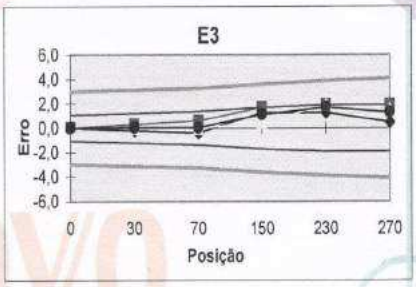
Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratorio de Metrologia - LM - UNB.

4.2.3. Exatidão de medição Posição E3 - unidade : µm

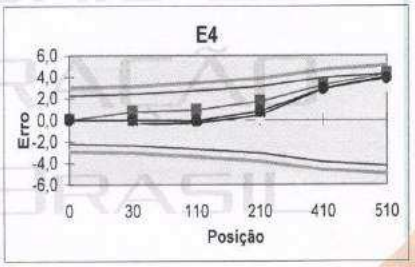
Posição (L) (mm)	Erro (µm) 1a.	2a.	3a.	erro médio
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,2	0,3	0,0	0,0
70	-0,4	0,6	0,0	0,1
150	1,3	1,7	0,5	1,2
230	1,3	1,9	1,9	1,7
270	0,5	1,9	1,5	1,3



U = 1,2 +L/700 µm , onde: L = posição em " mm ".

4.2.4. Exatidão de medição Posição E4 - unidade : µm

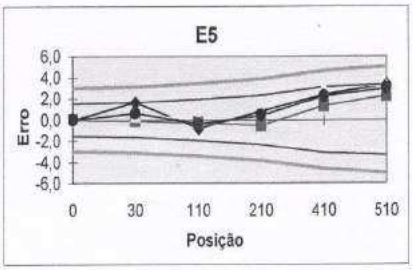
Posição (L) (mm)	Erro (µm) 1a.	2a.	3a.	erro médio
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,4	0,7	-0,4	0,0
110	-0,3	0,9	-0,8	-0,1
210	0,4	1,7	0,3	0,8
410	2,9	3,2	2,5	2,9
510	4,0	4,3	3,2	3,8



U = 1,2 +L/600 µm , onde: L = posição em " mm ".

4.2.5. Exatidão de medição Posição E5 - unidade : µm

Posição (L) (mm)	Erro (µm) 1a.	2a.	3a.	erro médio
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	1,6	-0,1	0,4	0,6
110	-0,8	-0,3	0,1	-0,3
210	0,8	-0,5	1,0	0,4
410	2,4	1,3	3,0	2,2
510	3,3	2,3	3,2	2,9



U = 1,2 +L/700 µm , onde: L = posição em " mm ".

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

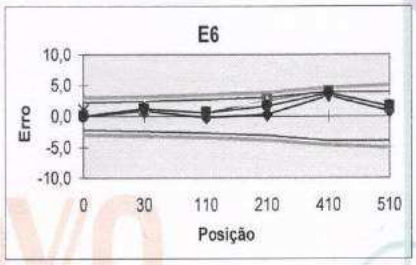
Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratorio de Metrologia - LM - UNB.

4.2.6. Exatidão de medição Posição E6 - unidade : µm

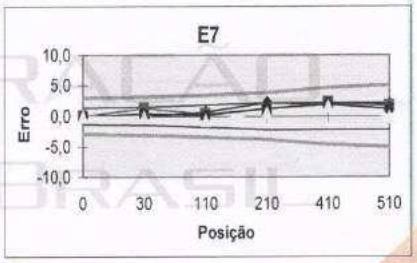
Posição (L) (mm)	Erro (µm) 1a.	2a.	3a.	erro médio
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,8	1,1	1,6	1,2
110	-0,2	0,6	1,2	0,5
210	0,3	2,5	2,2	1,7
410	3,3	3,9	3,8	3,7
510	0,8	1,5	2,3	1,5



U = 1,2 +L/700 µm , onde: L = posição em " mm ".

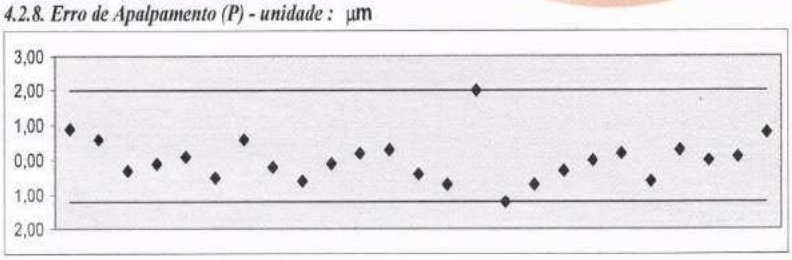
4.2.7. Exatidão de medição Posição E7 - unidade : µm

Posição (L) (mm)	Erro (µm) 1a.	2a.	3a.	erro médio
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,1	1,3	-0,1	0,4
110	0,7	0,3	-0,7	0,1
210	2,2	1,2	0,5	1,3
410	2,0	2,2	1,6	1,9
510	1,9	1,6	-0,1	1,1



U = 1,2 +L/700 µm , onde: L = posição em " mm ".

4.2.8. Erro de Apalpamento (P) - unidade : µm



Erro de Apalpamento (µm)	3,2

V. Observações Gerais :

Anexo X – Certificado de calibração termohigrômetro digital TFA

FUNDAÇÃO CERTI

Laboratório de
TEMPERATURA E UMIDADE
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração NBR ISO/IEC 17025
CAL 0320

Certificado de Calibração

Data da Calibração: 25/04/07
Data da Emissão: 26/04/07

n. 1582/07

1. CONTRATANTE: FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLOGICOS
Av. L3 Norte - Campus da UNB, - Brasília - DF

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. TERMOHIGRÔMETRO DIGITAL CALIBRADO [SMC]:

Fabricante:	Tfa	Faixa de Medição:	-10 a 60ºC	/	10 a 99 %ur
n. Série (fabricante):	Não consta	Faixa de Medição Calibrada:	18 a 22ºC	/	35 a 65 %ur
n. Identif. (solicitante):	06	Incremento Digital:	0,1ºC	/	1 %ur
Tipo/Modelo	Não Consta				

4. PADRÃO UTILIZADO (SMP):

4.1 TERM. DIGITAL COM SENSOR TERMORRESISTIVO

n. Registro (CERTI): 002352

Incerteza: 0,06 °C

Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 2230/06, de 26/05/06, válido até 05/07.

4.2 HIGRÔMETRO DE PONTO DE ORVALHO

n. Registro (CERTI): 000975

Incerteza: 0,2 °C

Rastreabilidade: Certificado de Calibração INMETRO DIMCI 0888/2006, de 23/05/06, válido até 05/09.

5. PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

Temperatura: PC-265, revisão 008 ; PC-266, revisão 008

O SMC foi montado junto ao termômetro padrão (SMP), em um meio termicamente controlado. Após o sistema atingir a temperatura desejada aguardou-se 10 minutos para garantir a estabilidade térmica do mesmo e iniciou-se a calibração. Foram realizados 10 ciclos de medição, com intervalos de 1 minuto entre as leituras.

Umidade: PC-265, revisão 008

Utilizou-se para gerar as condições ambientais uma câmara climática, sendo os sensores do SMP montados junto ao SMC dentro da mesma. Após a montagem atingir a estabilidade, aguardou-se 10 minutos para garantir a estabilidade da mesma e iniciou-se a calibração. Foram realizados, pelo menos, 10 ciclos de medição, com intervalos de 1 minuto entre as leituras.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

FUNDAÇÃO CERTI

Laboratório de
TEMPERATURA E UMIDADE
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração NBR ISO/IEC 17025
CAL 0320

Certificado de Calibração

Data da Calibração: 25/04/07
Data da Emissão: 26/04/07

n. 1582/07

6. OBSERVAÇÕES:

6.1 A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (ν_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e ν_{eff} são apresentados na tabela de resultados.

6.2 Condições ambientais durante a calibração: Temperatura Ambiente: [23 +/- 5] °C; Umidade Relativa do Ar: [60 +/- 20] %ur; Pressão Atmosférica: [1020 +/-20] mbar.

6.3 Correção = -[Média das Indicações no SMC - Média das Indicações no SMP].

6.4 Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990 - ITS 90.

6.5 A calibração é válida somente para os pontos calibrados, sendo estes selecionados em comum acordo com o cliente.

6.6 Os resultados apresentados no item 7 deste certificado são válidos exclusivamente para a temperatura de referência informada.

7. RESULTADOS

7.1 Escala de Temperatura

TABELA DE RESULTADOS

Média das Indic. no SMP [°C]	Média das Indic. no SMC [°C]	Correção [°C]	Incerteza U [°C]	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade ν_{eff}	Meio Termostático
18,0	17,8	0,2	0,6	2,00	Infinito	Ar com circ.
20,1	19,9	0,2	0,6	2,00	Infinito	Ar com circ.
22,0	21,8	0,2	0,6	2,00	Infinito	Ar com circ.

Observação: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação do SMC.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

FUNDAÇÃO CERTI

Laboratório de
TEMPERATURA E UMIDADE
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração NBR ISO/IEC 17025
CAL 0320

Certificado de Calibração

Data da Calibração: 25/04/07
Data da Emissão: 26/04/07

n. 1582/07

7.2 Escala de Umidade

TABELA DE RESULTADOS

Temperatura de Referência SMP [°C]	Média das Indic. no SMP [%ur]	Média das Indic. no SMC [%ur]	Correção [%ur]	Incerteza U [%ur]	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade ν_{eff}
25	35,3	38,0	-2,7	4,5	2,00	Infinito
25	49,8	56,1	-6,3	4,7	2,00	Infinito
25	65,5	63,0	2,5	4,9	2,00	Infinito

Observação: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação do SMC.

Indianara Elisio Ribeiro Achar
Signatária Autorizada

Indianara Elisio Ribeiro Achar
Responsável pela Calibração

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

Anexo XI – Certificado de calibração esquadro de aço Mitutoyo

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0031

Pág.:1/2

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 09343/13

Cliente: " UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA."
Endereço: Avenida João Naves de Avila, 2121 - Uberlandia - MG.

Ordem de Serviço: 068.189

1 - Objeto calibrado:

Esquadro de Precisão
Fabricante: Mitutoyo
Código: 916-218
Número de Série: 1000000
Dimensões: 400 x 250 mm
Material: Aço
Identificação do proprietário: Não Consta

2 - Padrão utilizado na calibração:

Relógio Apalpador
Número de série: LCF233
Certificado Nº.: 07895/13 - RBC - Mitutoyo
Validade: 01/2014

Comaprador Eletrônico
Número de série: 6G013
Certificado Nº.: 03259/13 - RBC - Mitutoyo
Validade: 09/2013

3 - Procedimento de medição: Pml - 0012 Versão: 1

O desvio de perpendicularidade do esquadro foi verificado em duas posições opostas à 180°, conforme indicado na figura a seguir.

Data da calibração: 30 de Agosto de 2013
Data da emissão: 30 de Agosto de 2013

Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Depto. de Garantia da Qualidade

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI).
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722
•Fabrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Rafio - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

Mitutoyo

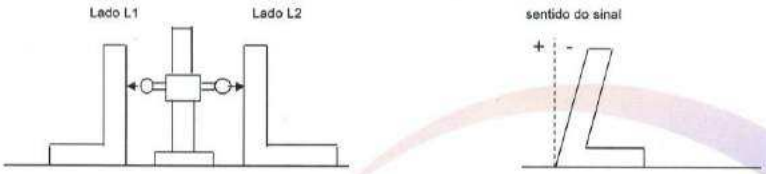
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 09343/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

4 - Resultado da calibração : O resultado é a média das calibrações.



Perpendicularidade

Face Externa		Incerteza de Medição	Fator de abrangência	Graus de liberdade
Posição (mm)	Desvio (µm)	(µm)	(k)	(V_{eff})
0	0,0			
50	-0,8			
100	-2,6			
150	-2,8			
200	-3,5	1,5	2,00	Infinito
250	-3,9			
300	-4,5			
350	-5,6			
400	-4,8			

Face Interna		Incerteza de Medição	Fator de abrangência	Graus de liberdade
Posição (mm)	Desvio (µm)	(µm)	(k)	(V_{eff})
0	0			
50	-0,8			
100	-1,3			
150	-3,4			
200	-5,0	1,5	2,00	Infinito
250	-5,5			
300	-5,5			
350	-4,4			

Outros Itens

Item	Resultado (µm)	Incerteza de Medição (µm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V_{eff})
Paralelismo da base	6,0			
Paralelismo da haste	5,0			
Retilineidade da base	3,0	1,5	2,00	Infinito
Retilineidade da base	3,0			

5 - Incerteza de medição:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6 - Nota: Temperatura ambiente: (20,0 ± 0,5) °C.

•Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5841-3722
•Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

Anexo XII – Certificado de calibração artefato-padrão PLAFAMA

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

Calibração NBR ISO/IEC 17025

CAL 0031

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 06021/16

Cliente : **" UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA. "**
Endereço : Avenida João Naves de Ávila, 2121 Uberlandia - MG

Ordem de serviço: 084.164

1 - Objeto Medido

Peça Padrão de Diâmetro
Fabricante: Não Identificado
Código: Não Consta
N°. de Série: Não Consta
Identificação do proprietário : OS 1524

2 - Padrão utilizado na Medição:

Máquina de Medição por Coordenadas
Número: 0004501
Certificado Nº. 08257/15 - RBC - Mitutoyo
Validade: 09/2016

3 - Procedimento de Medição: PML - 0048 Versão 2

Os diâmetros foram calibrados nos eixo X e Y, em três alturas , conforme ilustração abaixo.

Data de Calibração 05 de Agosto de 2016

Data de Emissão 05 de Agosto de 2016

Carlos Kazuo Suetake
Signatário Autorizado

Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade – SI).
A reprodução deste certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a qualquer lotes.

Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP: 04726-002 - São Paulo - SP - Tel.: (11) 5643-0000
Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 06021/16

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031.

4 - Resultado da Medição: O resultado é a média das calibrações.



Item	Nominal (mm)	Posição		Valor Convencional (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V_{eff})
Diâmetro 1	10,004	1	X	10,0050	0,0015	2,18	15
			Y	10,0059	0,0015	2,28	10
		2	X	10,0025	0,0015	2,18	15
			Y	10,0033	0,0015	2,00	infinito
		3	X	10,0024	0,0015	2,00	infinito
			Y	10,0031	0,0015	2,00	infinito
Diâmetro 2	10,004	1	X	10,0052	0,0015	2,00	infinito
			Y	10,0088	0,0015	2,01	222
		2	X	10,0069	0,0015	2,00	infinito
			Y	10,0088	0,0015	2,01	313
		3	X	10,0048	0,0015	2,00	infinito
			Y	10,0085	0,0015	2,00	infinito
Diâmetro 3	10,004	1	X	10,0132	0,0015	2,14	19
			Y	10,0148	0,0015	2,00	infinito
		2	X	10,0123	0,0015	2,00	infinito
			Y	10,0172	0,0015	2,01	277
		3	X	10,0119	0,0015	2,08	34
			Y	10,0170	0,0015	2,00	infinito

Mitutoyo LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO BRASIL

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 06021/16

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031.

4 - Resultado da Medição: O resultado é a média das calibrações.

Item	Nominal (mm)	Posição		Valor Convencional (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V_{eff})
Diâmetro 4	15,000	1	X	14,9921	0,0015	2,16	17
			Y	15,0004	0,0015	2,01	248
		2	X	15,0024	0,0015	2,00	infinito
			Y	15,0002	0,0015	2,00	infinito
		3	X	15,0005	0,0015	2,11	25
			Y	15,0014	0,0015	2,00	infinito
Diâmetro 5	15,000	1	X	15,0128	0,0015	2,00	infinito
			Y	15,0090	0,0015	2,00	infinito
		2	X	15,0093	0,0015	2,00	infinito
			Y	15,0085	0,0015	2,00	infinito
		3	X	15,0099	0,0015	2,01	463
			Y	15,0075	0,0015	2,00	infinito
Diâmetro 6	15,000	1	X	15,0135	0,0015	2,00	infinito
			Y	15,0266	0,0015	2,00	infinito
		2	X	15,0076	0,0015	2,00	infinito
			Y	15,0270	0,0015	2,00	infinito
		3	X	15,0009	0,0015	2,00	infinito
			Y	15,0261	0,0015	2,11	24
Diâmetro 7	25,025	1	X	25,0258	0,0015	2,00	infinito
			Y	25,0243	0,0015	2,01	313
		2	X	25,0222	0,0015	2,00	infinito
			Y	25,0215	0,0015	2,00	infinito
		3	X	25,0273	0,0015	2,00	infinito
			Y	25,0249	0,0015	2,00	infinito
Diâmetro 8	25,025	1	X	25,0116	0,0015	2,00	infinito
			Y	25,0098	0,0015	2,00	infinito
		2	X	25,0096	0,0015	2,00	infinito
			Y	25,0098	0,0015	2,00	infinito
		3	X	25,0100	0,0015	2,00	infinito
			Y	25,0093	0,0015	2,00	infinito
Diâmetro 9	25,025	1	X	25,0196	0,0015	2,00	infinito
			Y	25,0289	0,0015	2,00	infinito
		2	X	25,0202	0,0015	2,04	60
			Y	25,0282	0,0015	2,00	infinito
		3	X	25,0248	0,0015	2,00	infinito
			Y	25,0266	0,0015	2,00	infinito

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 06021/16

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031.

4 - Resultado da Medição: O resultado é a média das calibrações.

Item	Nominal (mm)	Posição		Valor Convencional (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V_{eff})
Diâmetro 10	35,008	1	X	35,0082	0,0015	2,00	infinito
			Y	35,0076	0,0015	2,00	infinito
		2	X	35,0046	0,0015	2,00	infinito
			Y	35,0053	0,0015	2,00	infinito
		3	X	35,0057	0,0015	2,00	infinito
			Y	35,0064	0,0015	2,00	infinito
Diâmetro 11	35,008	1	X	35,0120	0,0015	2,02	105
			Y	35,0167	0,0015	2,06	43
		2	X	35,0126	0,0015	2,00	infinito
			Y	35,0160	0,0015	2,00	infinito
		3	X	35,0127	0,0015	2,04	60
			Y	35,0133	0,0015	2,20	14
Diâmetro 12	35,008	1	X	35,0336	0,0015	2,00	infinito
			Y	35,0448	0,0015	2,02	124
		2	X	35,0350	0,0015	2,00	infinito
			Y	35,0402	0,0015	2,01	199
		3	X	35,0300	0,0015	2,11	24
			Y	35,0378	0,0015	2,09	28

5 - Incerteza de Medição:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

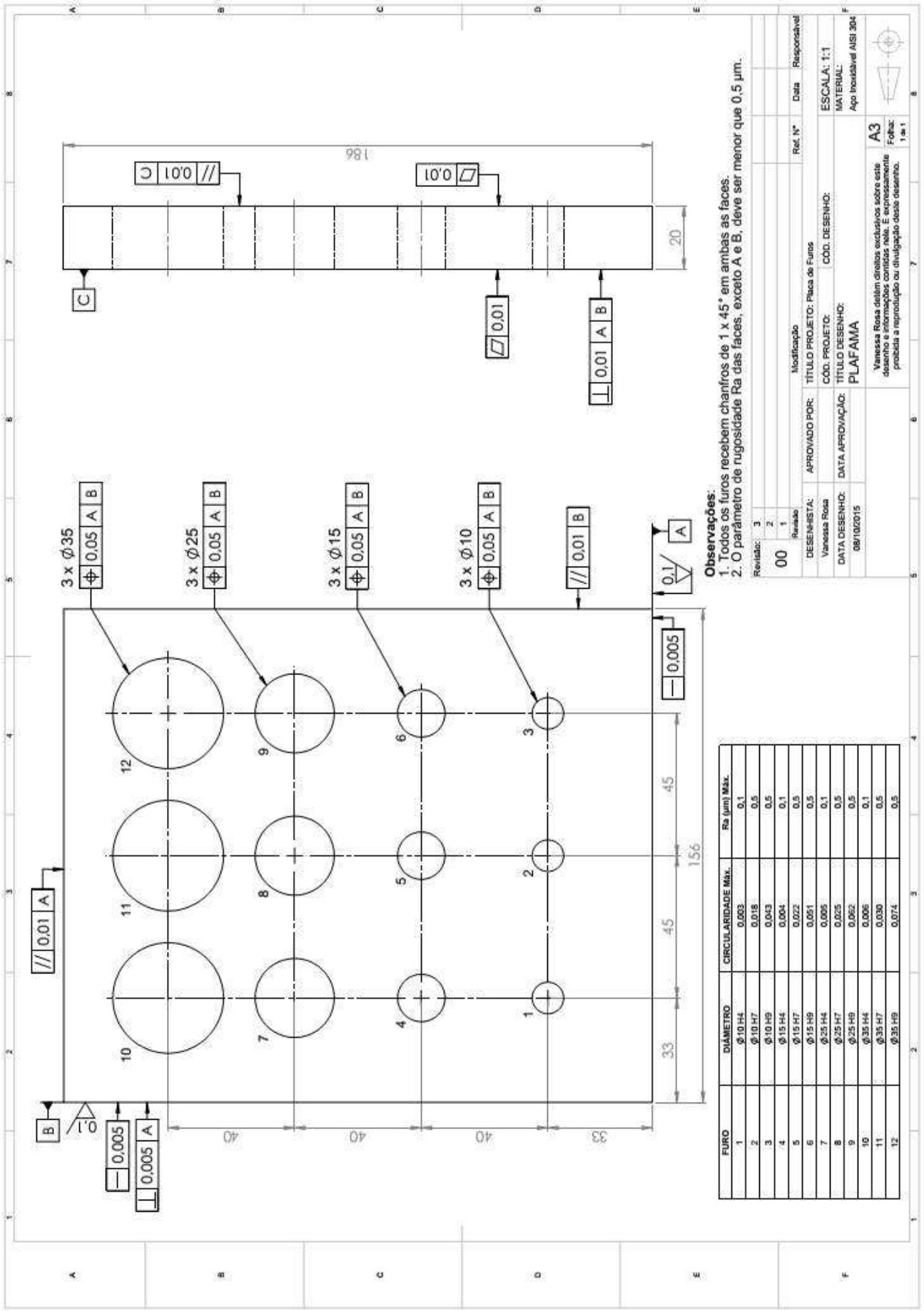
A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6 - Nota : Temperatura ambiente 20,3 ± 0,2°C.

Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP: 04726-002 - São Paulo - SP - Tel.: (11) 5643-0000
Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

APÊNDICES

Apêndice I – Desenho técnico do artefato-padrão PLAFAMA



FURO	DIÂMETRO	CIRCULARIDADE Máx.	Ra (µm) Máx.
1	Ø10 H4	0,003	0,1
2	Ø10 H7	0,018	0,5
3	Ø10 H9	0,043	0,5
4	Ø15 H4	0,004	0,1
5	Ø15 H7	0,022	0,5
6	Ø15 H9	0,051	0,5
7	Ø25 H4	0,005	0,1
8	Ø25 H7	0,025	0,5
9	Ø25 H9	0,062	0,5
10	Ø35 H4	0,006	0,1
11	Ø35 H7	0,030	0,5
12	Ø35 H9	0,074	0,5

Apêndice II – Resultados da medição do desvio de cilindricidade na MMC Zeiss

A Figura II.1 apresenta os resultados obtidos na medição do desvio de cilindricidade dos furos da PLAFAMA na MMC Zeiss, para os diferentes métodos de ajuste. São exibidos também os valores de incerteza expandida (probabilidade de abrangência de 95%), apresentada pela barra de erro. Observa-se na Fig. II.1 que os valores de desvio de cilindricidade obtidos apresentaram comportamento similar àquele exibido pelo desvio de circularidade, apresentados no capítulo IV. O método MZC forneceu os menores valores de desvio de cilindricidade, enquanto que o MCC exibiu os valores máximos.

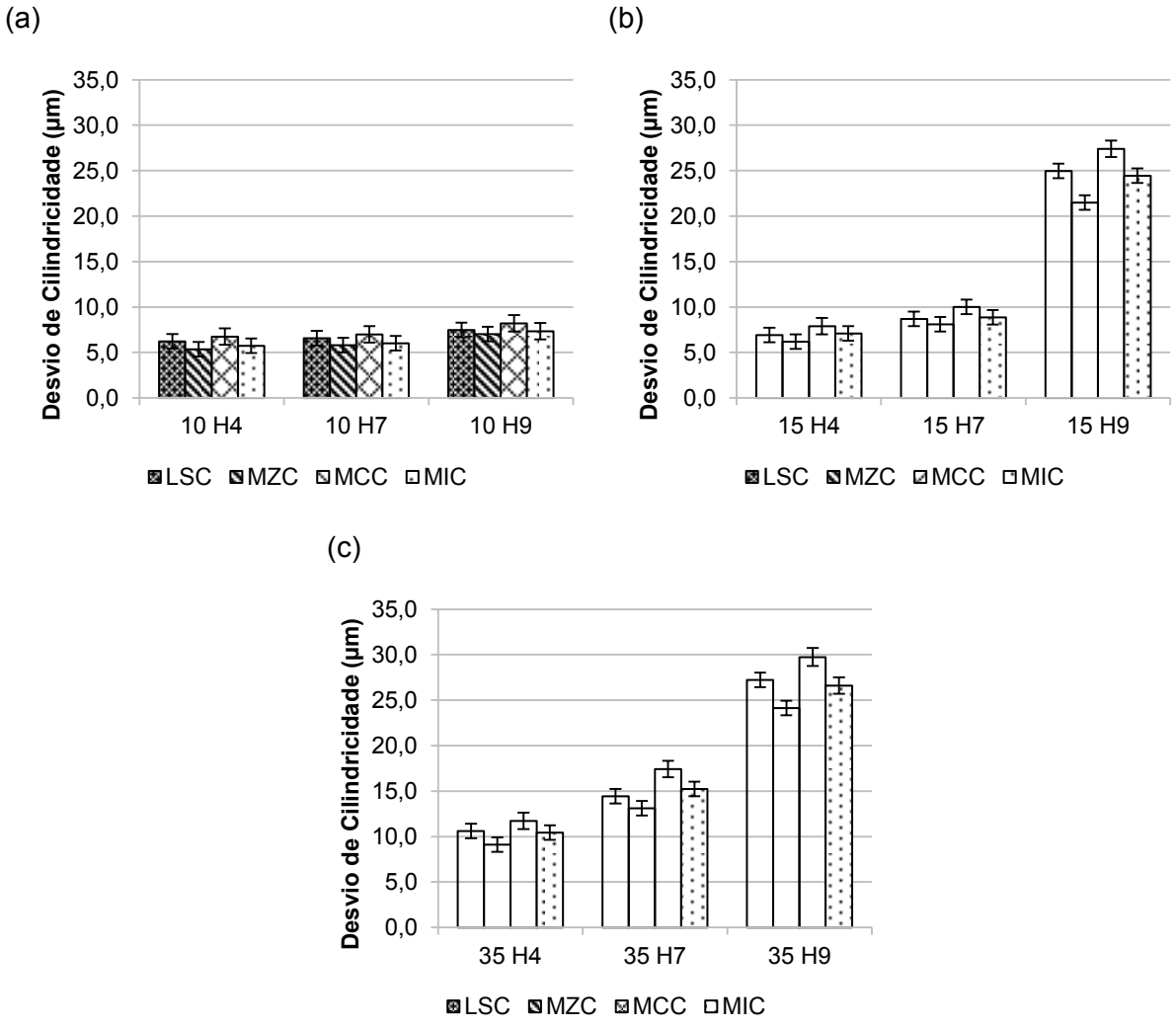


Figura II.1 – Valores médios de desvio de cilindricidade obtidos na medição dos furos de diâmetro nominal (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 35 mm, na MMC Zeiss.

A Tabela II.1 apresenta os resultados da análise de variância para a medição do desvio de cilindricidade dos furos da PLAFAMA na MMC Zeiss. O valor $p < 0,5$ (95% de confiança) indica que o fator método de ajuste afeta significativamente os valores deste desvio.

Tabela II.1 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de cilindricidade.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	5,070	1,69000	26,34	0,000
	Erro	36	2,310	0,06417		
	Total	39	7,380			
10 H7	Fator	3	10,629	3,54300	126,29	0,000
	Erro	36	1,010	0,02806		
	Total	39	11,639			
10 H9	Fator	3	7,971	2,65692	41,82	0,000
	Erro	36	2,287	0,06353		
	Total	39	10,258			
15 H4	Fator	3	16,565	5,5217	25,84	0,000
	Erro	36	7,694	0,2137		
	Total	39	24,259			
15 H7	Fator	3	20,0108	6,67025	358,94	0,000
	Erro	36	0,6690	0,01858		
	Total	39	20,6798			
15 H9	Fator	3	201,450	67,1509	152,57	0,000
	Erro	36	15,85	0,4401		
	Total	39	217,30			
35 H4	Fator	3	50,99	16,9980	29,98	0,000
	Erro	36	20,41	0,5669		
	Total	39	71,40			
35 H7	Fator	3	100,437	33,4790	335,35	0,000
	Erro	36	3,594	0,0998		
	Total	39	104,031			
35 H9	Fator	3	81,579	27,192	98,690	0,000
	Erro	36	9,919	0,2755		
	Total	39	91,498			

Apêndice III – Resultados da medição do desvio de posição, desvio de retitude, desvio de perpendicularidade e desvio de paralelismo medidos na MMC Zeiss

As Figuras III.1 a III.4 apresentam os valores de desvio de posição, desvio de retitude, desvio de perpendicularidade e desvio de paralelismo obtidos nas medições realizadas na MMC Zeiss, respectivamente. Os valores de incerteza expandida (probabilidade de abrangência de 95%) são apresentados pela barra de erro.

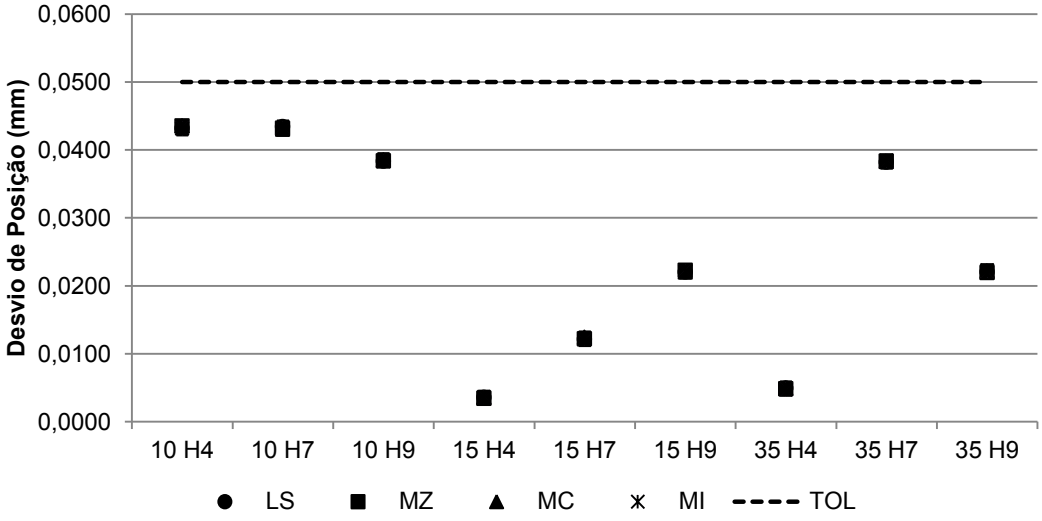


Figura III.1 – Valores médios de desvio de posição obtidos na medição dos furos.

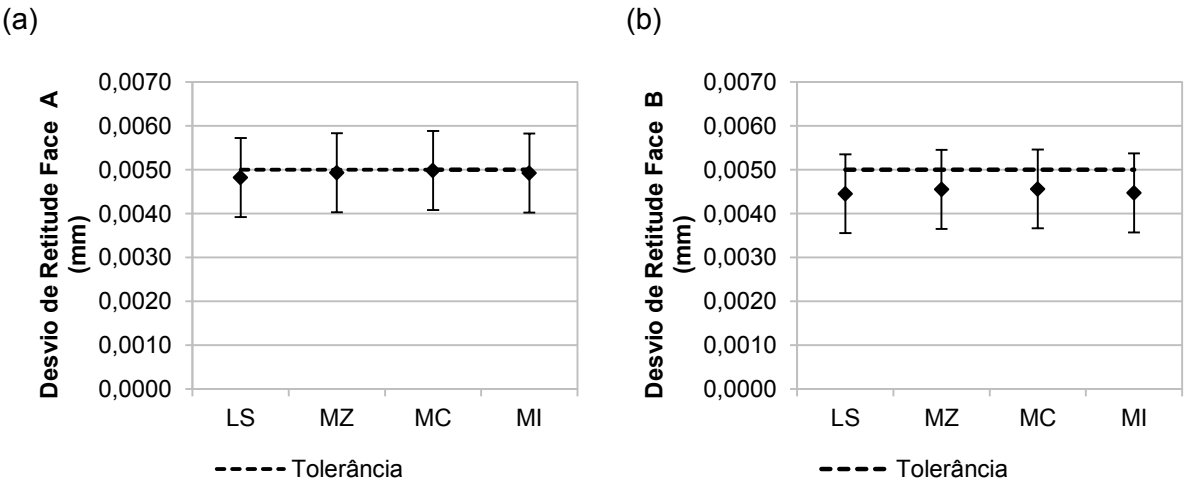


Figura III.2 – Valores médios de desvio de retitude das faces (a) A e (b) B.

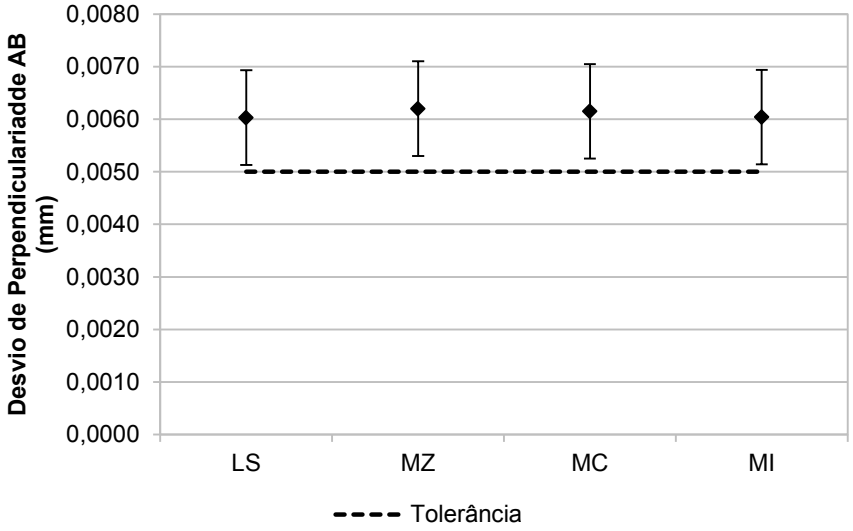


Figura III.3 – Valores médios de desvio de perpendicularidade entre as faces A e B.

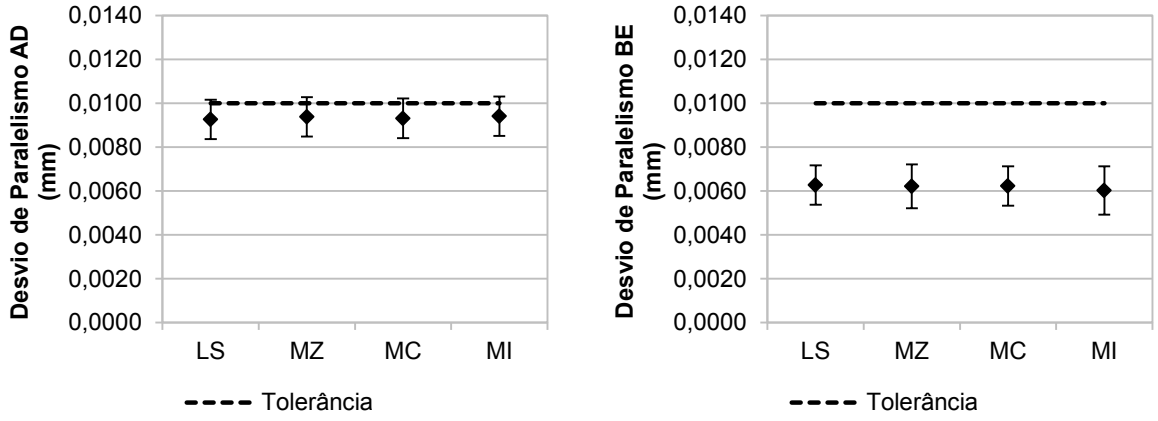


Figura III.4 – Valores médios de desvio de paralelismo entre as faces (a) A e D e (b) B e E.

A Tabela III.I apresenta os resultados da análise de variância para as medições do desvio de posição dos furos, e a Tab. III.2 mostra os resultados da ANOVA para o desvio de retitude, desvio de perpendicularidade e desvio de paralelismo. Pode-se observar nas Tab. 9.2 e 9.3 que o valor $p > 0,05$ (95% de confiança) indica que o fator método de ajuste não afeta significativamente os valores destes desvios.

Tabela III.1 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de posição dos furos.

Furo	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
10 H4	Fator	3	0,000001	0,000000	1,91	0,146
	Erro	36	0,000007	0,000000		
	Total	39	0,000008			
10 H7	Fator	3	0,000001	0,000000	1,70	0,183
	Erro	36	0,000005	0,000000		
	Total	39	0,000006			
10 H9	Fator	3	0,000000	0,000000	1,14	0,347
	Erro	36	0,000002	0,000000		
	Total	39	0,000003			
15 H4	Fator	3	0,000001	0,000000	1,92	0,145
	Erro	36	0,000007	0,000000		
	Total	39	0,000007			
15 H7	Fator	3	0,000000	0,000000	0,25	0,862
	Erro	36	0,000018	0,000001		
	Total	39	0,000018			
15 H9	Fator	3	0,000000	0,000000	2,84	0,051
	Erro	36	0,000001	0,000000		
	Total	39	0,000001			
35 H4	Fator	3	0,000000	0,000000	1,13	0,351
	Erro	36	0,000003	0,000000		
	Total	39	0,000003			
35 H7	Fator	3	0,000000	0,000000	0,21	0,888
	Erro	36	0,000020	0,000001		
	Total	39	0,000020			
35 H9	Fator	3	0,000001	0,000000	2,10	0,117
	Erro	36	0,000003	0,000000		
	Total	39	0,000004			

Tabela III.2 – Resultados da análise de variância das medições do desvio de retitude, desvio de perpendicularidade e desvio de paralelismo.

Característica	Fonte	GL	SQ	QM	F	p
Desvio de retitude face A	Fator	3	0,000000	0,000000	2,28	0,096
	Erro	36	0,000001	0,000000		
	Total	39	0,000001			
Desvio de retitude face B	Fator	3	0,000000	0,000000	0,59	0,623
	Erro	36	0,000002	0,000000		
	Total	39	0,000002			
Desvio de perpendicularidade entre as faces A e B	Fator	3	0,000000	0,000000	0,99	0,408
	Erro	36	0,000003	0,000000		
	Total	39	0,000003			
Desvio de paralelismo AD	Fator	3	0,000000	0,000000	1,34	0,277
	Erro	36	0,000001	0,000000		
	Total	39	0,000001			
Desvio de paralelismo BE	Fator	3	0,000000	0,000000	0,32	0,809
	Erro	36	0,000013	0,000000		
	Total	39	0,000014			