

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

LUIZ CARLOS NEVES

MONITORAMENTO DE DESEMPENHO EM MÁQUINA DE MEDIR POR
COORDENADAS ATRAVÉS DE TESTES INTERINOS

São Carlos
2022

LUIZ CARLOS NEVES

MONITORAMENTO DE DESEMPENHO EM MÁQUINA DE MEDIR POR
COORDENADAS ATRAVÉS DE TESTES INTERINOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Projeto Mecânico.

Orientador:

Prof. Dr. Benedito Di Giacomo

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA
EESC-USP

São Carlos

2022

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

N518m Neves, Luiz Carlos
 Monitoramento de desempenho em máquina de medir por
 coordenadas através de testes interinos / Luiz Carlos
 Neves; orientador Prof. Titular Benedito Di Giacomo.
 São Carlos, 2016.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
 Projeto Mecânico -- Escola de Engenharia de São Carlos
 da Universidade de São Paulo, 2016.

 1. Máquina de medir por coordenadas. 2. Testes
 interinos. 3. Repetibilidade. 4. Reprodutibilidade. I.
 Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **LUIZ CARLOS NEVES**.

Título da dissertação: "Monitoramento de desempenho em máquina de medir por coordenadas através de teses interinos".

Data da defesa: 21/10/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Benedito Di Giacomo**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Rosenda Valdez Arencibia**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Aprovado

Prof. Dr. **Alessandro Marques**
(Universidade Federal do Paraná/UFPR)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

As minhas filhas Alice e Clara
A minha esposa Elen
Aos meus pais Diomídio e Otília (em memória)

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Benedito Di Giacomo pelos conhecimentos obtidos, pela orientação, que em muitas vezes foi além da elaboração deste trabalho, e pela amizade.

Ao professor Roberto Hideaki Tsunaki pela colaboração e disponibilidade da máquina, para realização dos testes práticos deste trabalho.

Aos professores Vagner Augusto de Souza e César Augusto Galvão de Moraes, pelas valiosas discussões durante a realização do trabalho.

Ao engenheiro José Claudio Pinto do Azevedo, pela amizade e presteza nas necessidades diárias do trabalho e na revisão do texto.

Aos engenheiros Luiz Afonso Marão e Angelo Reami Filho pelas valiosas contribuições e a amizade.

Aos técnicos da oficina do LAMAFE José Carlos Botelho, José Carlos Risardi e Mauro Olivatto pela amizade e companheirismo.

As minhas filhas, Alice e Clara pelo amor dedicado diariamente.

A minha esposa Elen pelo apoio incondicional em todos os momentos.

As funcionárias da pós-graduação, Ana Paula Bueno e Iara Alice pela amizade e presteza no trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos e ao Departamento de Engenharia Mecânica pela colaboração e estrutura para realização do trabalho.

A todos aqueles que, por esquecimento ou ausência, deixaram de ser mencionados.

A DEUS, pela vida, fé e esperança.

Resumo

NEVES, L. C. **Monitoramento de desempenho em máquina de medir por coordenadas através de testes interinos.** 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Este trabalho apresenta um método para monitoramento de desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas de forma indireta, fundamentado na medição de uma peça de trabalho não calibrada, como sendo um artefato padrão.

Através dos experimentos planejados para o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade para o monitoramento e uso de um padrão prismático dodecagonal, informações importantes foram obtidas sobre o desempenho metrológico de uma Máquina de Medir por Coordenadas.

As variáveis investigadas foram aquelas relacionadas à operação da MMC, como a posição e a orientação do padrão no volume de trabalho e a estratégia de medição. Dois experimentos foram planejados e executados, um aplicando um método padrão de medição, sonda contornando a peça, e o outro empregando um método alternativo de medição, onde a peça é girada para a orientação de medição definida. Os erros de medição obtidos foram analisados através da técnica de análise de variância, sendo assim determinadas as variáveis significativas dos experimentos.

O Monitoramento foi caracterizado através de uma qualificação do desempenho inicial da máquina, relacionada à condição atual. Dentre as variáveis estudadas, foram determinadas as que mais influenciaram no desempenho, identificando assim, algumas condições críticas de operação.

Os resultados dos testes de monitoramento se mostraram mais eficientes quando executados pelo método alternativo de medição, apresentando maior estabilidade dos dados, ainda que demande mais tempo, se torna mais confiável.

Palavras-chave: Máquina de Medir por Coordenadas, testes interinos, repetibilidade, reprodutibilidade.

Abstract

NEVES, L. C. **Performance monitoring in coordinate measuring machine through interim tests.** 2016. 92 f. São Carlos Dissertation (Master's degree) - School of Engineering of, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

This work presents a method for monitoring the performance of the Coordinate Measuring Machines in an indirect way, based on the measurement of an uncalibrated workpiece, as a standard artifact.

Through the experiments planned for the study of repeatability and reproducibility for monitoring and use of a twelve-sided prismatic gauge, important information was obtained on the metrological performance of a Coordinate Measuring Machine.

The variables were those related to CMM operation, such as the position and orientation of the gauge in the work volume and the measurement strategy. Two experiments were planned and carried out, one applying a standard measurement method, probe bypassing the piece, and the other using an alternative method of measurement, where the workpiece is rotated to the direction of measurement defined. Measurement errors were analyzed through the technique of analysis of variance, thus it was determined the significant variables of the experiments.

The monitoring was characterized by a qualification of the initial machine performance, related to the current condition. Among the variables studied were determined that most influenced the performance, thus identifying some critical operating conditions.

The results of monitoring tests were more efficient when these were executed by the alternative method of measurement, with greater stability data, demanding more time, however, becomes more reliable.

Keywords: Coordinate Measuring Machine, interim check, repeatability, reproducibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeira MMC fabricada por Ferranti Ltd em 1956	36
Figura 2 - MMC do tipo ponte móvel.	40
Figura 3 - MMC do tipo ponte fixa.....	41
Figura 4 - MMC do tipo cantilever	42
Figura 5 - MMC do tipo braço horizontal.....	43
Figura 6 - MMC do tipo pórtico.	44
Figura 7 - Erro de ABBÈ em MMC	48
Figura 8 - Distribuição dos pontos medidos na esfera de referência pela esfera de trabalho. Ponta única (a) e múltiplas pontas (b).	56
Figura 9 - Sonda Renishaw PH10.....	56
Figura 10 - Deflexão devida ao prolongamento da haste de suporte da esfera de medição.	57
Figura 11 - Procedimento de calibração com padrão escalonado medição	57
Figura 12 - Exemplo de um padrão escalonado fixado incorretamente.....	58
Figura 13 - Medição com uma parte da esfera que não foi calibrada.....	58
Figura 14 - Apoio do desempenho de uma MMC.....	59
Figura 15 - Reconstrução de um círculo por mínimos quadrados	60
Figura 16 - Reconstrução de um círculo na condição de máximo inscrito	60
Figura 17 - Reconstrução de um círculo na condição de máximo inscrito	61
Figura 18 - Reconstrução de um círculo na condição de mínima zona para o cálculo de circularidade	62
Figura 19 - Aplicação dos diferentes métodos de reconstrução matemática em medição de círculos.....	62
Figura 20 - Pirâmide de rastreabilidade para máquina de medir por coordenadas	63
Figura 21 - Padrão passo-a-passo	66
Figura 22 - Padrões - circular	67
Figura 23 - Padrão barra de esferas	68
Figura 24 - Padrão barra de esferas telescópica.....	70
Figura 25 - Padrão placa de esferas.	71
Figura 26 - Padrão placa de furos.	72
Figura 27 - Artefatos padrão volumétrico tetraédrico.....	73
Figura 28 - Padrão para verificação de máquinas (MCG) para o monitoramento do desempenho de MMCs.	74
Figura 29 - Representação gráfica dos desvios de posição dos centros das esferas.....	76
Figura 30 - Análise de um Sistema de Medição	77
Figura 31 - Curva de distribuição normal de probabilidades.....	80
Figura 32- Amostras de médias iguais e desvio padrão diferente	85

Figura 33 – Curva F para as variáveis posição, repetição e peça	96
Figura 34 - Distribuição F para 2 e 60 graus de liberdade e nível de significância.....	97
Figura 35 - Máquina de medir a três coordenadas.....	107
Figura 36 - Sonda de medição.....	108
Figura 37 - Diagrama de blocos de um processo de medição	110
Figura 38 - Artefato padrão de geometria dodecagonal	111
Figura 39 - Posicionamento da peça sobre o desempenho.....	113
Figura 40 - Representação do método alternativo de medição.....	117
Figura 41 - Carta Xbarra e Carta R por estratégia	126
Figura 42 - Valores médios para as duas estratégias	127
Figura 43 - Medições organizadas por peças	128
Figura 44 - Interação entre Peça e Estratégia	129
Figura 45 - Carta Xbarra e Carta R por posição.....	135
Figura 46 - Valores médios das peças para as três posições	136
Figura 47 - Interação entre Peça e Posição	137
Figura 48 - Amplitude das médias de cada peça na P1	142
Figura 49 - Médias dos dados Históricos e Atuais na P1	143
Figura 50 - Amplitudes entre as médias Históricas e Atuais medidas na P1.....	143
Figura 51 - Médias Históricas e Atuais de cada peça na P2	146
Figura 52 - Amplitudes entre as médias Históricas e Atuais medidas na posição 2	147
Figura 53 - Diferença entre as amplitudes das médias Históricas e Atuais medidas na posição 1 e 2.....	148
Figura 54 - Médias obtidas pelo método padrão de medição	150
Figura 55 - Médias das dimensões de 1 a até medidas a 0°.....	152
Figura 56 - Médias das dimensões nas posições 1 a 6 medidas a 60°	153
Figura 57 - Médias das dimensões nas posições 1 a 6 medidas a 90°	154
Figura 58 - Amplitudes nas posições 1 e 3 medidas a 0°, 60° e 90°.....	154
Figura 59 - Médias das dimensões nas posições 1 e 3 medidas a 0° e 60°, com a esfera sem tinta	155
Figura 60 - Amplitudes de todas as dimensões realizadas na mesma orientação da MMC	156
Figura 61 - Amplitudes de todas as dimensões com a MMC contornado a peça	156
Figura 62 - Médias das dimensões nas posições 1 e 3 medidas a 0° e 60° com a esfera pintada.....	158
Figura 63 - Médias das dimensões do bloco padrão e da peça padrão nas posições P1_0, P1_60, P3_0 e P3_60.	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de estruturas de MMC.....	39
Tabela 2 - Tipos de estruturas de MMC.....	78
Tabela 3 - Classificação do IT em função dos processos de fabricação convencionais.....	84
Tabela 4 - Tolerâncias Fundamentais.....	84
Tabela 5 - Arranjo experimental para ANOVA de três posições, para a variável posição..	88
Tabela 6 - Arranjo experimental para ANOVA das três posições, para a variável repetição	91
Tabela 7 - Arranjo experimental para ANOVA das três posições, para variável peça	93
Tabela 8 - Graus de liberdade das somas de quadrados.	94
Tabela 9 - Tabela ANOVA para o exemplo aplicado neste capítulo.....	98
Tabela 10 - Componentes da variabilidade de um Sistema de Medição	100
Tabela 11 - Informações Técnicas da MMC CROMA - SHEFFIELD.....	109
Tabela 12 - Medições dimensionais das amostras selecionadas sem erro (E1).....	124
Tabela 13 - Medições dimensionais das amostras selecionadas sem erro (E2).....	125
Tabela 14 - ANOVA com dois fatores de interação	130
Tabela 15 - ANOVA com dois fatores sem de interação para as duas estratégias.....	131
Tabela 16 - Medições do diâmetro interno da peça padrão sem erro (E1)	132
Tabela 17 - Medições do diâmetro interno da peça padrão sem erro (E2)	133
Tabela 18 - Porcentual do estudo R&R para as duas estratégias.....	133
Tabela 19 - ANOVA com dois fatores sem interação para as três posições.....	138
Tabela 20 - Porcentual do estudo R&R para as três posições.....	138
Tabela 21 - ANOVA para comparação entre as médias das três posições	139
Tabela 22 - Agrupamento das posições	139
Tabela 23 - Medições do Bloco padrão.....	140
Tabela 24 - Dados amostrais para o teste interino.....	141
Tabela 25 - ANOVA para os dados Históricos e Atuais	144
Tabela 26 - Contribuição percentual de cada variável na variação do Sistema de Medição	145
Tabela 27 - Resultados das médias na posição 2	146
Tabela 28 - Ensaio padrão nas posições 1 e 3	149
Tabela 29 - Medições nas posições 1 e 3 a 0° pelo método alternativo.....	151
Tabela 30 - Medições nas posições 1 e 3 a 60° pelo método alternativo.....	152
Tabela 31 - Medições nas posições 1 e 3 a 90° pelo método alternativo.....	153
Tabela 32 - ANOVA para as posições 1 e 2 nos ângulos de 0° e 60°.	157
Tabela 33 - Percentuais de contribuição na variabilidade das medições pelo método padrão e alternativo de medição.....	157
Tabela 34 - ANOVA das quatro séries de medição para o teste de hipóteses.....	159

Tabela 35 - Percentual de contribuição da variabilidade devido as medições histórica e atual.....	160
---	-----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Curva de distribuição normal de probabilidades	80
Equação 2 - Transformação da equação 1	80
Equação 3 - Média populacional	81
Equação 4 - Desvio padrão populacional.....	81
Equação 5 - Média amostral.....	81
Equação 6 - Desvio padrão amostral	81
Equação 7 - Distribuição Qui - Quadrado	82
Equação 8 - Limites naturais de tolerancia	83
Equação 9 - Valor do erro de medição da variavel de resposta	86
Equação 10 - Soma dos quadrados totais.....	87
Equação 11 - Variância t	87
Equação 12 - Modelo de erro.....	87
Equação 14 - Soma dos quadrados totais.....	89
Equação 15 - Soma dos quadrados da variavel posição	90
Equação 16 - Soma dos quadrados da variavel repetibilidade	92
Equação 17 - Soma dos quadrados da variavel peça.....	92
Equação 18 - Soma total dos quadrados das variáveis posição, peça repetibilidade, e erro	94
Equação 19 - Soma dos quadrados médios da variável posição	95
Equação 20 - Soma dos quadrados médios da variável repetibilidade	95
Equação 21 - Soma dos quadrados médios da variável peça.....	95
Equação 22 - Soma dos quadrados médios da variável erro.....	95
Equação 22 - F estatístico.....	97
Equação 23 - Modelo de erro.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS

E1, E2 - Variáveis experimentais referentes a estratégia de medição

P1, P2, P3 - Variáveis experimentais referentes a posição de medição

P1_0, P1_30, P1_60, P1_90, P2_0, P2_30, P2_90, P2_60 - Variáveis experimentais referentes a posição e orientação de medição

τ_i - Efeito das variáveis P1_0, P1_30, P1_60, P1_90, P2_0, P2_30, P2_90, P2_60, no nível i .

β_j - Efeito da variável peça no nível j .

γ_l - Efeito das variáveis repetibilidade no nível l .

$(\tau\beta)_{ij}$ - Efeito da interação entre as variáveis τ e β , nos níveis i e j .

y_{ijl} - Valor do erro de medição da MMC, determinado para a combinação dos valores i, j, l , dos níveis das variáveis experimentais $\tau, \beta, e \gamma$.

ε_{ijl} - Resíduo ou erro experimental, para o valor experimental y_{ijl} .

σ^2 - Variância do resíduo experimental.

χ^2 - Variável aleatória Qui-quadrado

F - Razão entre variâncias amostrais

\bar{y} - Média de um conjunto de resultados, provenientes de várias amostras

\bar{y} - Média de uma amostra

s - Desvio padrão amostral

μ - Média de uma população de resultados

σ - Desvio padrão de uma população de resultados

n - número de valores em uma amostra

N - Número de valores de uma população

α - Nível de significância

$(1 - \alpha)$ - Nível de confiança

β - Probabilidade de aceitação de uma hipótese nula (H_0) falsa, ou erro do tipo II

SQ - Soma de quadrados

GL - Grau de liberdade de uma estatística

SQM - Quadrado médio ou estimativa da variância de uma variável experimental

Sumário

CAPÍTULO 1.....	29
INTRODUÇÃO	29
CAPÍTULO 2.....	34
CARACTERÍSTICAS GERAIS, ERROS E TESTES INTERINOS EM MMC	34
2.1 - A História, a evolução e as características relevantes das Máquina de Medir por Coordenadas	35
2.2 - Erros que Influenciam no Desempenho e Calibração das Máquinas de Medir a Três Coordenadas	44
2.3 - Calibração de Máquinas de Medir a Três Coordenadas	63
CAPÍTULO 3.....	79
ASPECTOS TEÓRICOS E FUNDAMENTAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	79
3.1 - Conceitos Teóricos Fundamentais para o Desenvolvimento do Sistema de Avaliação de Desempenho em MMC.....	79
3. 2 - Distribuição Normal	80
3. 3 - Limites de Tolerância do Artefato Padrão	82
3.4 - Análise de Variância.....	85
3.5 - Estudo de Repetibilidade e produtividade (R&R)	99
CAPÍTULO 4.....	102
MÉTODO PARA MONITORAMENTO DO DESEMPENHO DAS MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS PELA APLICAÇÃO DE TESTES INTERINOS	102
4.1 - Planejamento para Monitoramento de um Processo de Medição.....	103
4.2 - Análises dos Dados Experimentais	104
CAPÍTULO 5.....	106
DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO PARA REALIZAÇÃO DE TESTES INTERINOS NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS.....	106
5.1 - Descrição da Máquina de Medir a Três Coordenadas	107
5.2 - Descrição do Artefato de Calibração	110
5.3 - Sequência das Etapas Necessárias Para Aplicação do Método Proposto.....	112
5.4 - Planejamento dos Experimentos de Avaliação Indireta de Desempenho da MMC	114
5.5 - Definição das Variáveis Experimentais	114
5.6 - Definição da Condição Inicial Da MMC	115
5.7 - Aplicação dos Testes Interinos de Desempenho na MMC	115
5.8 - Experimento complementar Alternativo	116
5.9 - Procedimento de Análise dos Experimentos	118
5.10 - Análise dos efeitos das variáveis experimentais.....	119
CAPÍTULO 6.....	121
TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	121

6.1 - Avaliação da Máquina de Medir a Três Coordenadas empregando o Método Proposto.....	122
6.2 - Avaliação inicial da Máquina de Medir por Coordenadas na posição 1 proposta	123
6.3 - Avaliação inicial da Máquina de Medir por Coordenadas nas três posições propostas	134
6.4 - Avaliação de desempenho da máquina de Medir por coordenadas na posição 1	140
6.5 - Avaliação de desempenho da máquina de Medir por coordenadas na posição 2	145
6.6 - Avaliação de desempenho da máquina de Medir por coordenadas na posição 3	148
6.7 - Avaliação da Reprodutibilidade da MMC nas Posições 1 e 3 pelo método alternativo.....	149
6.7.1 - ANOVA e Estudo de R&R nas Posições 1 e 3 da MMC.....	155
6.7.2 - Avaliação de desempenho da máquina de Medir por coordenadas na posição com posição e orientação independentes.	158
7. CONCLUSÕES	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166
ANEXO A	172
Valores de F ($F_{0,01}$) para uma área de 0,01 à direita de F.	172
ANEXO B	174
Valores de F ($F_{0,05}$) para uma área de 0,05 à direita de F.	174
ANEXO C	176
Tabela de dados da medição da posição 3, medição sem erro. Valores em mm	176
Tabela de dados da medição da posição 3, medição com erro. Valores em mm	176
ANEXO D	177
Tabela de dados da medição das três posições pelo método padrão, sem erro. Valores em mm.....	177
ANEXO E	180
Tabela de dados da medição das posições 1 e 3 pelo método alternativo, nos ângulos de 0 e 60 graus com tinta na esfera. Valores em mm.	180
ANEXO F	181
ANEXO G	184
Tabela de dados da medição das posições 1 e 3 pelo método alternativo, nos ângulos de 0 e 60 graus da montagem de blocos padrões de valor nominal de 112,500 mm.	184

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Metrologia é uma das áreas de grande importância da engenharia fundamental na realização de projetos. Devido ao fato das indústrias a todo tempo estarem visando o aumento da produtividade e a redução de custos, há a necessidade de equipamentos de medição precisos e rápidos, capazes de realizar medições complexas e de grande diversidade que atendam as tolerâncias determinadas pelo projeto de fabricação.

Atualmente as medidas realizadas nos laboratórios de metrologia dimensional, em ambiente industrial, são executadas na sua maioria através da aplicação de sistemas de medição por coordenadas, sejam uma, duas ou três coordenadas.

As Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) deram início a um novo momento na Metrologia Dimensional Mecânica. Estes equipamentos são instrumentos universais, muito flexíveis e quase sempre apresentam os melhores requisitos para inspeção de peças simples ou complexas em lotes pequenos ou médios com tolerâncias relativamente abertas. Um dos grandes atributos deste tipo de máquina é a substituição de grande parte da instrumentação convencional existente nos laboratórios de metrologia e

controle de qualidade das empresas. “Como meios de inspeção, tem permitido grandes avanços, pois possibilita a automação das atividades de inspeção e a integração entre os vários setores da empresa. São empregadas para a medição dos mais variados tipos de peças, reduzindo o tempo e os erros de medição” (MORAIS, 2012).

As MMCs possuem sistemas complexos de medição, que são capazes de medir pontos coordenados, distâncias entre elementos, posição verdadeira, ângulos e alguns erros geométricos dentro de um dado volume de trabalho limitado por suas características físicas e geométricas. Mesmo devido à complexidade e versatilidade nas tarefas executadas por essas máquinas, sua construção mecânica é relativamente simples, que na maioria dos casos são compostas por guias lineares e mancais aerostáticos, além de escalas optoeletrônicas que determinam as posições dos eixos de um sistema de coordenadas cartesianas.

As MMCs são instrumentos de metrologia mecânica que satisfazem a maior parte dos requisitos de inspeção demandados pela indústria manufatureira moderna. Embora possuam um projeto mecânico muito simples, quando combinada com escalas de alta resolução podem oferecer medições de grande precisão, grande volume de inspeção e universalidade. Sem dúvida o advento das Máquinas de Medir a Três Coordenadas propiciou um grande avanço na metrologia dimensional.

Como todo instrumento de medição, as máquinas de medir estão sujeitas a influências que modificam a posição relativa entre a peça e o ponto coletado pela sonda de medição provocando assim, uma diferença entre as coordenadas medidas e as coordenadas verdadeiras ou valor de referência. Esta diferença é chamada de erro.

As tecnologias de projeto e de fabricação das Máquinas de Medir a Três Coordenadas evoluíram muito desde os anos 50 em que Ferranti criou a primeira máquina. (HOCKEN, BOSCH, 2011). Apesar de tecnologias cada vez mais avançadas e processos de fabricação mais precisos e estáveis, é praticamente impossível fabricar equipamentos livres de erros geométricos, térmicos, dinâmicos e de posicionamento das escalas de medição.

Em sua maioria, as medidas realizadas em instrumentos de medição de características dimensionais, normalmente são relacionadas ao padrão de comprimento, o metro, por meio de uma calibração. Com o surgimento das normas internacionais, processos e procedimentos de calibração foram adotados. Para garantir a rastreabilidade das medidas, um parâmetro que represente a dispersão dos valores medidos, incerteza de medição, assim como a sua formulação, se faz necessário (SWYT, 2011).

A rastreabilidade na medição por coordenadas, por muitos anos foi motivo de debate, por questões associadas à estimativa da incerteza, devido ao fato de existirem infinitas combinações e geometrias possíveis de se medir nas MMCs. Diante deste fato, é importante descrever o caminho para a cadeia de rastreabilidade da dimensão medida, que varia desde a medição realizada pela MMC até o padrão de unidade do sistema internacional de unidades (SI) (SWYT, 2011).

Mas para solucionar o problema da rastreabilidade nas MMCs, algumas abordagens foram propostas, dentre elas: a abordagem do comparador, onde uma peça padrão idêntica às peças que serão inspecionadas é medida nas mesmas condições e da mesma maneira a ser empregada na inspeção dos testes de desempenho de curta duração para a avaliação do desempenho, onde devem ser usados padrões especiais, geralmente calibrados; e por fim, a construção de modelos matemáticos a partir das curvas de calibração dos erros geométricos da máquina, simulando o comportamento metrológico em diferentes operações de medição, denominada modelagem matemática (SWYT, 2011).

Para garantir a exatidão e repetibilidade das medições realizadas é necessário o conhecimento das fontes dos erros individuais ou dos erros volumétricos da MMC, seja através de calibração de forma direta ou indireta. Após a máquina calibrada, verificações periódicas são sugeridas para avaliar o seu desempenho até uma nova calibração completa ou devido à alguma intercorrência ou acidente ocorrido na máquina (BASEI et al., 2009).

Em sua maioria, os testes de curta duração para avaliação do desempenho oferecem um custo relativo menor, pois não exigem

equipamentos especiais e podem ser repetidos com maior frequência, por demandar menor tempo de execução. Determinados testes para a avaliação do desempenho de MMC são derivados da abordagem do comparador, denominados de testes de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R). Este estudo, por ser um caso especial da aplicação da análise de variância, é capaz de disponibilizar mais informações sobre o comportamento metrológico da máquina, como a contribuição de cada variável estudada no Sistema de Medição (DI GIACOMO, 2006).

Devido a este cenário, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para a realização de testes de avaliação do desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas, por meio de testes interinos. Com o uso de uma peça de trabalho de geometria dodecagonal, e com a aplicação de experimentos planejados para estudo de R&R, foram usadas as técnicas estatísticas da análise de variância, afim de identificar a melhor estratégia de medição que minimizasse erros, criar uma condição da situação de desempenho inicial da máquina, para posteriormente, realizar testes de desempenhos periódicos para monitoramento.

O desenvolvimento do trabalho, foi todo realizado em uma máquina de medir a três coordenadas tipo Ponte Móvel, no Departamento de Engenharia Mecânica, da EESC - USP.

Algumas das diretrizes do MSA (Análise dos Sistemas de Medição), como repetibilidade, reprodutibilidade são parâmetros que foram estudados. Para o estudo destas variáveis, foram conduzidos um ensaio padrão e um ensaio alternativo, para através de uma estatística de teste, decidir qual o melhor método que expressa maior confiabilidade na tomada de decisão relacionada ao monitoramento do desempenho do Sistema de Medição da máquina. A seguir estão descritos os capítulos que formam o trabalho.

No capítulo 2, segue uma revisão bibliográfica que aborda os métodos de monitoramento do desempenho de MMC realizados, conceitos de erros e suas características e causas e as variáveis que influenciam no Sistema de Medição.

Os fundamentos teóricos para aplicação da análise de variância para os testes de desempenho em Máquinas de Medir por Coordenadas, o modelo de arranjo experimental e a estatística de teste aplicada aos resultados, estão apresentados no capítulo 3.

No capítulo 4, está apresentado o método proposto para o monitoramento do desempenho de Máquina de Medir por Coordenadas através de testes interinos, desde o planejamento do experimento até a análise dos dados experimentais.

Em seguida, no capítulo 5, estão descritos a máquina e o artefato padrão utilizados, o procedimento detalhado para a aplicação do método proposto e a metodologia de cálculo.

Estão presentes no capítulo 6 os resultados obtidos pelo método padrão e alternativo de medição para monitoramento da Máquina de Medir por Coordenadas, bem como a análise e as discussões.

No capítulo 7, conclusões e considerações estão descritas a partir da elaboração deste trabalho, além de propostas para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS GERAIS, ERROS E TESTES INTERINOS EM MMC

A demanda por medições complexas e a alta concorrência no meio industrial, exigem elevada qualidade na fabricação de peças e componentes, além da capacidade de medições complexas realizadas pelas indústrias. Juntamente a estas necessidades, as indústrias de manufatura estão a todo tempo em busca do aumento da produtividade e da redução de custos de fabricação.

As empresas manufatureiras que buscam alcançar estes objetivos propostos pela demanda de mercado e as necessidades internas que visam as reduções de custos, necessitam de sofisticados controles de qualidade na produção e equipamentos de medição precisos e rápidos. Estes equipamentos devem ser capazes de realizar medições complexas e de grande diversidade que atendam as tolerâncias determinadas pelo projeto de fabricação, o que reforça a necessidade das medições serem executadas com o auxílio de uma MMC (Máquina de Medir por Coordenadas).

Segundo Kunzmann e Wäldele (1988), as máquinas de medir por três coordenadas são instrumentos capazes de realizar medições de forma rápida, precisa e flexível, além de serem consideradas como um dos mais importantes equipamentos para medição de peças.

Atualmente as MMCs estão presentes nas linhas de produção e controle de inspeção final do produto, o que torna pertinente e indispensável o conhecimento dos erros presentes durante a operação destas máquinas (JINWEN E YANLING, 2010),

Neste capítulo estão apresentadas as características e um breve histórico a respeito das máquinas de medir por coordenadas, também são descritos os fatores que influenciam nos erros durante sua operação e as consequências geradas nos resultados das medições. O capítulo ainda apresenta trabalhos realizados e métodos normalizados relacionados aos testes interinos em MMC.

2.1 A HISTÓRIA, A EVOLUÇÃO E AS CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DAS MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Em meados do ano de 1956, Ferranti Ltd em Dalkeith, na Escócia, desenvolveu a primeira Máquina de Medir por Coordenadas, sendo a primeira a ser classificada como MMC, proporcionando uma evolução nas máquinas controladas numericamente. Inicialmente a Ferranti Ltd. não era uma empresa que comercializava equipamentos de medição, mas devido a demanda por medições mais rápidas e flexíveis em alinhamento com a evolução das máquinas automatizadas de usinagem, foi o que justificou tal desenvolvimento. Mesmo diante desta criação e da evolução nas medições que era notável, os fabricantes de equipamentos de medição da época não deram crédito ao novo produto que estava por surgir no mercado mundial (BOSCH, 1995).

De acordo com Bosch (1995), foram necessários apenas dois anos a partir da integração de Harry Odgen à equipe de controle numérico da Ferranti no cargo de engenheiro mecânico chefe, para que se fosse

inventado o primeiro equipamento classificado como Máquina de Medir por Coordenadas e foi chamada de máquina de inspeção Ferranti.

Na figura 1 está apresentada a primeira Máquina de Medir por Coordenadas desenvolvida por Ferranti Ltd., no ano 1956.



Figura 1 - Primeira MMC fabricada por Ferranti Ltd em 1956
Fonte: Bosch (1995).

Apesar da promissora invenção, Odgen e membros da Ferranti, já vislumbravam melhorias no desenvolvimento da máquina de inspeção, com o objetivo de acompanhar o ritmo de manufatura das indústrias que dispunham de máquinas-ferramenta controladas por comando numérico e que estavam mais adiante em seu desenvolvimento, portanto, fabricava peças em um menor espaço de tempo em relação as inspeções realizadas pelas Máquinas de Medir por Coordenadas

Segundo Bosch (1995), o engenheiro mecânico Harry Odgen percebeu que se a máquina de medir movesse livremente sobre seus eixos de medição e tivesse um visor eletrônico, promoveria uma facilidade na inspeção de componentes e peças fabricadas, conseqüentemente ocorreria uma redução

no tempo de medição e na necessidade de se ter operadores com habilidades diferenciadas na operação e manipulação, contribuindo para as questões econômicas da indústria.

O projeto desenvolvido inicialmente pela Ferrant era uma máquina de inspeção com movimentos na direção X e Y, contendo um deslocamento de 610 mm e 381 mm, respectivamente, e o eixo Z com 254 mm. No projeto inicial, a medição utilizando o eixo Z era realizada de forma limitada, por ser uma adaptação, mas, em 1962 foi planejada uma mudança para o eixo Z, o que proporcionou medição de forma completa também nesta direção. A resolução das guias da máquina era de 0,012 mm, enquanto que a precisão de projeto na inspeção de peças da produção era de $\pm 0,025$ mm (BOSCH, 1995).

Conforme afirmação de Bosch (1995), algumas empresas obtiveram os direitos de comercialização das MMCs em 1959. Entre elas estão a Bendix Corporation e a Sheffield Corporation, empresa obtida pela Bendix em meados 1956. A comercialização globalizada destas máquinas se deu a partir do interesse de George Knopf, gerente geral da seção de controle industrial da Bendix Corporation, após o seu comparecimento na amostra internacional de Máquinas-Ferramentas em Paris no ano 1960, onde a máquina foi apresentada.

Em 1962 na Itália, Franco Sartorio, Luigi Lazzaroni e Giorgio Minucciani constituíram a “Digital Electronic Automation” (DEA). Depois de vários anos em desenvolvimento, em 1994, a DEA se tornou parte da “Brown & Sharpe Corporation” (BOSCH, 1995).

No Japão, o desenvolvimento de MMCs foi iniciado pela Mitutoyo em 1968. No ano de 1980, a Mitutoyo disponibilizou no mercado sua primeira MMC controlada por computador (BOSCH, 1995).

Em 1985 na Alemanha, a Carl Zeiss e a Sheffield tornaram-se as primeiras fabricantes a produzirem MMCs com correção de erro por software (BOSCH, 1995).

Devido a essa evolução histórica das MMCs, é possível notar que o seu desenvolvimento gerou muitas oportunidades de negócios, resultando

uma competição que promoveu o enorme progresso tecnológico das MMCs, presentes atualmente no mercado.

Atualmente marcas conhecidas mundialmente como Mytutoyo, COORD3, com destaque para as marcas DEA, Sheffield, Leitz, Tesa e Brow & Sharpe, pertencentes ao grupo Hexagon, comercializam esse tipo de máquina.

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO, PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES E APLICAÇÕES DAS MMCs

Conforme publicações realizadas pela American Society of Mechanical Engineers, a ASME B89.4.1 (1995), as MMCs foram classificadas com observação na estrutura mecânica de cada máquina, que segundo esta norma americana, as máquinas de medir estão classificadas em 11 tipos, mas de acordo com Hocken e Bosch (2011) os tipos mais comuns e de maior importância disponíveis no mercado são Ponte Móvel, Ponte Fixa, Cantilever, Braço Horizontal e Pórtico.

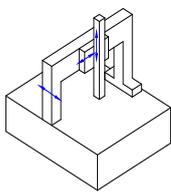
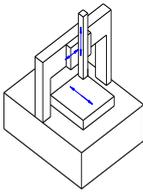
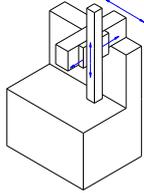
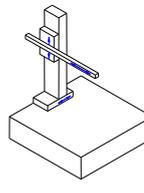
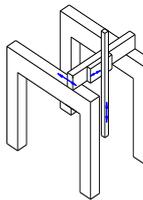
Segundo Di Giacomo (1986), o detalhamento a respeito do tipo de estrutura é extremamente necessário no momento do desenvolvimento da formulação de um modelo matemático para o equacionamento do erro volumétrico. Além disso, este conhecimento também é importante no instante em que se define a estratégia de aplicação do modelo, pois dependendo da estrutura estudada, as equações dos erros são modificadas. Portanto, é possível considerar as mesmas equações matemáticas para todas as máquinas que contemplam o mesmo tipo de estrutura.

Estão disponíveis no mercado os mais diferentes tipos de estruturas mecânicas de máquina de medir por coordenadas. A partir destas características, é possível definir suas aplicações.

Na tabela 1 está apresentado o desenho esquemático de cada estrutura das MMCs e as principais aplicações propostas por Hocken e Bosch (2011).

Tabela 1 - Tipos de estruturas de MMC.

Fonte: Hocken e Bosch (2011).

	PONTE MÓVEL	PONTE FIXA	CANTILEVER	BRAÇO HORIZONTAL	PÓRTICO
APLICAÇÕES GERAIS					
PRECISÃO					
PEÇAS GRANDES					
ESTRUTURA MECÂNICA					

Hocken e Bosch (2011), descreve os tipos de máquinas por coordenadas, assim como suas aplicações, vantagens e desvantagens. Estão descritas a seguir algumas características das máquinas de medir por coordenadas dos tipos Ponte Móvel, Ponte Fixa, Cantilever, Braço Horizontal e Pórtico, sugeridas pelo autor.

2.1.2. PONTE MÓVEL

A máquina de medir por coordenadas do tipo Ponte Móvel são as mais utilizadas pela indústria, devido a sua versatilidade em medir peças de pequenas e médias dimensões, com uma incerteza relativamente pequena às demais máquinas. As principais características deste modelo de máquina é possuir uma mesa fixa para apoio das peças a serem medidas e um sistema de ponte móvel, que permite movimentar todos os eixos da máquina, pois estão todos solidários a esta ponte (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Segundo Hocken e Bosch (2011), as MMCs do tipo Ponte Móvel têm vantagens sobre o efeito de flexão do eixo horizontal em relação à do tipo Cantilever, devido a característica do tipo Ponte Móvel possuir duas colunas

de apoio. Ainda para o autor, o efeito de erro angular “yaw” encontrado no modelo Ponte Móvel pode estar relacionado à possibilidade de ocorrer velocidades diferentes durante o movimento nas duas colunas distintamente. Na figura 2 estão ilustradas máquinas do tipo Ponte Móvel.



Figura 2 - MMC do tipo ponte móvel.
Fonte: Hexagon Metrology (2016)

2.1.3. PONTE FIXA

A figura 3 apresenta máquinas de medir do tipo Ponte Fixa, que tem em sua principal característica uma ponte rígida solidária à base da máquina. As peças a serem medidas ficam apoiadas sobre o desempenho da máquina, que é móvel. Este deslocamento realizado pelo desempenho é considerado como sendo um eixo de coordenada da máquina. Devido à rigidez proporcionada por esta estrutura, a máquina de medir por coordenadas do tipo Ponte Fixa é uma das mais precisas comercializadas atualmente. Esta configuração suprime o erro de “yaw” durante a movimentação do eixo na direção longitudinal da mesa. A principal vantagem deste modelo de máquina é a rigidez da estrutura, parâmetro este que proporciona como desvantagem da máquina, uma baixa velocidade de operação. Esta robustez do desempenho possibilita uma possível ocorrência de flexões na mesa e também reforça a necessidade de uma extensa guia para sua locomoção. Portanto é uma máquina grande e robusta, mas com curso de medição efetivo relativamente

pequeno, se comparado às máquinas do tipo Ponte Móvel (HOCKEN; BOSCH, 2011).



Figura 3 - MMC do tipo ponte fixa.
Fonte: Hexagon Metrology (2016)

2.1.4. CANTILEVER

A máquina de medir por coordenadas do tipo Cantilever contempla em seu projeto um braço móvel que permite a alimentação de peças por três laterais ao redor da máquina, facilitando acessibilidade na entrada e na saída de peças a serem medidas com ou sem o auxílio de alimentadores automáticos. Além dos três lados abertos, é importante citar a baixa massa da estrutura da máquina que se move, para um dado volume de medição. Estas características permitem a medição de peças compridas e proporcionam mais agilidade nas medições (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Este modelo de máquinas de medir por coordenadas possui ainda como característica uma mesa fixa e um braço que serve de apoio e oferece movimento a um carro que carrega o eixo vertical. Este eixo vertical é quem carrega a sonda de medição. Nesta configuração não há a presença de guias para o deslizamento da mesa e nem tampouco guia sobre a mesa, pois a

mesma é fixa, o que possibilita a realização de medições em peças pesadas sem que se comprometa a exatidão da medição devido ao peso (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Este tipo de máquina é melhor entendido com o auxílio da figura 4.



Figura 4 - MMC do tipo cantilever
Fonte: Hexagon Metrology (2016)

2.1.5. BRAÇO HORIZONTAL

As grandes vantagens das máquinas de medição por coordenadas de Braço Horizontal são particularmente evidenciadas quando se tem o objetivo de medir peças confeccionadas em chapa metálica para a indústria automotiva ou outros componentes de grande volume para as indústrias aeroespacial, naval, de defesa, de maquinário e a ferroviária. Estas máquinas possuem estrutura aberta que permite um acesso direto à peça usinada e, portanto, facilita significativamente o carregamento e o

descarregamento das mesmas no volume de medição (HOCKEN; BOSCH, 2011).

Segundo Hocken e Bosch (2011), as MMCs horizontais também podem ser integradas como um componente da linha de produção automatizada, tais como carrocerias brutas no setor de automóveis. Além de contar com um longo curso de medição em seu eixo de maior deslocamento, é possível aplicar ainda altas velocidades de medição.

Na figura 5 são mostradas duas máquinas do tipo Braço Horizontal, sendo uma configurada com um braço horizontal e a outra com dois braços Horizontais. Este Sistema de Medição com dois braços horizontais consiste na utilização de braços idênticos e espelhados, movendo simultaneamente. A baixa exatidão é a grande desvantagem desta configuração de MMC.

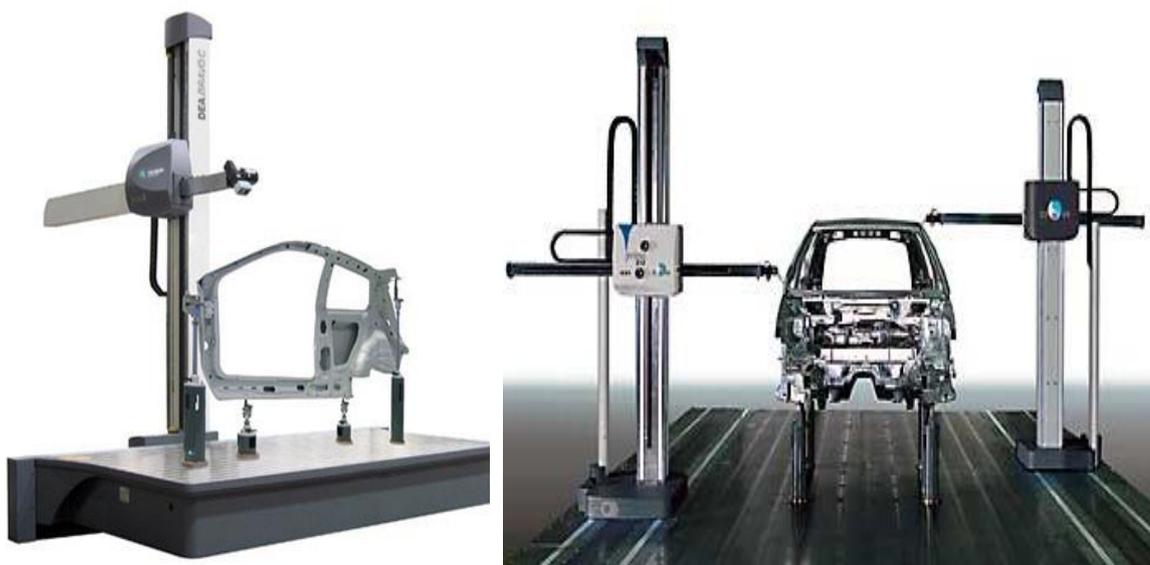


Figura 5 - MMC do tipo braço horizontal
Fonte: Hexagon Metrology (2016)

2.1.6. PÓRTICO

Em sua maioria, as máquinas estacionárias de medição por coordenadas do tipo Pórtico garantem grande desempenho. Não somente pela capacidade volumétrica desses gigantes do mundo, mas também impressionam pelos seus materiais robustos, a estrutura estável e a alta precisão, sejam elas alocadas em chão de fábrica, em célula de produção,

ou até mesmo em sala de medição. Estas MMCs podem operar como um sistema ou como estações em uma célula de produção.

Os pontos fortes destas máquinas estão evidenciados quando são utilizadas para medições tridimensionais de componentes e montagens de grande volume, seja na indústria aeroespacial, na construção naval e na de geração de energia.

A figura 6 mostra duas máquinas, sendo uma delas relativamente curta, mais robusta, projetada com uma estrutura maciça para evitar deformações, e outra longa de mesmas características. A fundação estrutural destas máquinas também é maciça afim de evitar que o peso dos componentes medidos ocasione distorções indesejadas nas fundações e conseqüentemente causem erros nas medições.



Figura 6 - MMC do tipo pórtico.
Fonte: Hexagon Metrology (2016)

2.2 ERROS QUE INFLUENCIAM NO DESEMPENHO E CALIBRAÇÃO DAS MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Assim como ocorre nos demais instrumentos de medição, o desempenho das Máquinas de Medir a Três Coordenadas é avaliado em função dos erros de medição. Em uma boa avaliação, é essencial o levantamento destes erros e quais são os fatores que influenciam diretamente e indiretamente para a manifestação dos mesmos.

Um sistema de coordenadas é um sistema que utiliza um ou mais números, ou coordenadas, exclusivamente para determinar a posição de

um ponto ou outro elemento geométrico. Os programas computacionais dedicados à medição das MMC têm por peculiaridade em uma medição, a da determinação das coordenadas de pontos pertencentes às superfícies das peças. A partir destes pontos é possível determinar características geométricas das peças, e desvios de forma, posição e orientação de elementos geométricos e formas livres, bem como os desvios de suas coordenadas em relação aos valores verdadeiros, que segundo Piratelli Filho (1998), pode ser chamado de erros de medição.

O procedimento no levantamento dos erros de medição caracteriza as técnicas de avaliação dos mesmos, que podem ser classificadas em métodos diretos ou indiretos. Quando se utilizam instrumentos que possuem menor incerteza de medição na verificação de erros elementares, trata-se dos métodos diretos, e quando se realiza medição de padrões calibrados na MMC para observância dos erros de medição, caracteriza métodos indiretos (DI GIACOMO, 1986).

Segundo Cardoza (1995), para determinar os erros das coordenadas dos pontos da máquina, utiliza-se de técnicas de avaliação de erros, e a viabilidade destas depende da complexidade e das dificuldades envolvidas. Para avaliar o desempenho, os procedimentos normalmente aceitos envolvem a determinação dos erros de medição na execução de uma determinada tarefa, como por exemplo, medindo o diâmetro de um eixo.

2.2.1 - OS ERROS DE MEDIÇÃO NAS MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

De acordo com Piratelli Filho (1998), os erros de medição podem ser decompostos em sistemático, aleatório e de histerese, observados durante um processo de inspeção.

Os desvios dos valores médios observados, após uma quantidade de medidas realizadas na mesma peça em relação ao valor de cada evento medido na mesma amostra, representam os erros sistemáticos. A exatidão da máquina está relacionada aos erros sistemáticos, pois quanto menor a amplitude deste erro, melhor é qualidade da medição. Devido a

característica destes erros de serem previsíveis, se torna possível a compensação durante o processo de leitura do equipamento.

Em um conjunto de resultados, os erros aleatórios correspondem à variação dos valores medidos em relação ao valor médio observado. Mantidas as mesmas condições de operação, a maior repetibilidade da máquina será quanto menor for este erro.

O fato da MMC ser uma máquina versátil em seus deslocamentos, os erros de histerese estão relacionados às diferentes direções e sentidos de aproximação da sonda em relação à superfície da peça, ao se tomar medidas repetidas e nas mesmas condições, o que provoca diferentes valores do erro sistemático. As curvas de calibração evidenciam bem a presença deste erro (CARDOZA, 1995).

2.2.2 - VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE MEDIÇÃO EM MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Em sua maioria, os instrumentos de medição são compostos por uma extensa variedade de peças e de subsistemas, os quais apresentam desvios em suas características funcionais. Estes desvios são originados da variação instantânea das condições operacionais, que ocorrem durante o processo de fabricação, sendo muitas vezes imperceptíveis e assim difíceis de controlar. Com isto, o comportamento real do Sistema de Medição acaba apresentando tendências e causando os erros de medição.

A utilização de instrumentos de medição fora das condições especificadas pelo fabricante para sua utilização, por inobservância das condições ambientais e de operação, pode também ocasionar erros de medição.

Segundo Marques (2003), as MMC podem ser divididas em vários subsistemas que juntos formam o Sistema de Medição, que é constituído pelos elementos mecânicos que compõem a estrutura mecânica da máquina, o sistema de apalpação e sondagem, o programa computacional específico à medição e o microcomputador dedicado a máquina. Além destes subsistemas, ainda é possível ressaltar a estratégia de medição adotada, a

qualificação do operador deste equipamento, e as influências ambientais como temperatura, umidade e pressão atmosférica.

Para um melhor estudo dos erros de medição nas MMCs, é conveniente classificar as variáveis inerentes ou dependentes do processo e independentes do processo. A seguir estão descritas as contribuições, as influências e como os componentes estão classificados em relação ao Sistema de Medição.

2.2.3 VARIÁVEIS INERENTES AO PROCESSO.

As variáveis inerentes ao processo são aquelas associadas à própria máquina, portanto estão relacionadas diretamente ao seu Sistema de Medição. É possível elencar como sendo estas variáveis inerentes ou dependentes ao processo, a própria estrutura da máquina, o tipo de apalpador, o tipo construtivo da sonda, o diâmetro do apalpador, as escalas de medição, os programas computacionais dedicados a medição, entre outros.

Estas variáveis dependentes relacionadas as estruturas mecânicas das MMCs estão ligadas diretamente aos tipos construtivos, que podem ser encontradas nos mais variados tipos, classificados em Cantilever de Mesa Fixa ou Mesa Móvel, Ponte Móvel, Ponte Fixa, Coluna, de Braço Horizontal com Mesa Móvel ou Mesa Fixa, Ponte em forma de L e Pórtico. (ANSI/ASME B89.4.1, 1995).

De acordo com Di Giacomo (1986), uma característica comum na construção destas máquinas é a transgressão do princípio básico da metrologia dimensional, o princípio de Abbè. O que representa observar se a linha de medição da máquina não corresponder com a linha de referência do Sistema de Medição, ocorre a presença do erro de Abbè.

Devido ao movimento da sonda que está fixada a estrutura móvel da máquina no espaço tridimensional do volume de medição, e as escalas fixadas na guia ou nos eixos da máquina, impossibilita a colinearidade entre os elementos, inviabilizando contemplar este princípio de Abbè nas MMC.

A figura 7 demonstra uma possível rotação do eixo Z em torno do eixo X da máquina no plano XZ, conseqüentemente aparecerá um erro de Abbè na direção X, devido à não colinearidade da escala do eixo X da máquina com a sonda medição.

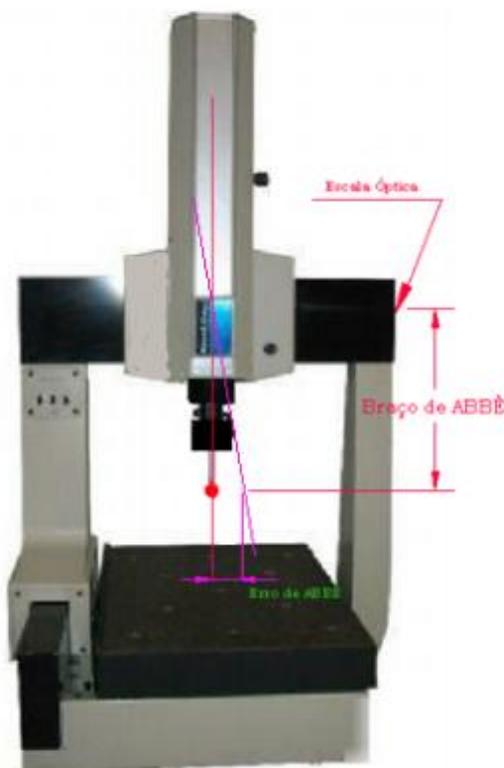


Figura 7 - Erro de Abbé em MMC

Os componentes do subsistema elementos mecânicos que compõem a estrutura mecânica da MMC como desempenho, guias dos mancais, estrutura do suporte da sonda, escalas de medição, sonda de medição e programa computacional, estão diretamente relacionados com a grandeza dos erros presentes. Piratelli Filho (1998) propõe um estudo mais detalhado dos efeitos causados por estas variáveis, denominadas pelo autor de variáveis intrínsecas.

Desta maneira, os componentes da MMC estão diretamente relacionados com a grandeza dos erros presentes, e um estudo mais detalhado do seu efeito deve ser realizado. Os principais componentes mecânicos de uma MMC e suas influências nos erros estão descrito a seguir.

O DESEMPENO DA MÁQUINA

O Desempeno é uma espécie de suporte ou mesa para acondicionamento das peças a serem medidas nas MMCs. Os desempenos são construídos de granito ou de ferro fundido, devendo apresentar uma elevada rigidez, de modo a minimizar a deformação elástica devido ao peso das peças a serem medidas. Segundo Piratelli Filho (1998), é recomendado que o erro de planeza do desempenho seja pequeno, caso contrário pode resultar em erros sistemáticos grandes quando em conjunto com os erros de forma geométrica e de posição da peça sobre o mesmo.

AS GUIAS DOS MANCAIS

Os Mancais das guias em geral usados nas máquinas MMC são do tipo aeroestáticos. Nestes mancais, a formação de uma camada de ar sob os suportes da estrutura móvel reduz o atrito, porém erros de forma das guias podem ocasionar erros geométricos nos eixos X, Y e Z. De acordo com Piratelli Filho (1998), dependendo do tipo construtivo da MMC, os mancais deslizam sobre o desempenho, e os erros são influenciados pela planeza do mesmo.

A ESTRUTURA DE SUPORTE DA SONDA

A Estrutura de Suporte da Sonda devido à ação da força gravitacional provoca deformações elásticas nos eixos da máquina. Dependendo da posição relativa dos suportes da sonda da MMC no volume de trabalho, ocorrem deformações elásticas diferenciadas na estrutura e conseqüentemente surgem diferentes erros de medição. Para Piratelli Filho (1998), quanto maior a rigidez dos materiais e da estrutura, menores serão os erros.

AS ESCALAS DE MEDIÇÃO

As Escalas de Medição são usadas com o objetivo de determinar a posição de um ponto dentro do volume de trabalho da MMC, em relação aos eixos X, Y e Z. Em geral, as escalas utilizadas empregam o princípio das franjas de Moiré, onde duas escalas de vidro, uma fixa e uma móvel, contendo uma grande quantidade de divisões, são superpostas. O

deslocamento relativo entre elas produz franjas de batimento, que são captadas por fotocélulas. Pequenos defeitos, seja nas escalas ou no sistema óptico-eletrônico, produzem erros de medição. Segundo Piratelli Filho (1998), possíveis diferenças no coeficiente de expansão térmica linear entre as escalas e as guias da estrutura também produzem erros de medição.

AS SONDA DE MEDIÇÃO

A Sonda de Medição é uma espécie de sensor que tem a finalidade de apalpar os pontos da superfície da peça a ser medida, de modo que a MMC possa determinar esta posição no volume de trabalho. Em geral, as sondas podem ser classificadas como sondas com ou sem contato, em função das suas características.

As sondas com contato podem ser do tipo rígida, que tem uma certa limitação quanto a sua apalpagem, e do tipo gatilho ao toque que dispõe de controle de força ao toque de acordo com a aplicação desejada, leve, média ou forte. Por fim a sonda do tipo digitalização que permite executar medições de contorno de geometrias definidas ou de elementos de forma livre, de maneira rápida e precisa (HEXAGON METROLOGY,2016).

As sondas sem contato podem ser do tipo de escaneamento a laser, que permitem uma rápida captura de nuvem de pontos, a inspeção de características geométricas, de superfícies de forma livre e a engenharia reversa. Este tipo de sonda também pode ser por medição óptica, que permite iluminar e visualizar uma área do componente que será medido, possibilitando a realização de medições ópticas de componentes de grande porte (HEXAGON METROLOGY,2016).

Uma das sondas mais usadas é a do tipo gatilho ao toque, devido a versatilidade de se tocar em todas as direções da peça, sem necessidade de troca de apalpador. Esta sonda ao tocar a superfície da peça emite um sinal elétrico identificado pelo programa computacional, que registra a posição da sonda, no volume da MMC. Estas sondas possuem um sistema contendo esferas que servem de apoio para roletes rigidamente conectados à haste do apalpador, fazendo parte de um circuito elétrico. Ao contato da esfera do apalpador da sonda com a superfície da peça, ocorre uma ligeira alteração

das posições relativas roletes-esferas, que provoca um distúrbio no circuito e dispara um sinal elétrico para a unidade de controle da máquina (HOCKEN, BOSCH, 2011).

Os erros de medição relacionados às sondas estão associados às suas características elétricas, cinemáticas e mecânicas. Uma fonte de erros está relacionada à deflexão da haste do apalpador da sonda, produzida pelos esforços no instante do contato do apalpador com a peça (VDI/VDE 2617, 1986). A direção de apalpação da força de contato também afetam os erros de medição (HOCKEN, BOSCH, 2011).

OS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Os Programas Computacionais das MMCs têm a função de obter e armazenar os valores das coordenadas dos pontos das superfícies das peças, calcular os parâmetros da geometria e apresentá-los em um visor dedicado à máquina, em um monitor de vídeo ou em forma de relatório para análise e impressão. Além disto, estes programas tem a capacidade ainda de controlar os movimentos da MMC, através de controle numérico, sendo possível a programação da sequência de movimentos para medição das peças.

Segundo Piratelli Filho (1998), é possível a ocorrência de desvios causados pelo método de cálculo nos programas computacionais, devido a aproximações nos resultados obtidos no cálculo dos elementos da geometria adotada. Em casos que se suspeitam que parte considerável dos erros de medição pode estar associada aos programas computacionais, é recomendado que se conduza a MMC à um teste de avaliação. Os testes podem ser executados através do rastreamento do fluxograma do programa usado, de difícil manipulação na prática, pelo fato de se tratar de um segredo do fabricante, ou através da execução de testes que simulem pontos de uma superfície conhecida através de padrões volumétricos virtuais para a avaliação dos programas computacionais. Neste procedimento, uma série de coordenadas de pontos de uma superfície imaginária é simulada em uma MMC para verificar o comportamento dos valores calculados e apresentados pelos programas computacionais.

2.2.4 VARIÁVEIS INDEPENDENTES AO PROCESSO.

As variáveis independentes são aquelas relacionadas às condições de operação, de instalação e às variáveis ambientais do local de operação da máquina. Estas variáveis precisam ser consideradas na contribuição da formação do erro da máquina, devem ser monitoradas desde a instalação até a operação de MMC (PIRATELLI FILHO, 1998).

As principais variáveis, como a instalação e operação de MMCs, o acabamento da peça, as especificações com relação ao limite máximo de peso suportado pelo desempenho, a temperatura recomendada para a operação das máquinas MMCs, o planejamento do local de operação das MMCs relacionados aos problemas de vibrações na máquina, a energia elétrica que alimenta a máquina, o fornecimento contínuo de ar comprimido, a umidade, as partículas em suspensão no ar e a pressão atmosférica estão descritas a seguir.

A INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO DE MMC

A instalação e operação de MMC deve ser realizada com o máximo de cuidado, além da observância rigorosa das especificações descritas pelo fabricante. É possível ainda ocorrer a variabilidade de alguns dos fatores ambientais e podem ser induzidos erros na medição, assim como aspectos geométricos da peça a ser medida. Desta forma, é importante o conhecimento do efeito destas variáveis sobre os erros de medição. As normas BSI 6808 - Part 3 (1989), VDI/VDE 2617 - Part 1 (1986) e ANSI/ASME B89.4.1 (1995) consideram os efeitos das condições ambientais sobre o desempenho destas máquinas, e propõe alguns testes para sua verificação. As variáveis de maior importância, e de grande significância nos efeitos sobre a máquina, estão descritas a seguir.

O ACABAMENTO DA PEÇA

O estado de superfície da peça é uma característica que pode induzir a erros de interpretação de resultados. A presença de erros grosseiros pode ser evitada através de uma análise visual prévia, antes da medição, assim

como a presença de rebarbas de fabricação e de peças com elevada rugosidade superficial.

Nos casos de peças longas com seção transversal reduzida, podem ocorrer erros devido à força exercida pelo apalpador da sonda sobre a sua extremidade, apesar de atualmente estar disponível apalpador com força de apalpagem controlada, deflexão ou até o empenamento podem ocorrer, gerando assim erro de medição.

Uma característica importante também é a fixação da peça sobre o desempenho. Esta deve ser feita de forma a garantir a rigidez da montagem.

A POSIÇÃO E PESO DA PEÇA

A posição, o peso da peça e as especificações com relação ao limite máximo de peso suportado pelo desempenho da MMC devem ser rigorosamente obedecidas, sob pena de provocar grandes distorções elásticas na estrutura da máquina. A posição da peça sobre o desempenho ou mesa da máquina deve ser de tal modo que o seu peso esteja bem distribuído, evitando a concentração de esforços e conseqüente distorção elástica da estrutura. Segundo Piratelli Filho (1998), nos casos de peças de pequenas dimensões e de peso reduzido, a posição de medição deve ser escolhida, optando pelas regiões no volume da máquina onde a incidência e concentração dos erros são menores.

A TEMPERATURA

A temperatura recomendada para a operação das máquinas MMC é de $20 \pm 1^\circ \text{C}$, conforme os manuais de operação. Valores diferentes deste provocam alterações dimensionais nas escalas e na estrutura da máquina, ocasionando erros.

Embora os laboratórios de metrologia em geral disponham de sistemas de controle da temperatura, vários outros fatores podem provocar gradientes térmicos, como as lâmpadas acesas, a presença de técnicos no interior do laboratório, outros equipamentos em operação, a presença de janelas e as paredes (VDI/VDE 2617 - Part 1, 1986).

Através de um estudo, Kunzmann & Wäldele (1988) mostraram que a variação da temperatura ambiente no laboratório provocou

comportamentos distintos nas diferentes partes das MMCs, sendo necessários tempos diferentes para estabilização da temperatura.

As normas ANSI/ASME B89.4.1 (1995) e BSI 6808 - part 2 (1987) sugerem testes para verificar as condições de temperatura, que devem ser executados antes de testes de verificação do desempenho.

VIBRAÇÃO

Os efeitos causados pela vibração, mesmo que embora seja recomendado que as MMCs devam ser apoiadas em suportes com isolamento externo de vibração, pode ocorrer que a ação de forças não previstas na instalação, como aquelas provenientes de rodovias, ferrovias e máquinas de processamento, resultem em vibrações na máquina de medir, provocando variação no seu desempenho. Neste caso, a ação a ser tomada é de aspecto preventivo, tomando-se extremo cuidado no planejamento do local de operação da MMC, de modo a evitar o surgimento de problemas como este.

Algumas normas técnicas internacionais sugerem testes para analisar as vibrações nestas máquinas (BSI 6808 - Part 3, 1989; ANSI/ASME B89.4.1, 1995).

ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica que alimenta a MMC deve ser fornecida de forma contínua e uniforme, sendo que os níveis de tensão e de frequência, bem como os níveis de ruído proveniente da rede elétrica, devem ser controlados. O aterramento deve ser feito para aliviar sobrecargas no sistema (ANSI/ASME B89.4.1, 1995).

AR

O sistema de fornecimento de ar comprimido que alimenta os mancais aeroestáticos necessitam de um suprimento contínuo de ar comprimido a pressão constante. Este ar comprimido deve apresentar uma baixa quantidade de partículas sólidas e de óleo, além de uma temperatura constante e próxima daquela do laboratório, de modo a evitar desgaste dos

mancais ou induzir gradientes térmicos na máquina (ANSI/ASME B89.4.1, 1995).

OUTROS

Outros fatores que afetam o desempenho das MMCs são a umidade, as partículas em suspensão no ar e a pressão atmosférica.

A umidade relativa do ar deve ser controlada em níveis baixos, principalmente em função dos componentes eletrônicos da MMC, uma vez que ambientes muito úmidos podem provocar alteração dos contatos elétricos e mau funcionamento do equipamento.

As partículas em suspensão devem ser controladas em níveis baixos, uma vez que sua presença pode afetar os componentes mecânicos, como os mancais.

A pressão atmosférica pode influenciar o comportamento das máquinas que utilizam sistemas interferométricos.

Segundo Swornowski (2013), um olhar crítico para as técnicas de medição por coordenadas é de extrema importância e relevância, pois devido às técnicas possuírem pontos fracos, elas contribuem com grande significância nos resultados da medição. O autor enumera seis problemas, que tem início a partir das técnicas de qualificação da sonda, problemas relacionados aos procedimentos de calibração completa e nos testes interinos, limitações relacionadas aos cálculos matemáticos e compensações realizadas pelo programa computacional, construção de um novo sistema de coordenadas posicionado na peça e por fim limitações de incerteza associada à medição, que estão descritos a seguir.

Na qualificação da sonda, que é o primeiro passo a ser realizado após ligar a MMC, ou seja, determinar o diâmetro da ponta da esfera de trabalho e o comprimento da haste conectada a esfera.

Neste passo, uma esfera com um diâmetro de referência conhecido posicionada sobre o desempenho da máquina é medida. De acordo com Swornowski (2013), é aconselhável realizar medições em diferentes direções e usar um número máximo possível de pontos. O autor elenca como o principal problema a área de contato limitado entre a esfera de referência e

a esfera de medida. Uma única haste na posição normal pode atingir, no máximo, a metade da superfície da esfera de referência, seja ela medida com sonda de ponta única ou sonda multipontas.

O desenho esquemático deste acontecimento está mostrado na figura 8. Os semicírculos cinza representam os toques da esfera de trabalho, acoplado ao cabeçote de uma ponta ou multipontas, e a área cinza da esfera maior, representa a região de apalpagem na esfera de referência.

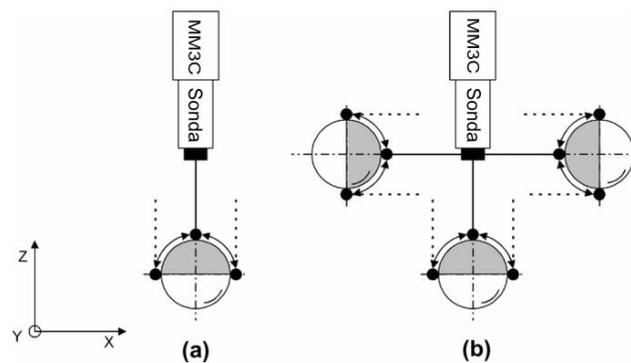


Figura 8 - Distribuição dos pontos medidos na esfera de referência pela esfera de trabalho. Ponta única (a) e múltiplas pontas (b).

Fonte: Adaptado de Swornowski, 2013

O procedimento de qualificação da esfera de trabalho quando montada em um cabeçote com indexação motorizada ou não, também apresenta problemas. Nos casos em que é necessário o uso de módulos prolongadores de haste, como na sonda da marca Renishaw de modelo PH10, mostrado na figura 9, é possível que ocorram erros por deflexão da haste.



Figura 9 - - Sonda Renishaw PH10

Fonte: Renishaw

Normalmente, a qualificação da máquina é realizada primeiramente na posição vertical, mas quando realizada em outras posições angulares, aparecem erros devido à deflexão da haste, conseqüentemente

influenciando o comprimento do centro da esfera de trabalho ao longo dos eixos X e Y, conforme figura 10. No entanto, os valores de deflexão nas junções do sistema não são constantes, ou seja, entre uma junção e outra, a correção através de programa computacional pode representar apenas valores aproximados (SWORNOWSKI, 2013).

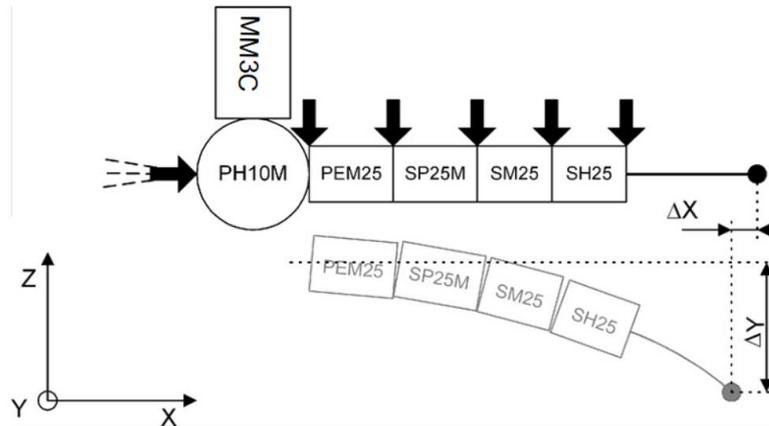


Figura 10 - Deflexão devida ao prolongamento da haste de suporte da esfera de medição.

Fonte: Adaptado de Swornowski, 2013

Os procedimentos de calibração completa ou nos testes interinos sob orientação da norma ISO 10360-2 (2001) podem ser acarretados de problemas relacionados ao posicionamento do artefato padrão sobre o desempenho da máquina. A figura 11 demonstra o procedimento de uma calibração usando um padrão escalado.

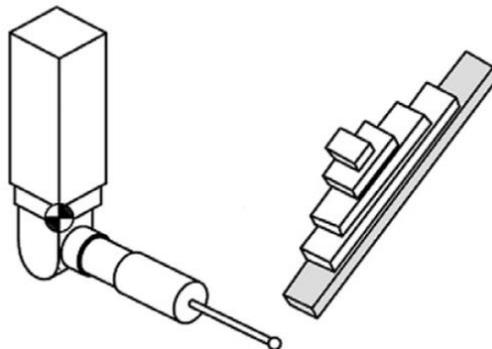


Figura 11 - Procedimento de calibração com padrão escalado medição

Fonte: ISO 10360-2, 2001

Em alguns casos os problemas da calibração de padrão escalado estão relacionados com uma possível deflexão do artefato padrão, como

mostrada na figura 12, por estarem posicionados inadequadamente, ou seja, parte do artefato está fora do apoio do dispositivo de posicionamento angular.

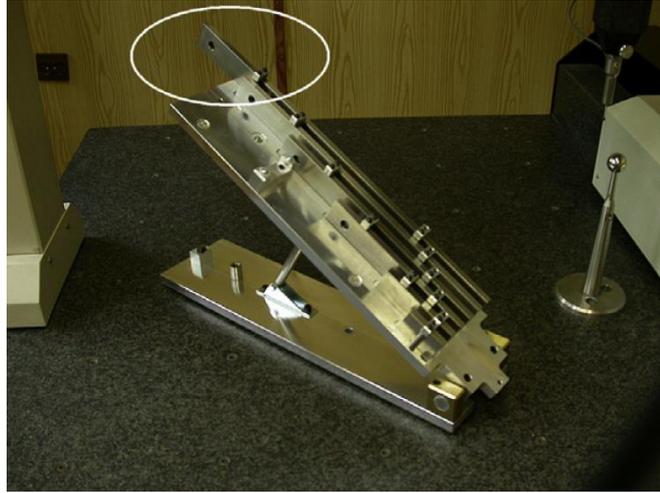


Figura 12 - Exemplo de um padrão escalonado fixado incorretamente

Fonte: Swornowski, 2013

A incerteza de medição pode ser aumentada devido à dificuldade encontrada ao tocar a peça a ser medida pela sonda, ocasionada pelo posicionamento inadequado da peça em relação ao toque da esfera de medição. A figura 13 mostra uma situação em que a região da esfera que toca na peça é justamente a região que não foi calibrada na qualificação, visto que a região cinza da esfera foi a região a qual foi medida no processo de qualificação da sonda mostrado na figura 8. Isso ocorre em função do deslocamento oferecido pela máquina e o posicionamento da peça sobre o desempenho (SWORNOWSKI, 2013)

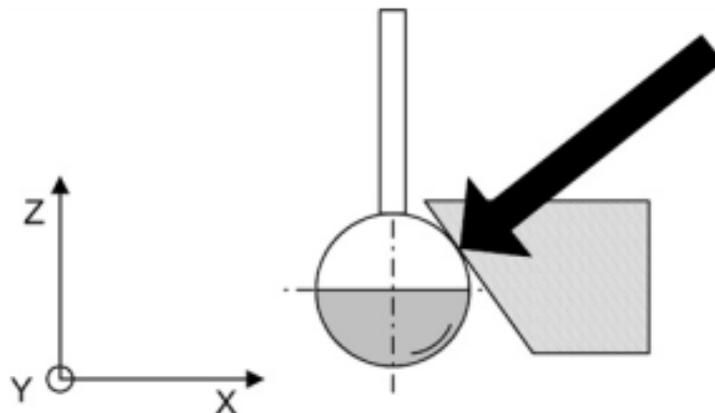


Figura 13 - Medição com uma parte da esfera que não foi calibrada

Fonte: Swornowski, 2013

De acordo com Swornowski (2013), ocorre ainda situações bastante comum, onde em sua maioria, o desempenho da máquina é apoiado em superfícies planas, conforme figura 14, o que não elimina os problemas de deflexões principalmente quando peças de grande porte são medidas.



Figura 14 - Apoio do desempenho de uma MMC

Fonte: Swornowski, 2013

A medição por coordenadas consiste essencialmente em localizar pontos sobre a peça a ser medida e processar matematicamente estes pontos. No processamento, o objetivo principal é representar, por meio de poucos pontos, a geometria da peça medida. A partir de pontos espaçados, há a necessidade de reconstruir matematicamente as geometrias medidas e extrair delas as informações geométricas necessárias.

No processo de reconstrução geométrica de elemento a partir de pontos, podem ser aplicados diferentes métodos matemáticos. A seguir estão apresentados métodos e técnicas, normalmente disponíveis na maioria dos programas computacionais dedicados à medição.

Métodos dos Mínimos Quadrados

A figura 15 mostra a medição de um círculo, onde o resultado é um elemento médio, calculado a partir de todos os pontos disponíveis na medição. O elemento geométrico é ajustado de tal forma que o somatório quadrático dos desvios residuais de cada ponto ao elemento ajustado é o

menor possível. Também conhecido como Least Square, Ajuste Gaussiano ou meramente Best Fit.

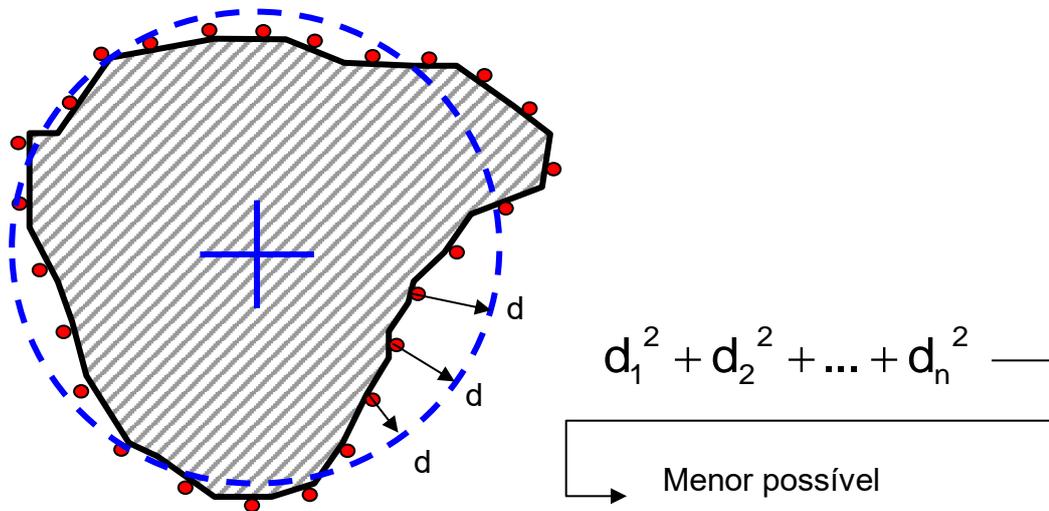


Figura 15 - Reconstrução de um círculo por mínimos quadrados

Fonte: forma3d, 2015

Máximo Círculo Inscrito

A figura 16 mostra a medição de um círculo pelo método de ajuste na condição de máximo círculo inscrito, este ajuste é aplicado para geometrias internas, ou seja, na medição de furos.

A partir dos pontos coletados no furo, o programa computacional determina quais os três pontos que determinam a menor circunferência possível, o que corresponde ao maior eixo que consegue se inscrever neste furo, sendo uma forma de ajuste mais funcional no aspecto da montagem.

Independentemente da quantidade de pontos apalpados, somente 3 determinam o resultado.

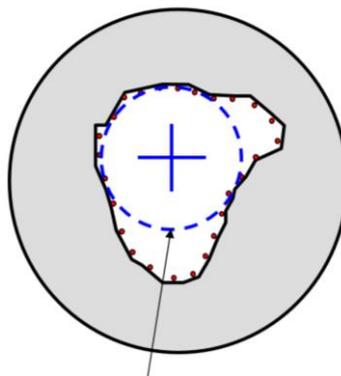


Figura 16 - Reconstrução de um círculo na condição de máximo inscrito

Fonte: Forma3d (2015)

Mínimo Círculo Circunscrito

A figura 17 mostra a medição de um círculo pelo método de ajuste na condição de mínimo circunscrito, este ajuste é aplicado para geometrias externas, ou seja, na medição de eixos.

A partir dos pontos coletados no eixo, o programa computacional determina quais os três pontos que determinam a maior circunferência possível, o que corresponde ao menor furo que consegue circunscrever este eixo, sendo uma forma de ajuste mais funcional no aspecto da montagem.

Independentemente da quantidade de pontos apalpados, somente 3 determinam o resultado.

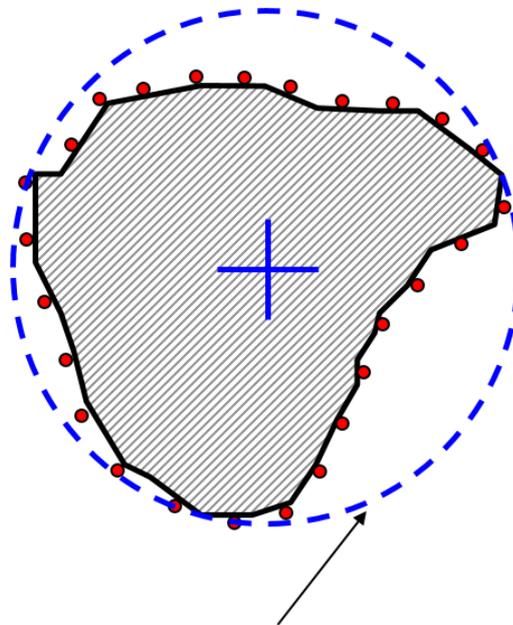


Figura 17 - Reconstrução de um círculo na condição de mínimo circunscrito

Fonte: Forma3d (2015)

Mínima Zona

Este método também chamado de Chebichev, é um ajuste normalmente realizado para a obtenção dos erros de forma como circularidade, cilindridade, retitude, planeza e perfis.

Para o cálculo da circularidade, a partir dos pontos apalpados em um eixo ou em um furo, o programa computacional determina dois círculos, um mais externo e outro mais interno aos pontos, concêntricos entre si, de forma a contemplar a menor zona radial entre estes círculos, conforme

mostrado na figura 18. O erro de circularidade também é possível de ser calculado a partir dos métodos de ajuste anteriores

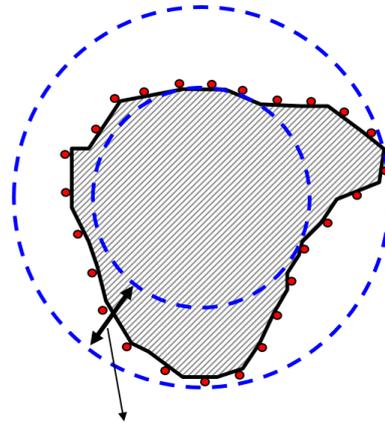


Figura 18 - Reconstrução de um círculo na condição de mínima zona para o cálculo de circularidade

Fonte: Forma3d (2015)

Na figura 19 é possível observar os diferentes métodos de ajustes e os resultados consideravelmente distintos que foram produzidos para uma única medição. Ocorreu variação tanto de posição do centro, quanto no valor do diâmetro. Estas variações são mais evidentes, principalmente quando se medem peças que apresentam desvios de forma significativos (PHILLIPS, 1995).

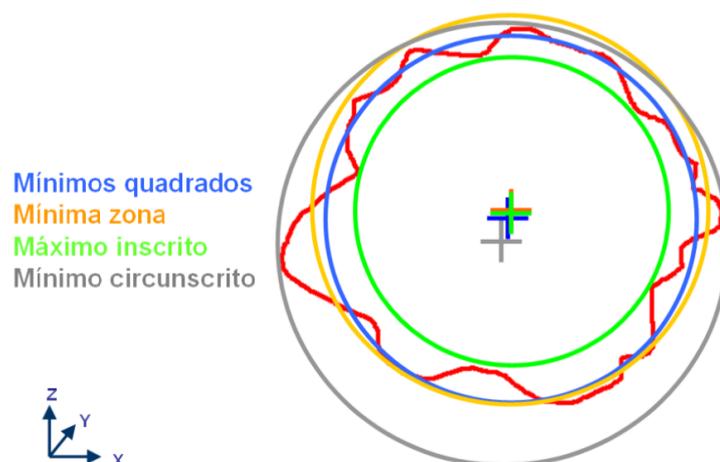


Figura 19 - Aplicação dos diferentes métodos de reconstrução matemática em medição de círculos

Fonte: Treinamento de PC-DMIS® módulo CAD e CAD++ (2015)

Portanto uma estratégia de reconstrução matemática escolhida inadequadamente e sem observação dos aspectos funcionais dos elementos, proporcionará erros inesperados na interpretação dos resultados, possivelmente ocorrerá a aprovação de peças refugadas ou a reprovação de peças aprovadas.

2.3 - CALIBRAÇÃO DE MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Em geral as medidas realizadas em instrumentos de medição de características dimensional, normalmente são relacionadas ao padrão de comprimento, o metro, por meio de uma calibração. Com o surgimento das normas internacionais, nas calibrações, processos e procedimentos usuais de calibração foram adotados, e para garantir a rastreabilidade das medidas, um parâmetro que represente a dispersão dos valores medidos, incerteza de medição, assim como a sua formulação, se faz necessário (SWYT, 2011).

O assunto rastreabilidade na medição por coordenadas, por muitos anos foi motivo de debate, por questões associadas à estimativa da incerteza, devido ao fato de existirem infinitas combinações e geometrias possíveis de se medir e a difícil aplicação nas MMCs. O autor descreve o caminho para a cadeia de rastreabilidade da dimensão medida, que varia desde a medição realizada pela MMC até o padrão de unidade do sistema internacional (SI), o comprimento de onda laser no vácuo, conforme figura 20 (SWYT, 2011).

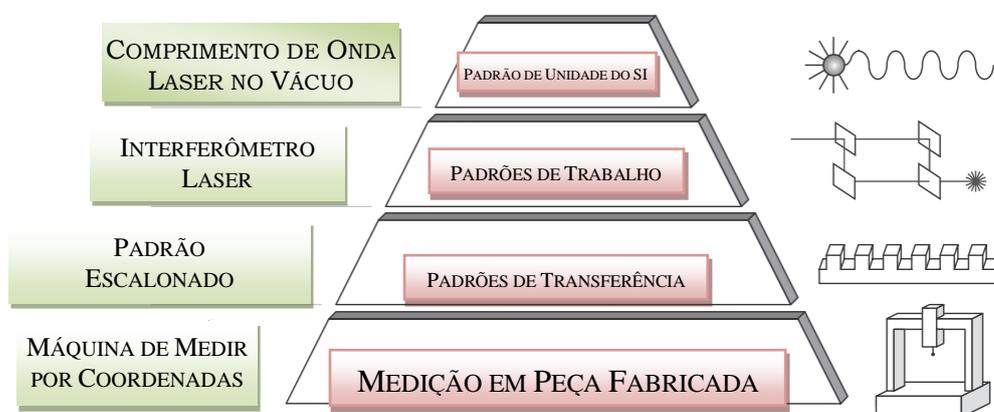


Figura 20 - Pirâmide de rastreabilidade para máquina de medir por coordenadas

Fonte: Adaptado de Swyt (2011)

Segundo Swyt (2011), para solucionar o problema da rastreabilidade nas MMCs, algumas abordagens foram propostas, e são chamadas de abordagem do comparador, testes de desempenho e modelagem matemática.

Na abordagem do comparador, a flexibilidade, que é uma das principais características da MMC é restringida, devido à metodologia que é caracterizada na realização de uma tarefa específica e assim equivale a um instrumento de metrologia convencional. Nesta abordagem, a incerteza de medição da MMC pode ser determinada medindo um artefato padrão calibrado no mesmo local, mesma estratégia, mesma geometria, mesmo material e dimensões da peça a ser medida (PHILLIPS, 1995).

Nos testes de desempenho, a abordagem envolve artefatos especiais, como padrões de comprimento e circularidade calibrados. Estes artefatos são utilizados para verificar o comportamento da MMC durante a execução de tarefas definidas, com a grande vantagem da existência de procedimentos disponíveis em normas técnicas, mas com a desvantagem da possibilidade de superestimar a incerteza, devido ao fato de não se medir tarefas específicas (PHILLIPS, 1995).

Na modelagem matemática, o desenvolvimento de equações que representam o comportamento da MMC e a simulação da medição de diferentes geometrias para estimar a incerteza de medição, caracterizam o método. As MMCs são tratadas como máquinas virtuais de medir, com a vantagem da possibilidade em determinar a incerteza de uma tarefa específica de medição, mas a desvantagem está na exigência de se efetuar uma calibração para determinar todos os erros elementares (CARDOZA, 1995).

Segundo Piratelli Filho (1998), o conhecimento dos erros é essencial para a compressão das fontes geradoras e da variabilidade da MMC, que através de uma calibração é possível determinar os erros geométricos em função das coordenadas de cada um dos eixos da máquina.

A calibração pode ser realizada de forma direta ou indireta. A determinação dos erros geométricos da MMC empregando instrumentos de maior resolução, como um Interferômetro Laser e um nível eletrônico,

caracterizam uma calibração direta, enquanto que a calibração indireta é realizada através do uso de peças padrão de dimensões e erros conhecidos. Este procedimento é mais indicado para inspeção periódica e testes interinos que podem ser realizados pelo próprio usuário da máquina, demandando um menor tempo e baixos custos na execução (DI GIACOMO, 1986).

A calibração direta equivale ao teste de expedição da MMC, executada pelo fabricante. Seu custo é elevado, uma vez que é um procedimento demorado, porém permite a obtenção de uma grande quantidade de informações sobre a MMC (DI GIACOMO, 1986).

Sua realização envolve a determinação dos erros geométricos da MMC empregando instrumentos de maior resolução, como um Interferômetro Laser e um nível eletrônico. Todos os erros geométricos individuais podem ser determinados, como a retitude, os erros de posicionamento e os erros angulares nos três eixos, além dos erros de perpendicularidade entre eixos.

A calibração indireta é um procedimento mais indicado para inspeção periódica e deve ser feita pelo usuário, pois consome um tempo relativamente pequeno para sua realização e apresenta custos menores que os envolvidos na calibração direta. É realizada através do uso de peças padrão, cujas dimensões e erros são conhecidos (DI GIACOMO, 1986).

Na calibração indireta, os erros geométricos podem ser estimados a partir de medidas de um artefato padrão calibrado. Vários padrões têm sido utilizados e descritos na literatura, podendo ser destacado o padrão barra de esferas, o padrão placa de esferas e o padrão escalonado.

De modo a representar o maior número de tarefas que a máquina pode executar, Peggs (1990) recomendou que o padrão utilizado seja o mais complexo possível. Porém, a escolha é normalmente feita considerando outros aspectos relacionados com as tarefas de inspeção, como a facilidade de manuseio e o custo. Vários tipos de padrões foram sugeridos e colocados em uso, podendo ser classificados em função do número de coordenadas espaciais associadas às suas características calibradas, em padrões unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais.

Os padrões unidimensionais permitem a verificação dos erros em uma linha de medição, sendo que os mais comuns são blocos padrões e barras simples. Normalmente os padrões mais utilizados são os padrões escalonados e o de barras de esferas (PEGGS, 1990).

Os padrões bidimensionais permitem a obtenção de informação adicional sobre a máquina, porém tem um custo e um peso maior que os padrões unidimensionais. Entre os mais empregados estão o padrão placa de esferas e o padrão placa de furos (PEGGS, 1990).

Os padrões tridimensionais devem apresentar uma excelente estabilidade dimensional e baixo peso. Mesmo assim, apresentam um custo extremamente elevado, originário de seus aspectos construtivos e de sua calibração (PEGGS, 1990).

A seguir estão descritos alguns dos padrões mais utilizados nas calibrações das MMC disponíveis no mercado.

O padrão Passo-a-Passo consiste de um conjunto de blocos padrões com iguais comprimentos nominais, acoplados a um suporte que os mantém alinhados em uma dada direção. Com isto, cada vez que o padrão é posicionado sobre o desempenho, uma grande quantidade de valores de erros pode ser obtidos a partir das distâncias medidas entre as faces dos blocos padrão. O tempo de posicionamento para verificação dos erros de medição por este método é reduzido em relação à quantidade de erros que podem ser determinados. A figura 21 mostra um modelo de padrão passo-a-passo.

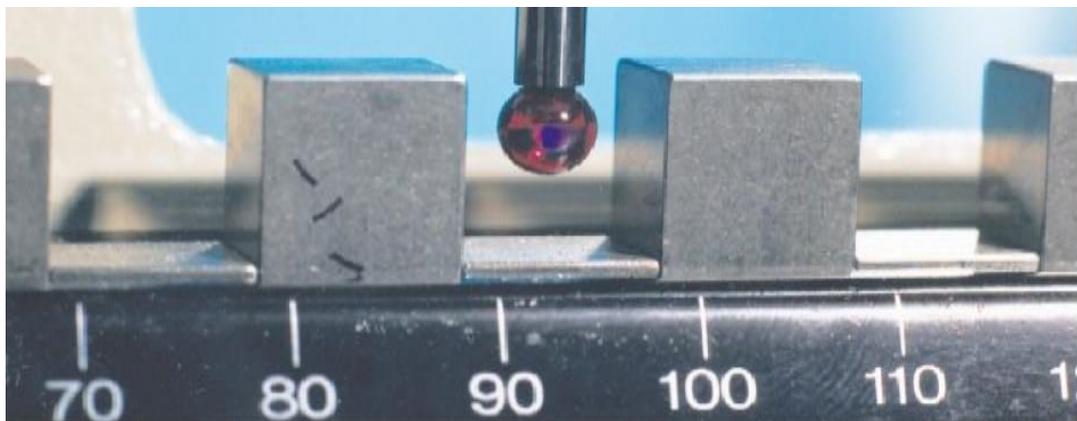


Figura 21 - Padrão passo-a-passo

Fonte: Flack (2011)

A calibração usando o padrão passo-a-passo alinhado com os eixos X, Y e Z possibilita estimar os erros de posicionamento e os erros angulares em cada eixo. Os erros de Roll, Pitch e Yaw são determinados medindo o padrão na direção dos eixos porém com diferentes braços de Abbé. A calibração com o padrão alinhado com a diagonal dos planos formados pelos eixos Xy, Xz e Yz possibilita estimar os erros de perpendicularidade entre eixos e também os erros de retitude. Estes erros não dependem do braço de Abbé presente no local das medidas (KNAPP *et al.*, 1991).

O padrão Circular é utilizado na calibração de MMC através da medição de círculos, é feita tomando como referência um objeto circular, cujo diâmetro e desvio de circularidade sejam conhecidos. Os artefatos padrões que podem ser utilizados são um disco circular, um padrão de esferas, uma barra de esferas com soquetes magnéticos, um anel padrão ou um padrão de círculos (KNAPP *et al.*, 1991).

A figura 22, mostra exemplos de padrão circular muito utilizados na calibração das MMCs.

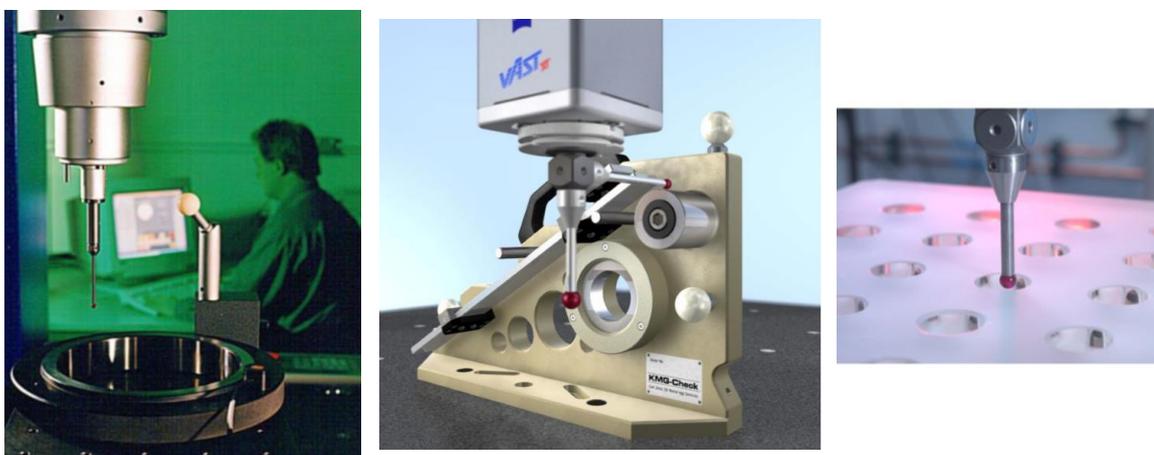


Figura 22 - Padrões - circular

Fonte: Flack (2011)

A determinação dos erros geométricos é feita a partir da distribuição dos pontos medidos, comparados com a geometria ideal do padrão. Desvios em relação ao perfil de um círculo ideal indicam erros de medição, e diferentes figuras são encontradas em função da orientação do padrão (KNAPP *et al.*, 1991).

O padrão Barra de Esferas, como mostrado na figura 23, é o artefato padrão, mais utilizado na verificação do desempenho das MMCs. Este padrão consiste de uma barra rígida com esferas fixadas nas suas extremidades, normalmente a barra é presa a um suporte que permite a variação de ângulo e rotação da barra no volume de medição da MMC.



Figura 23 - Padrão Barra de Esferas

Fonte: Flack (2011)

As vantagens do seu uso estão relacionadas às características como facilidade de manuseio, peso reduzido e baixo custo, que permite rapidez e minimiza procedimentos de calibração. Além disto, pode ser construído pelo próprio usuário de MMC, uma vez que não há necessidade de se usar tamanhos predefinidos. É preciso que o padrão construído seja devidamente calibrado, para determinar a sua dimensão nominal e assim servir de referência para a calibração dos erros da MMC.

Os materiais empregados na construção devem ser escolhidos de forma que a barra apresente uma deflexão muito pequena quando realizar o contato do apalpador com a esfera, quando sob a ação da força da gravidade e quando ocorrer a presença de vibração. Devem ainda apresentar uma pequena dilatação térmica para minimizar o efeito da

variação de temperatura; pequena densidade para proporcionar um reduzido peso e uma elevada resistência a corrosão e a esforços de atrito para proporcionar uma vida mais prolongada. Os polímeros reforçados com fibra de carbono são indicados para fabricação da barra. Estes aspectos foram sugeridos por Phillips (1995), e devem ser observados na construção deste tipo de padrão.

O manuseio de uma barra de esferas deve ser feito sem contato físico direto com a mão do operador. O contato entre peça e operador, proporciona uma transferência indesejada, resultando na dilatação da barra, o que produz erros na avaliação. É desejável a presença de uma proteção com material isolante térmico ao redor da barra, principalmente quando o aço for o material utilizado na fabricação.

De acordo com o modelo construtivo da MMC, algumas alterações podem ser feitas no que tange à utilização do padrão e a sua construção. Nas MMCs com comando numérico, uma das esferas pode ser presa a um soquete magnético acoplado ao desempenho, enquanto a outra fica livre. Esta barra deve ser fixada em diferentes posições no volume de trabalho da MMC, e as medições devem ser feitas segundo uma trajetória circular em diferentes planos, sendo que o apalpador da sonda deve tocar a esfera da extremidade livre em vários pontos (KNAPP *et al*, 1991).

Enquanto que nas máquinas operadas manualmente, as duas esferas da barra de esferas podem ser fixadas em soquetes magnéticos, uma no desempenho e a outra no sistema de sondagem, de forma que a sonda em movimento descreva trajetórias circulares (KNAPP *et al*, 1991).

As barras de esferas com dois soquetes magnéticos podem ser fabricadas através de dois métodos construtivos, sendo uma com comprimento fixo e a outra com comprimento variável da barra, modelo telescópica. Bryan (1984), descreveu os princípios, as aplicações e a metodologia de construção destas barras de esferas.

Este artefato para a calibração das máquinas, recebeu destaque como resultado do trabalho de Bryan (1984), do Lawrence Livermore National Laboratory nos EUA, que originou uma patente americana de um "Telescoping Magnetic Ball Bar Test Gage".

Baseada na patente de Bryan (1984), a Renishaw, uma empresa global e especializada em medição, controle de movimentos, espectroscopia e usinagem de precisão, desenvolveu um sistema de barra de esferas telescópica que consiste essencialmente de um sensor linear telescópico de exatidão extremamente alta, com esferas de precisão em cada extremidade. Neste sistema são empregados suportes magnéticos de precisão, um ajustável fixado à mesa da máquina e o outro na guia ou cabeçote da máquina.

As esferas do sensor estão assentadas cinematicamente em alojamentos magnéticos, e esta disposição permite que a barra de esferas desloque variações mínimas no raio enquanto a máquina segue uma trajetória circular programada ao redor da mesa, conforme mostrado na figura 24. Os dados coletados são enviados a um computador que está equipado com o programa computacional dedicado, que segundo o fabricante, calcula as medidas gerais de posicionamento e desvios circular. Após as medições são gerados relatórios próprios e análises matemáticas não divulgadas, devido ao sigilo industrial, mas com objetivo de diagnosticar muitos erros individuais e adicionais da máquina.



Figura 24 - Padrão barra de esferas telescópica.

Fonte: Renishaw (2015)

O Padrão Placa de Esferas é construído a partir da montagem de um conjunto de esferas em uma placa metálica, como mostrado na figura 25. As dimensões e as distâncias entre os centros das esferas devem

apresentar uma elevada exatidão, pois o seu uso envolve a medição da distância entre os centros das esferas (KNAPP *et al*, 1991).

Um padrão placa de esferas para avaliação de MMC, foi proposto por Trapet & Wäldele (1991). Num esforço para disseminar o uso destes padrões, foi feita uma comparação de calibrações executadas em quinze laboratórios, e a incerteza encontrada foi muito pequena, apesar da reduzida instrução fornecida com relação ao seu manuseio. A limitação do uso destes padrões está associada ao custo elevado de construção e de calibração (KUNZMANN & WÄLDELE, 1995).

Os erros de posição podem ser determinados alinhando este padrão na direção dos eixos. Os erros de retitude são determinados medindo o padrão inclinado de 45 graus em relação aos eixos de coordenadas. Os erros angulares de Pitch e Yaw são determinados medindo o padrão em dois diferentes braços de Abbé. Os erros de Roll são determinados com o padrão inclinado em 45° em relação aos eixos e com diferentes braços de Abbé. Os erros de perpendicularidade são determinados com o padrão inclinado a 45 graus em relação aos eixos (KNAPP *et ali*, 1991).

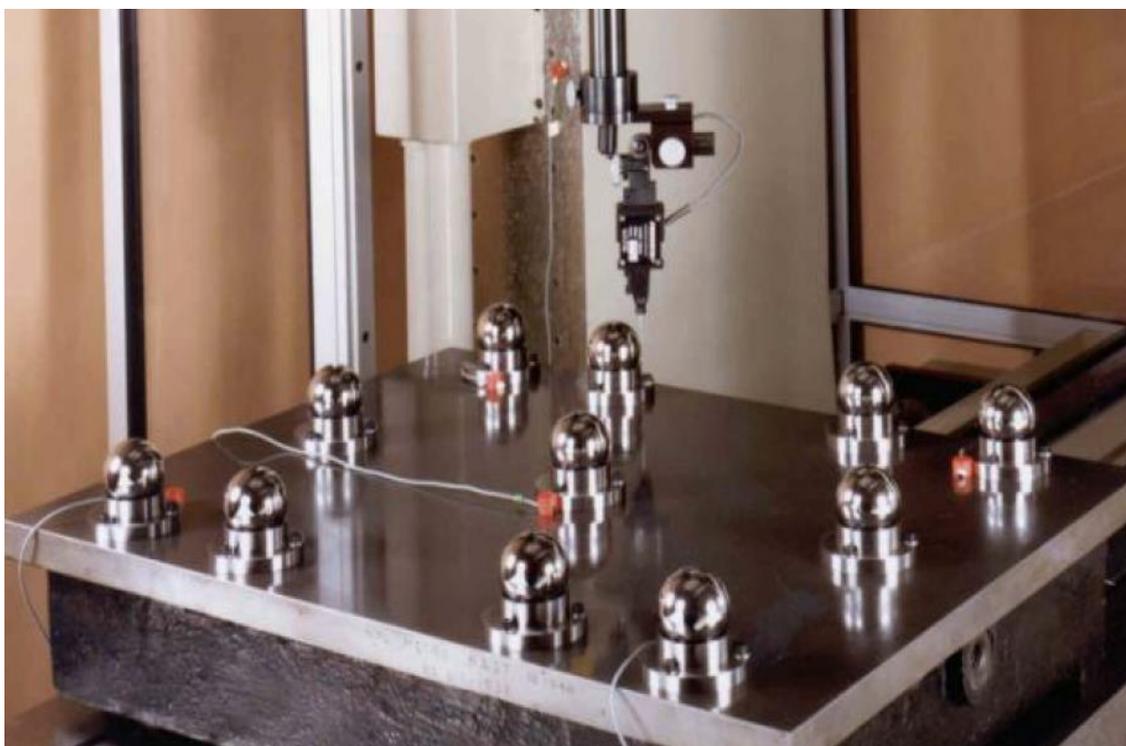


Figura 25 - Padrão placa de esferas.

Fonte: Flack (2011)

O Padrão de Círculos é construído através da usinagem de furos circulares numa placa metálica, como mostrado na figura 26, cuja distância entre centros dos furos é calibrada (KNAPP *et al*, 1991).

A calibração dos erros de posição é realizada orientando o padrão na direção dos eixos de coordenadas da MMC. Os erros de retitude são determinados com o padrão orientado a 45 graus em relação aos eixos. Os erros de Pitch e Yaw são determinados medindo o padrão com dois diferentes desalinhamentos de Abbé, e o erro de Roll com a orientação do padrão a 45 graus em relação aos eixos e diferentes braços de Abbé. Os erros de perpendicularidade são obtidos com o padrão orientado a 45 graus em relação aos eixos (KNAPP *et al*, 1991).

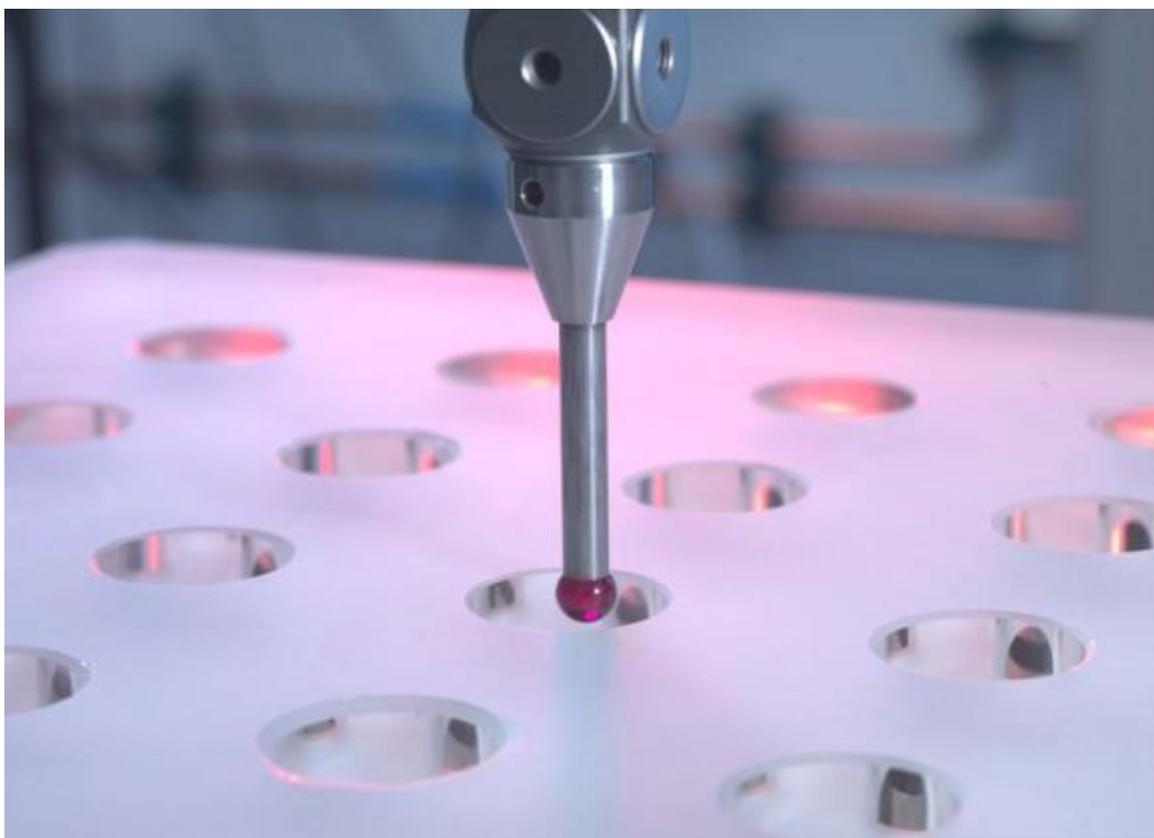


Figura 26 - Padrão placa de furos.

Fonte: Flack (2011)

O Artefato Padrão Volumétrico Tetraédrico, é um padrão tridimensionais que tem sido indicado para a verificação de MMC por vários autores há muito tempo. O interesse na sua utilização se deve à possibilidade de uma avaliação conjunta de vários erros geométricos da

máquina. Porém, apresentam algumas limitações, como o alto custo envolvido na sua construção e calibração, o que torna o seu uso restrito aos casos onde se busca avaliar as condições de medição de peças de geometria complexa (PEGGS, 1990).

A figura 27 mostra um padrão volumétrico tetraédrico, que em sua construção foram utilizadas esferas de cerâmica, hastes de fibra de carbono e alumínio para a união das hastes e suporte para as esferas, com o objetivo de garantir a baixa expansão térmica e a alta rigidez estrutural.



Figura 27 - Artefatos padrão volumétrico tetraédrico.

Fonte: Unimetrik Metrologic and Calibration (2016)

A empresa Unimetrik Metrologic and Calibration comercializa um conjunto para verificação de MMC que contém um programa computacional dedicado à calibração, juntamente com o artefato padrão volumétrico tetraédrico mostrado na figura 27. Esse pacote oferece aos usuários fácil acesso a informações sobre o estado atual das máquinas de medição tridimensional, com interface intuitiva e de fácil manuseio, possibilitando executar verificações da condição atual da máquina diariamente em três

etapas básicas que incluem a medição de seis distâncias, o cálculo automático de erros e ao final a geração de relatórios.

De acordo com a Unimetric, este sistema possibilita ainda o monitoramento e o comportamento a longo prazo da máquina, a capacidade de analisar incidentes em seu ambiente de medição e avaliar as capacidades da máquina de medição por coordenadas.

O fabricante Renishaw também comercializa um kit de verificação rápida denominado de Padrão para Verificação de Máquinas (MCG) para o monitoramento do desempenho de MMCs. Segundo o fabricante, o padrão de verificação de máquinas realiza a verificação da exatidão volumétrica da MMC, e o método está em conformidade com a norma ISO 10360-2 (2001). Ainda há a afirmação de que os resultados obtidos asseguram que as medições realizadas pela MMC são exatas, ou fornecem evidência conclusiva de que é necessária uma manutenção ou recalibração. O processo é rápido, e o padrão possui uma série de colunas e braços com diversas alturas e comprimentos conforme a figura 28, que permitem que a exatidão volumétrica de MMCs grandes e pequenas possa ser verificada pelo próprio operador. A maior desvantagem se concentra no alto custo deste conjunto de calibração.

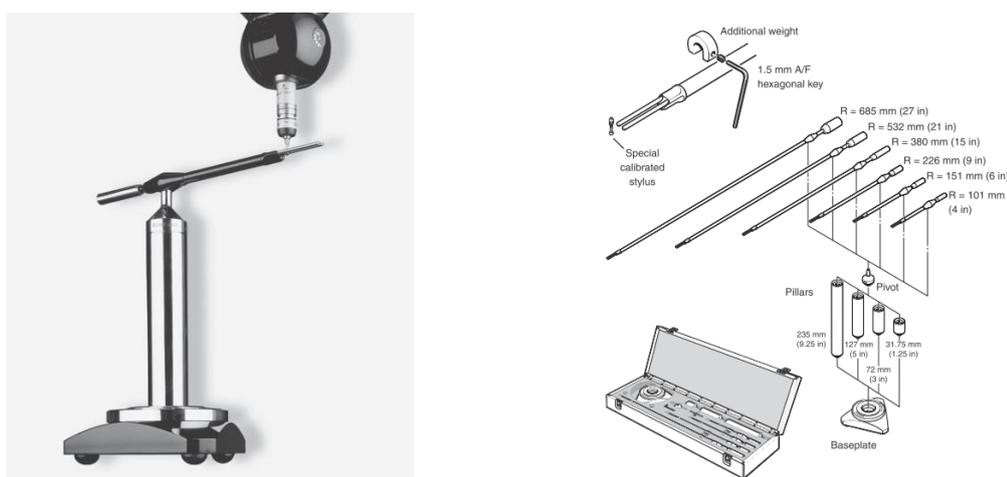


Figura 28 - Padrão para verificação de máquinas (MCG) para o monitoramento do desempenho de MMCs.

Fonte: Renishaw (2015)

A literatura descreve a aplicação de uma grande variedade de padrões utilizados na calibração indireta, com destaque para o padrão barra de

esferas, o padrão placa de esferas e o padrão passo-a-passo. Os testes executados de acordo com um procedimento definido por alguma norma reconhecida, como ISO, ASME ou VDI/VDE, através do uso dos padrões barras com esferas nas extremidades, placas de esferas e o padrão passo-a-passo é um reconhecido procedimento e essencial, mas pode consumir muito tempo e ser dispendioso.

A confiabilidade das medições deve ser mantida durante todo o período entre uma calibração e outra, o que proporciona atender as demandas de qualidade e tolerâncias das dimensões de peças, impostas pelo projeto mecânico. Devido a essa necessidade da qualidade dos resultados obtidos e desempenho das máquinas de medir por coordenadas, a norma ISO 10360-2 (2001), recomenda fortemente que sejam realizadas verificações periódicas, também chamadas de testes interinos ou testes intercalares.

O intervalo entre as verificações deve ser determinado a partir das condições ambientais e do desempenho de medição exigido, ou também conforme a norma ISO/TS 15530 - 3 (2011) que recomenda verificações semanalmente. A aplicação de um teste interino nas MMC também é recomendado imediatamente após qualquer evento significativo, como uma colisão ou outro acidente que possa ter afetado o desempenho máquina.

A realização de um teste interino é recomendado imediatamente após a máquina ter sido submetida a uma calibração periódica completa, ou a um teste de verificação de desempenho ou até mesmo após a calibração para liberação da máquina pelo fabricante, nos caso de equipamentos novos. As dimensões, orientações e posição dos artefatos devem ser registradas para posteriormente serem repetidas.

A norma ISO 10360-2 (2001) faz uma recomendação nas escolhas das dimensões características dos artefatos padrão, os quais podem ser uma placa de esferas, uma placa de furos, uma barra de esferas, uma barra de furos, enquanto que a norma ISO/TS 15530 - 3 (2011) faz menção a respeito da utilização de peça de trabalho calibradas ou padrões calibrados para calibração de MMC.

Caskey, Phillips e Borchardt (1997), utilizaram uma placa de esferas que segundo os autores, pode ser um artefato padrão utilizado na realização de testes interinos mais abrangentes em MMC. O artefato é normalmente utilizado para a calibração completa da máquina, e é composto por uma placa de base em aço carbono medindo 240 mm por 240 mm com dezesseis esferas padrão de 25,4 mm cada, posicionadas a uma distância nominal de 80 mm entre si, formando quatro linhas e quatro colunas. A figura 29 mostra a disposição das esferas e seus respectivos erros de posição.

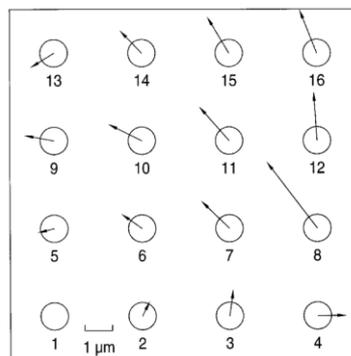


Figura 29 - Representação gráfica dos desvios de posição dos centros das esferas.

Fonte: Caskey; Phillips; Borchardt (1997)

O MSA, Análise dos Sistemas de Medição é um manual de referência desenvolvido por um grupo de trabalho autorizado pela força tarefa das empresas Chrysler/Ford e General Motors que surgiu na atmosfera das indústrias automotivas americanas em 1990, e a AIAG (Grupo de Ação da Indústria Automobilística) é o órgão responsável por regulamentar e realizar sua distribuição. Este manual apresenta diretrizes capazes de avaliar um Sistema de Medição direcionado às indústrias automobilísticas, mas com diretrizes genéricas, o que o tornou uma ferramenta muito aplicada para a obtenção da garantia da qualidade dos dados coletados nas medições e na garantia da confiabilidade metrológica nos mais variados seguimentos industriais. Em 2010 foi disponibilizado a quarta edição deste manual, e que atualmente é amplamente aplicado para a análise dos mais variados setores produtivos e processos de medição, dentre estes, a medição por coordenadas (MSA, 2010).

As diretrizes para análise de desempenho de um Sistema de Medição propostas pelo MSA produzem resultados capazes de auxiliar uma possível tomada de decisão quanto à continuidade operacional ou pela interdição da máquina para uma nova calibração e ou correção das falhas. O manual ilustra através da figura 30 a sequência para efetuar uma análise de um Sistema de Medição.



Figura 30 - Análise de um Sistema de Medição

Fonte: Adaptado de MSA (2010)

Dentre os vários estudos de análises dos sistemas de medição propostos pelo MSA, é pertinente ao atual trabalho o destaque para os estudos de Sistema de Medição por variável com abordagem no estudo da análise de variância (ANOVA). Este tem como objetivo de monitorar a influência das variáveis peça, que é o artefato padrão utilizado para a realização dos ensaios práticos, a repetibilidade, a reprodutibilidade, além do teste de hipótese para comparação de médias.

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia – VIM - INMETRO (2012), uma condição de repetibilidade de medição é caracterizado quando em um processo estão mantidos os mesmos operadores, os mesmos critérios de medição, o mesmo Sistema de Medição, as mesmas condições ambientais de operação como temperatura e umidade, bem como o mesmo local. As medições devem ser repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo. Enquanto que a condição de reprodutibilidade de medição é descrita a realização do processo de medição em diferentes locais, com a utilização diferentes operadores, podendo utilizar diferentes sistemas de medição, quando o objetivo é avaliá-los, mas a condição a ser mantida, é que as medições sejam repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares.

Nas diretrizes propostas pelo MSA, está descrito o estudo da repetibilidade e reprodutibilidade R&R. Através deste estudo é possível

investigar a variabilidade do Sistema de Medição e quais variáveis influenciam no processo da variabilidade, seja ela causada pelas diferenças entre operadores ou discriminada pela diferença entre as peças medidas. Este estudo é uma ferramenta da Engenharia da Qualidade usada na análise dos mais variados sistemas de medição, medindo amostras repetidas vezes.

Para realização deste estudo, o método mais utilizado é a análise de variância (ANOVA). Através deste método é possível decompor a variabilidade do Sistema de Medição e avaliar a interação entre as componentes responsáveis pela variabilidade. Um valor estimado da variabilidade do Sistema de Medição é obtido devido a variância do erro aleatório, relacionados as réplicas das medições. O erro de medição pode ser decomposto em três variáveis. O erro derivado da dispersão gerada pelo instrumento, pelas consequências promovidas pelo avaliador e por fim o erro aleatório relacionado às repetidas medições de peças. Para o estudo de R&R é sugerido um número mínimo de dez peças e dois operadores, com no mínimo de três réplicas para cada peça (MSA, 2010).

De acordo com Automotive Industry Action Group - AIAG, a variação do Sistema de Medição pode ser classificada em três níveis de aceitação ou rejeição, conforme o percentual de contribuição do estudo R&R na variabilidade do Sistema de Medição (MSA, 2010).

A tabela 2 apresenta esses três níveis, relacionando os percentis do estudo R&R aos graus de aceitabilidade do sistema.

Tabela 2 - Tipos de estruturas de MMC.

Fonte: MSA (2010).

PERCENTUAL DA VARIÇÃO DO PROCESSO	ACEITABILIDADE
Menos de 10%	O Sistema de Medição é aceitável
Entre 10% e 30%	O Sistema de Medição é aceitável dependendo da aplicação, o custo do dispositivo de medição, custo do reparo ou outros fatores.
Maior que 30%	O Sistema de Medição não é aceitável e deve ser aprimorado.

CAPÍTULO 3

ASPECTOS TEÓRICOS E FUNDAMENTAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

São apresentados neste capítulo fundamentos teóricos da matemática utilizada para realização das análises das variáveis escolhidas, e para o entendimento de suas respectivas contribuições na variabilidade do Sistema de Medição da Máquina de Medir por Coordenadas. Também estão introduzidas as ferramentas estatísticas para análise de variância aplicadas aos dados coletados para a devida apresentação dos resultados, e a técnica adotada para os arranjos experimentais.

3.1 CONCEITOS TEÓRICOS FUNDAMENTAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM MMC

O conhecimento da distribuição normal de probabilidades para distribuições amostrais é essencial para a compreensão dos critérios de formulação do estudo proposto.

Para uma medição realizada em um determinado período de tempo será caracterizado como uma amostra e os resultados de todas as medições possíveis de serem realizadas com o instrumento será a população.

3.2 – DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A curva de uma distribuição normal de probabilidades tem a aparência visual de forma de sino, e simétrica em relação à média conforme a figura 31. Esta curva pode ser descrita matematicamente através da expressão 1, onde a função $f(x)$ corresponde à função densidade de probabilidade, o valor μ corresponde à média e o valor σ corresponde ao desvio padrão da distribuição (MONTEGOMERY, 2004)

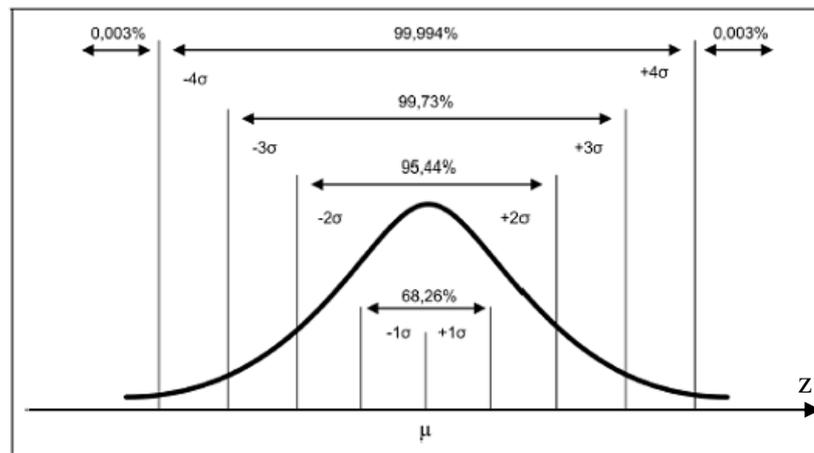


Figura 31 - Curva de distribuição normal de probabilidades.

Fonte: Portal Action (2015)

Para as comparações entre duas curvas de distribuições normais e para fins de tabelamento das probabilidades, foi desenvolvida a distribuição normal de probabilidades. Esta distribuição apresenta média $\mu = 0$, e desvio padrão $\sigma = 1$, e foi obtida através de uma transformação denominada pela letra Z e calculada pela expressão 2.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

$$z_i = \frac{y_i - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

Para o cálculo desta distribuição com população de tamanho N é necessário o conhecimento da média μ e do desvio padrão σ . No caso de populações finitas, as expressões 3 e 4 podem ser utilizadas para o cálculo estatístico.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$$

(3)

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

(4)

Os parâmetros populacionais μ e σ normalmente não podem ser determinados diretamente a partir de uma medição. Mas estes valores podem ser estimados com base nos parâmetros em que a média amostral \bar{x} é simplesmente a média aritmética das n observações, e o desvio padrão amostral é a raiz quadrada da soma dos quadrados dos desvios relacionados à média amostral, tudo dividido pelo N , número de amostras menos 1, conforme as expressões 5 e 6. Geralmente, quanto maior o desvio padrão, maior a variabilidade dos dados da amostra em torno da média (MONTEGOMERY, 2004; DIETRICH, 1973)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

(5)

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

(6)

Em posse dos parâmetros da distribuição, a probabilidade de encontrar valores contidos entre dois pontos quaisquer no eixo das abscissas pode ser calculada e corresponde à área sob a curva. A área no intervalo entre $\mu \pm 1\sigma$ equivale a uma probabilidade de 68,26%, entre $\mu \pm 2\sigma$ equivale a 95,45 % e entre $\mu \pm 3\sigma$ equivale a 99,73%.

Inicialmente a análise gráfica dos resultados através da construção de histogramas deve ser preconizada, o que fornece evidências a respeito do

comportamento dos resultados. É possível visualizar o formato físico da distribuição, a disposição da média, a dispersão e as tendências verificadas em torno do valor médio.

Antes de aplicar quaisquer técnicas estatísticas, mesmo que considerada uma distribuição normal para os valores medidos, testes de aderência, como o teste do Qui-quadrado (χ^2) ou Anderson – Darling são fundamentais para verificação de teste de hipóteses para a normalidade da distribuição. Enquanto que nos casos de ausência de normalidade na distribuição, equações matemáticas podem ser aplicadas afim de convergir os dados a uma distribuição normal (MONTGOMERY, 2004).

A distribuição das variâncias amostrais está relacionada à família de distribuições de probabilidade da estatística Qui-quadrado (χ^2), apresentada pela expressão 7. Nesta equação, y_i são valores aleatórios extraídos independentemente de uma população com distribuição normal de média μ e desvio padrão σ .

$$\chi_v^2 = \sum_{i=1}^v \left(\frac{y_i - \mu}{\sigma} \right)^2 = \sum_{i=1}^v z_i^2 \quad (7)$$

3.3 – LIMITES DE TOLERÂNCIA DO ARTEFATO PADRÃO

O trabalho propõe como artefato padrão para a realização dos testes interinos de avaliação de desempenho de MMC, uma peça de trabalho. Esta peça tem como característica, simular várias peças fabricadas pelo processo de fabricação da própria empresa. A peça padrão utilizada neste trabalho, foi confeccionada no Laboratório de Máquinas e Ferramentas – LAMAFE, na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. O material utilizado na confecção da peça padrão foi o aço inoxidável AISI 304, disponível em chapa.

O processo de fabricação envolveu inicialmente o corte da chapa no tamanho aproximado da peça que, posteriormente passou pelo processo de furação, afim de possibilitar a fixação da peça no torno mecânico, para torná-la cilíndrica. A etapa que sucedeu o torneamento, foi o processo de

fresamento das faces, transformando o cilindro em uma geometria prismática dodecagonal, ou seja, doze faces igualmente distribuídas a 30 graus entre si. Como o processo de fresamento deixa um possível erro de planeza na superfície, as faces fresadas foram submetidas ao processo de lapidação, a fim de minimizar esse erro. Por fim o aspecto físico foi garantido com o processo de polimento.

Nos problemas práticos, em sua maioria, os parâmetros a respeito da distribuição são desconhecidos, mas podem ser estimados a partir de dados extraídos das estatísticas amostrais. A partir de uma variável x de distribuição normal com média μ e variância σ^2 , ambas desconhecidas, é possível através de uma amostra de n observações calcular a média amostral \bar{x} e a variância amostral S^2 , intuitivamente para estimar os limites naturais de tolerância basta trocar μ e σ por \bar{x} e S , conforme expressão 8. Segundo Motgomery (2004), como os valores de \bar{x} e S não são os valores verdadeiros e sim estimativas, não é conveniente afirmar que o intervalo da expressão 8 contemple $100(1-\alpha)\%$ da distribuição.

$$\bar{x} \pm z_{\alpha/2}S \quad (8)$$

Como foi construído apenas uma peça padrão, a aplicação da expressão 7 se torna inviável para definição dos limites de tolerância, por não possuir um lote de peças, os parâmetros de média e desvio padrão não estão disponíveis. Portanto, a tolerância adotada para as dimensões lineares foi em função do processo de fabricação envolvido na construção deste artefato. Todos os processos de fabricação empregado na construção do artefato foram nos moldes convencionais, e conforme a ASME B24.2 (1995), os Índices de Tolerâncias (IT) ISO podem ser classificados de acordo com esses processos. A Tabela 3 mostra a classificação do IT em função dos processos de fabricação convencional.

Tabela 3 – Classificação do IT em função dos processos de fabricação convencionais.

Fonte: ASME B4.2 (2009)

PROCESSOS	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11
Lapidação	x	x						
Retificação Cilíndrica		x	x	x				
Retificação Plana		x	x	x	x			
Torneamento com diamante		x	x	x				
Alargamento com diamante		x	x	x				
Brochamento		x	x	x	x			
Metalurgia do pó			x	x	x			
Alargamento			x	x	x	x	x	
Torneamento				x	x	x	x	x
Sinterização				x	x	x	x	
Mandrilamento				x	x	x	x	x
Fresamento							x	x
Aplainamento							x	x
Furação com Broca							x	x
Corte com punção							x	x
Fundição sob pressão								x

A tabela 3 de processos possibilita a adequação do IT conforme o processo de fabricação, mas somente essa informação não é suficiente para definir a tolerância da peça fabricada. Como a tolerância está relacionada diretamente com a dimensão da peça, é necessário relacionar a dimensão adotada com IT o desejado. A tabela 4 apresenta as tolerâncias fundamentais para cada grupo de dimensões, relacionados aos Índices de Tolerâncias e os respectivos valores da tolerância, extraído da Norma ABNT – NBR-6158 (1995).

Tabela 4 – Tolerâncias Fundamentais.

Fonte: ABNT - NBR - 6158

Grupo de Dimensões (mm)		Qualidade (IT) (µm)								
De	até (incl.)	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14
0	3	6	10	14	25	40	60	100	140	250
3	6	8	12	18	30	48	75	120	180	300
6	10	9	15	22	36	58	90	150	220	360
10	18	11	18	27	43	70	110	180	270	430
18	30	13	21	33	52	84	130	210	330	520
30	50	16	25	39	62	100	160	250	390	620
50	80	19	30	46	74	120	190	300	460	740
80	120	22	35	54	87	140	220	350	540	870
120	180	25	40	63	100	160	250	400	630	1000
180	250	29	46	72	115	185	290	460	720	1150
250	315	32	52	81	130	210	320	520	810	1300
315	400	36	57	89	140	230	360	570	890	1400
400	500	40	63	97	155	250	400	630	970	1550

3.4 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA

A análise de variância é uma técnica estatística empregada para comparar várias médias, oriundas de diferentes amostras. Quando se deseja determinar se a diferença observada entre as médias amostrais é devida, apenas, às variações aleatórias de uma amostra a outra, ou se os dados vêm de populações onde as médias são verdadeiramente diferentes. Esta análise permite descobrir se a diferença entre as médias são ou não estatisticamente diferentes. Por fim, mesmo que se conclua que as médias são diferentes, é necessário também, decidir se essas diferenças são o suficiente para poderem ser consideradas importantes.

Na figura 32 está apresentado um exemplo com os ensaios 1, 2 e 3 onde os grupos A e B apresentam a mesma média amostral, porém, diferem em termos de variabilidade, portanto em dispersão, ou seja, em variância de cada amostra.

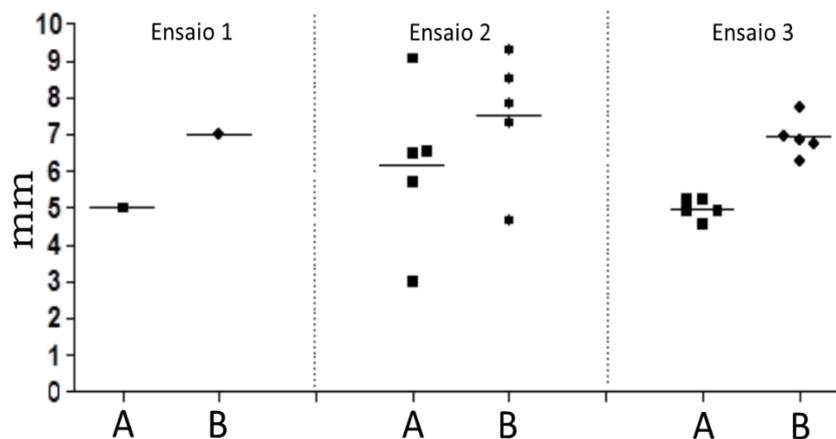


Figura 32- Amostras de médias iguais e desvio padrão diferente

A análise gráfica da figura 32 demonstra que no ensaio 1, as duas médias A e B são diferentes, inclusive é possível concluir que numericamente elas se diferem. No caso do ensaio 2, as mesmas duas médias de A e de B possuem valores bem dispersos, portanto, infere que a diferença não é estatisticamente significativa, devido à dispersão não apresentar diferença muito convincente. Enquanto que no ensaio 3, para as mesmas médias A e B, os valores se mostraram bem concentrados

próximo ao valor médio, apresentando assim, uma diferença estatisticamente significativa.

A maior dificuldade é como definir quando as médias são diferentes, em relação à dispersão dos valores em cada grupo, a fim de concluir se há diferença estatisticamente significativa entre as médias. Primeiramente é descobrir um modo de avaliar e medir numericamente o quão as médias são diferentes e quanto cada observação se afasta ou se dispersa de suas respectivas médias. Em poder destes dados, é possível avaliar se as médias diferem significativamente ou não.

Em um estudo clássico da análise de variância, há o envolvimento dois fatores. Estes fatores são denominados como fator (A) e o outro fator como avaliador (A). Um modelo matemático que representa a contribuição de cada variável do experimento para a variável resposta pode ser estabelecido de uma forma genérica. A equação 9 apresenta este modelo, onde y_{ijl} é a resposta observada, μ é o efeito médio global, τ_i é o efeito do i -ésimo nível da variável A, β_j é o efeito do j -ésimo nível da variável B, $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre τ_i e β_j , e ε_{ijl} é a componente de erro aleatório presente nos resultados (MONTGOMERY, 2004).

$$y_{ijl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijl} \quad \begin{cases} i=1,2,\dots,s \\ j=1,2,\dots,r \\ l=1,2,\dots,t \end{cases} \quad (9)$$

A aplicação da ANOVA envolve o desmembramento da variância dos resultados obtidos (s^2) em estimativas das variâncias entre amostras (s^2_{entre}) e dentro das amostras (s^2_{dentro}).

De maneira similar à expressão 6, a expressão do cálculo da variância de um conjunto de resultados experimentais (s^2) envolve a razão entre a soma do quadrado dos desvios de cada valor em relação à média \bar{y} de todos os dados (SQT) e o número total de graus de liberdade (GLT).

A equação 10 apresenta a expressão para determinação da soma de quadrados total (SQT), enquanto que a equação 11 mostra a expressão para determinação da variância total dos dados. O número de graus de liberdade

total (GLT), associado à variância (s^2), é calculado pelo total de elementos de todas as amostras menos um ($n-1$), devido à restrição imposta pelo cálculo da média \bar{y} , que acarreta a perda de um grau de liberdade.

$$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (10)$$

$$S_{n-1}^2 = \frac{SQT}{GLT} \quad (11)$$

Para um melhor entendimento da ANOVA, foi conduzido o experimento referente à verificação do fator posição e está em conformidade com o planejamento deste trabalho e os resultados apresentados no capítulo 6.

Os procedimentos e passos adotados nestas análises, estão em conformidade com as técnicas de estatística aplicada a engenharia demonstradas por Gonçalves Filho e Tsunaki (2012).

Neste desenvolvimento da ANOVA, há o envolvimento de três fatores. Estes fatores são denominados como fator peça (τ), fator posição (β), e por fim o fator repetibilidade representado por (γ). A partir do modelo clássico de erro apresentado na expressão 9, o modelo desenvolvido para esta aplicação segue as mesmas diretrizes e está apresentado na expressão 12.

$$y_{ijl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_l + \varepsilon_{ijl} \quad \begin{cases} i=1,2,\dots,s \\ j=1,2,\dots,r \\ l=1,2,\dots,t \end{cases} \quad (12)$$

A tabela 5 apresenta o arranjo experimental para realização do estudo da análise de variância para medições realizadas em três posições da MMC. Foi adotado o índice (i) para representar o número de repetições que a peça foi medida, que variou de 1 até s , para $s = 3$, (j) para representar a quantidade de peças medidas no ensaio, variando de 1 até r , para $r = 12$, e por fim (l), para indicar o número de posições em que a peça foi medida, que variou de 1 até t , para $t = 3$, dentro do volume alcançado pela máquina

Tabela 5 – Arranjo experimental para ANOVA de três posições, para a variável posição

Valores das Medições $y_{i,j,l}$		Posição i ($i=1,2,3$)			
		Posição 1	Posição 2	Posição 3	
Repetição ($l = 1,2,3$)	Repetição $i = 1$	Peça 01	$y_{1,1,1}$	$y_{2,1,1}$	$y_{3,1,1}$
		Peça 02	$y_{1,2,1}$	$y_{2,2,1}$	$y_{3,2,1}$
		Peça 03	$y_{1,3,1}$	$y_{2,3,1}$	$y_{3,3,1}$
		Peça 04	$y_{1,4,1}$	$y_{2,4,1}$	$y_{3,4,1}$
		Peça 05	$y_{1,5,1}$	$y_{2,5,1}$	$y_{3,5,1}$
		Peça 06	$y_{1,6,1}$	$y_{2,6,1}$	$y_{3,6,1}$
		Peça 07	$y_{1,7,1}$	$y_{2,7,1}$	$y_{3,7,1}$
		Peça 08	$y_{1,8,1}$	$y_{2,8,1}$	$y_{3,8,1}$
		Peça 09	$y_{1,9,1}$	$y_{2,9,1}$	$y_{3,9,1}$
		Peça 10	$y_{1,10,1}$	$y_{2,10,1}$	$y_{3,10,1}$
		Peça 11	$y_{1,11,1}$	$y_{2,11,1}$	$y_{3,11,1}$
		Peça 12	$x_{1,12,1}$	$x_{2,12,1}$	$x_{3,12,1}$
	Repetição $i = 2$	Peça 01	$y_{1,1,2}$	$y_{2,1,2}$	$y_{3,1,2}$
		Peça 02	$y_{1,2,2}$	$y_{2,2,2}$	$y_{3,2,2}$
		Peça 03	$y_{1,3,2}$	$y_{2,3,2}$	$y_{3,3,2}$
		Peça 04	$y_{1,4,2}$	$y_{2,4,2}$	$y_{3,4,2}$
		Peça 05	$y_{1,5,2}$	$y_{2,5,2}$	$y_{3,5,2}$
		Peça 06	$y_{1,6,2}$	$y_{2,6,2}$	$y_{3,6,2}$
		Peça 07	$y_{1,7,2}$	$y_{2,7,2}$	$y_{3,7,2}$
		Peça 08	$y_{1,8,2}$	$y_{2,8,2}$	$y_{3,8,2}$
		Peça 09	$y_{1,9,2}$	$y_{2,9,2}$	$y_{3,9,2}$
		Peça 10	$y_{1,10,2}$	$y_{2,10,2}$	$y_{3,10,2}$
		Peça 11	$y_{1,11,2}$	$y_{2,11,2}$	$y_{3,11,2}$
		Peça 12	$x_{1,12,2}$	$x_{2,12,2}$	$x_{3,12,2}$
	Repetição $i = 3$	Peça 01	$y_{1,1,3}$	$y_{2,1,3}$	$y_{3,1,3}$
		Peça 02	$y_{1,2,3}$	$y_{2,2,3}$	$y_{3,2,3}$
		Peça 03	$y_{1,3,3}$	$y_{2,3,3}$	$y_{3,3,3}$
		Peça 04	$y_{1,4,3}$	$y_{2,4,3}$	$y_{3,4,3}$
		Peça 05	$y_{1,5,3}$	$y_{2,5,3}$	$y_{3,5,3}$
		Peça 06	$y_{1,6,3}$	$y_{2,6,3}$	$y_{3,6,3}$
		Peça 07	$y_{1,7,3}$	$y_{2,7,3}$	$y_{3,7,3}$
		Peça 08	$y_{1,8,3}$	$y_{2,8,3}$	$y_{3,8,3}$
		Peça 09	$y_{1,9,3}$	$y_{2,9,3}$	$y_{3,9,3}$
		Peça 10	$y_{1,10,3}$	$y_{2,10,3}$	$y_{3,10,3}$
		Peça 11	$y_{1,11,3}$	$y_{2,11,3}$	$y_{3,11,3}$
		Peça 12	$x_{1,12,3}$	$x_{2,12,3}$	$x_{3,12,3}$

O procedimento ANOVA se baseia na determinação da variabilidade total dos dados, na variabilidade dentro dos grupos e na variabilidade entre os grupos, ou seja, as médias dos grupos. A variabilidade total, denominada soma de quadrados total (SQT), da repetição (i), da peça (j) e da posição (l) é dada pela expressão 13.

$$SQT = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t (y_{ijl} - \bar{y})^2 \quad (13)$$

Onde,

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}}{N} \text{ é a média geral, e } N \text{ é o número total de elementos}$$

da amostra escolhida, portanto $N = s.r.t$

Abaixo segue a expansão da equação 13.

$$\begin{aligned} SQT &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t (y_{ijl} - \bar{y})^2 \\ SQT &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t (y_{ijl}^2 + \bar{y}^2 - 2.y_{ijl}.\bar{y}) \\ SQT &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}^2 + \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t \bar{y}^2 - \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t 2.y_{ijl}.\bar{y} \\ SQT &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}^2 + s.r.t.\bar{y}^2 - 2.\bar{y} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl} \\ SQT &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}^2 + s.r.t. \left[\frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}}{N} \right]^2 - 2. \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}}{N} \cdot \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl} \\ SQT &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}^2 + s.r.t. \left[\frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}}{N} \right]^2 - 2. \left[\frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}}{N} \right]^2 \\ SQT &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl} \right]^2}{s.r.t} \\ SQT &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl} \right]^2}{N} \end{aligned}$$

Através da ANOVA é possível descobrir se cada variável é ou não significativa na variabilidade do Sistema de Medição, fazendo também a soma dos quadrados de cada variável. Para a variável posição ($SQ_{Posição}$), é calculado a partir da soma dos quadrados da média do grupo das posições em relação à média global, como demonstrado na expressão 14. Os valores medidos para os cálculos dos somatórios na posição 1, 2 e 3, respectivamente, estão representadas pelos dados sob os retângulos azul, verde e amarelo da tabela 5.

$$SQ_{Posição} = r.t. \sum_{i=1}^s (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2 \quad (14)$$

$$\text{Onde } \bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}}{r.t}$$

$$SQ_{Posição} = r.t. \sum_{i=1}^s (\bar{y}_i^2 + \bar{\bar{y}}^2 - 2. \bar{y}_i \cdot \bar{\bar{y}})$$

$$SQ_{Posição} = r.t. \sum_{i=1}^s \bar{y}_i^2 + r.t. \sum_{i=1}^s \bar{\bar{y}}^2 - r.t. \sum_{i=1}^s 2. \bar{y}_i \cdot \bar{\bar{y}}$$

$$SQ_{Posição} = r.t. \sum_{i=1}^s \bar{y}_i^2 + s.r.t. \bar{\bar{y}}^2 - r.t. 2. \bar{\bar{y}} \sum_{i=1}^s \bar{y}_i$$

$$\text{mas } \sum_{i=1}^s \bar{y}_i = s. \bar{\bar{y}}$$

$$SQ_{Posição} = r.t. \sum_{i=1}^s \bar{y}_i^2 + s.r.t. \bar{\bar{y}}^2 - s.r.t. 2. \bar{\bar{y}}^2$$

$$SQ_{Posição} = r.t. \sum_{i=1}^s \bar{y}_i^2 - s.r.t. \bar{\bar{y}}^2$$

$$SQ_{Posição} = r.t. \sum_{i=1}^s \left(\frac{\sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl}}{r.t} \right)^2 - s.r.t. \bar{\bar{y}}^2$$

$$SQ_{Posição} = \frac{1}{r.t} \sum_{i=1}^s \left(\sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl} \right)^2 - \frac{1}{N} \cdot \left(\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl} \right)^2$$

A tabela 6 apresenta o arranjo experimental para realização do estudo da análise de variância para medições realizadas em três posições da MMC, direcionado o desenvolvimento da soma dos quadrados da variável repetição denotado pelo índice (j) variando de 1 até s , para $s = 3$, denominado de $SQ_{Repetibilidade}$.

Tabela 6 – Arranjo experimental para ANOVA das três posições, para a variável repetição

Valores das Medições $y_{i,j,l}$		Posição i ($i=1,2,3$)			
		Posição 1	Posição 2	Posição 3	
Repetição ($l = 1,2,3$)	Repetição $i = 1$	Peça 01	$y_{1,1,1}$	$y_{2,1,1}$	$y_{3,1,1}$
		Peça 02	$y_{1,2,1}$	$y_{2,2,1}$	$y_{3,2,1}$
		Peça 03	$y_{1,3,1}$	$y_{2,3,1}$	$y_{3,3,1}$
		Peça 04	$y_{1,4,1}$	$y_{2,4,1}$	$y_{3,4,1}$
		Peça 05	$y_{1,5,1}$	$y_{2,5,1}$	$y_{3,5,1}$
		Peça 06	$y_{1,6,1}$	$y_{2,6,1}$	$y_{3,6,1}$
		Peça 07	$y_{1,7,1}$	$y_{2,7,1}$	$y_{3,7,1}$
		Peça 08	$y_{1,8,1}$	$y_{2,8,1}$	$y_{3,8,1}$
		Peça 09	$y_{1,9,1}$	$y_{2,9,1}$	$y_{3,9,1}$
		Peça 10	$y_{1,10,1}$	$y_{2,10,1}$	$y_{3,10,1}$
		Peça 11	$y_{1,11,1}$	$y_{2,11,1}$	$y_{3,11,1}$
		Peça 12	$x_{1,12,1}$	$x_{2,12,1}$	$x_{3,12,1}$
	Repetição $i = 2$	Peça 01	$y_{1,1,2}$	$y_{2,1,2}$	$y_{3,1,2}$
		Peça 02	$y_{1,2,2}$	$y_{2,2,2}$	$y_{3,2,2}$
		Peça 03	$y_{1,3,2}$	$y_{2,3,2}$	$y_{3,3,2}$
		Peça 04	$y_{1,4,2}$	$y_{2,4,2}$	$y_{3,4,2}$
		Peça 05	$y_{1,5,2}$	$y_{2,5,2}$	$y_{3,5,2}$
		Peça 06	$y_{1,6,2}$	$y_{2,6,2}$	$y_{3,6,2}$
		Peça 07	$y_{1,7,2}$	$y_{2,7,2}$	$y_{3,7,2}$
		Peça 08	$y_{1,8,2}$	$y_{2,8,2}$	$y_{3,8,2}$
		Peça 09	$y_{1,9,2}$	$y_{2,9,2}$	$y_{3,9,2}$
		Peça 10	$y_{1,10,2}$	$y_{2,10,2}$	$y_{3,10,2}$
		Peça 11	$y_{1,11,2}$	$y_{2,11,2}$	$y_{3,11,2}$
		Peça 12	$x_{1,12,2}$	$x_{2,12,2}$	$x_{3,12,2}$
	Repetição $i = 3$	Peça 01	$y_{1,1,3}$	$y_{2,1,3}$	$y_{3,1,3}$
		Peça 02	$y_{1,2,3}$	$y_{2,2,3}$	$y_{3,2,3}$
		Peça 03	$y_{1,3,3}$	$y_{2,3,3}$	$y_{3,3,3}$
		Peça 04	$y_{1,4,3}$	$y_{2,4,3}$	$y_{3,4,3}$
		Peça 05	$y_{1,5,3}$	$y_{2,5,3}$	$y_{3,5,3}$
		Peça 06	$y_{1,6,3}$	$y_{2,6,3}$	$y_{3,6,3}$
		Peça 07	$y_{1,7,3}$	$y_{2,7,3}$	$y_{3,7,3}$
		Peça 08	$y_{1,8,3}$	$y_{2,8,3}$	$y_{3,8,3}$
		Peça 09	$y_{1,9,3}$	$y_{2,9,3}$	$y_{3,9,3}$
		Peça 10	$y_{1,10,3}$	$y_{2,10,3}$	$y_{3,10,3}$
		Peça 11	$y_{1,11,3}$	$y_{2,11,3}$	$y_{3,11,3}$
		Peça 12	$x_{1,12,3}$	$x_{2,12,3}$	$x_{3,12,3}$

A soma dos quadrados da repetição ($SQ_{\text{Repetibilidade}}$), é a soma dos quadrados da média do grupo das repetições em relação à média global. Este desenvolvimento é análogo a expressão 14, referente a $SQ_{\text{Posição}}$. A expressão 15 apresenta apenas o resultado desta expansão. Os valores medidos y_{ijl} da repetição 1, 2 e 3 para o cálculo dos somatórios, respectivamente, estão representadas pelos dados sob os quadrados azul, verde e amarelo da tabela 6.

$$SQ_{\text{Repetibilidade}} = \frac{1}{s.t} \sum_{j=1}^r \left(\sum_{i=1}^s \sum_{l=1}^t y_{ijl} \right)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl} \right)^2 \quad (15)$$

Para a soma dos quadrados da peça ($SQ_{\text{Peça}}$), o arranjo experimental da realização do estudo da análise de variância para medições realizadas em três posições da MMC, está apresentado na tabela 7.

Assim como $SQ_{\text{Repetibilidade}}$ ou para a soma dos quadrados de qualquer outra variável que exerça contribuição na variabilidade no Sistema de Medição, e que se deseja estudar, o desenvolvimento procede analogamente à expressão 14, para $SQ_{\text{Posição}}$. Diante deste fato, a expressão 16 apresenta o resultado da expansão da soma dos quadrados da variável peça ($SQ_{\text{Peça}}$). Para um melhor entendimento, foi selecionada apenas as quatro primeiras peças na tabela 7, para exemplificar. Os valores y_{ijl} para os cálculos dos somatórios das peças 1, 2, 3 e 4, respectivamente estão representadas pelos valores sob os retângulos azul, verde, amarelo e roxo, da tabela 7.

$$SQ_{\text{Peça}} = \frac{1}{r.s} \sum_{l=1}^t \left(\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r y_{ijl} \right)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^r \sum_{l=1}^t y_{ijl} \right)^2 \quad (16)$$

Tabela 7 - Arranjo experimental para ANOVA das três posições, para variável peça

Valores das Medições $y_{i,j,l}$		Posição i ($i=1,2,3$)			
		Posição 1	Posição 2	Posição 3	
Repetição ($l = 1,2,3$)	Repetição $i = 1$	Peça 01	$y_{1,1,1}$	$y_{2,1,1}$	$y_{3,1,1}$
		Peça 02	$y_{1,2,1}$	$y_{2,2,1}$	$y_{3,2,1}$
		Peça 03	$y_{1,3,1}$	$y_{2,3,1}$	$y_{3,3,1}$
		Peça 04	$y_{1,4,1}$	$y_{2,4,1}$	$y_{3,4,1}$
		Peça 05	$y_{1,5,1}$	$y_{2,5,1}$	$y_{3,5,1}$
		Peça 06	$y_{1,6,1}$	$y_{2,6,1}$	$y_{3,6,1}$
		Peça 07	$y_{1,7,1}$	$y_{2,7,1}$	$y_{3,7,1}$
		Peça 08	$y_{1,8,1}$	$y_{2,8,1}$	$y_{3,8,1}$
		Peça 09	$y_{1,9,1}$	$y_{2,9,1}$	$y_{3,9,1}$
		Peça 10	$y_{1,10,1}$	$y_{2,10,1}$	$y_{3,10,1}$
		Peça 11	$y_{1,11,1}$	$y_{2,11,1}$	$y_{3,11,1}$
		Peça 12	$x_{1,12,1}$	$x_{2,12,1}$	$x_{3,12,1}$
	Repetição $i = 2$	Peça 01	$y_{1,1,2}$	$y_{2,1,2}$	$y_{3,1,2}$
		Peça 02	$y_{1,2,2}$	$y_{2,2,2}$	$y_{3,2,2}$
		Peça 03	$y_{1,3,2}$	$y_{2,3,2}$	$y_{3,3,2}$
		Peça 04	$y_{1,4,2}$	$y_{2,4,2}$	$y_{3,4,2}$
		Peça 05	$y_{1,5,2}$	$y_{2,5,2}$	$y_{3,5,2}$
		Peça 06	$y_{1,6,2}$	$y_{2,6,2}$	$y_{3,6,2}$
		Peça 07	$y_{1,7,2}$	$y_{2,7,2}$	$y_{3,7,2}$
		Peça 08	$y_{1,8,2}$	$y_{2,8,2}$	$y_{3,8,2}$
		Peça 09	$y_{1,9,2}$	$y_{2,9,2}$	$y_{3,9,2}$
		Peça 10	$y_{1,10,2}$	$y_{2,10,2}$	$y_{3,10,2}$
		Peça 11	$y_{1,11,2}$	$y_{2,11,2}$	$y_{3,11,2}$
		Peça 12	$x_{1,12,2}$	$x_{2,12,2}$	$x_{3,12,2}$
	Repetição $i = 3$	Peça 01	$y_{1,1,3}$	$y_{2,1,3}$	$y_{3,1,3}$
		Peça 02	$y_{1,2,3}$	$y_{2,2,3}$	$y_{3,2,3}$
		Peça 03	$y_{1,3,3}$	$y_{2,3,3}$	$y_{3,3,3}$
		Peça 04	$y_{1,4,3}$	$y_{2,4,3}$	$y_{3,4,3}$
		Peça 05	$y_{1,5,3}$	$y_{2,5,3}$	$y_{3,5,3}$
		Peça 06	$y_{1,6,3}$	$y_{2,6,3}$	$y_{3,6,3}$
		Peça 07	$y_{1,7,3}$	$y_{2,7,3}$	$y_{3,7,3}$
		Peça 08	$y_{1,8,3}$	$y_{2,8,3}$	$y_{3,8,3}$
		Peça 09	$y_{1,9,3}$	$y_{2,9,3}$	$y_{3,9,3}$
		Peça 10	$y_{1,10,3}$	$y_{2,10,3}$	$y_{3,10,3}$
		Peça 11	$y_{1,11,3}$	$y_{2,11,3}$	$y_{3,11,3}$
		Peça 12	$x_{1,12,3}$	$x_{2,12,3}$	$x_{3,12,3}$

Uma vez que o objetivo é comparar as variâncias entre amostras, o quadrado médio que representa a variação dentro das amostras é chamado de erro experimental ou resíduo, (SQ_{Erro}). O cálculo pode ser realizado pela subtração da soma dos quadrados das variáveis (SQ) envolvidas no experimento da soma dos quadrados totais SQT, como mostrada na expressão 17, dando continuidade ao exemplo.

$$SQT = SQ_{\text{Posição}} + SQ_{\text{Repetibilidade}} + SQ_{\text{Peça}} + SQ_{\text{Erro}} \quad (17)$$

Isolando SQ_{Erro} ,

$$SQ_{\text{Erro}} = SQT - SQ_{\text{Posição}} - SQ_{\text{Repetibilidade}} - SQ_{\text{Peça}}$$

Um outro passo necessário para o cálculo da ANOVA, é obter as estimativas das variâncias entre e dentro das amostras através das somas de quadrados dividido pelos respectivos números de graus de liberdade. Estas estimativas são chamadas de quadrados médios (SQM). O número de graus de liberdade segue a seguinte relação:

- O número de graus de liberdade entre amostras é igual ao número de amostras menos um ($k-1$).
- O número de graus de liberdade dentro das amostras é igual ao número de amostras (k) vezes o número de réplicas por amostra menos um ($r-1$), ou seja, $k*(r-1)$.
- O número de graus de liberdade dentro das amostras pode ainda ser calculado pela diferença entre o número de graus de liberdade total ($N-1$) e o número de graus de liberdade entre amostras.

A tabela 8 apresenta cada uma das somas de quadrados e os grau de liberdade associado a elas. Também está apresentado os graus de liberdade relacionado a continuação do exemplo.

Tabela 8 – Graus de liberdade das somas de quadrados.

Termo	Graus de liberdade (GL)	
	Amostras de mesmo tamanho n	GL do Exemplo
SQT	$n_T - 1 = nk - 1$	$n_T - 1 = (36*3) - 1 = 107$
$SQ_{\text{Posição}}$	$k - 1$	$k_{\text{Posição}} - 1 = 3 - 1 = 2$
$SQ_{\text{Repetibilidade}}$	$k - 1$	$k_{\text{Repetibilidade}} - 1 = 3 - 1 = 2$
$SQ_{\text{Peça}}$	$k - 1$	$k_{\text{Peça}} - 1 = 12 - 1 = 11$
SQE	$(nk - 1) - (k - 1) = k(n-1)$	$(108 - 1) - (3 - 1) - (3-1) - (3-1) = 92$

Com os quadrados médios de cada variável (SQ) e o número de graus de liberdade, é possível o cálculo do SQM do exemplo, com representado pelas expressões 18, 19, 20 e 21, respectivamente, as variáveis posição, repetibilidade, peça e erro, também chamada de erro experimental ou resíduo.

$$SQM_{Posição} = \frac{SQ_{Posição}}{GL_{posição}} = \frac{SQ_{Posição}}{2} \quad (18)$$

$$SQM_{Repetibilidade} = \frac{SQ_{Repetibilidade}}{GL_{Repetibilidade}} = \frac{SQ_{Repetibilidade}}{2} \quad (19)$$

$$SQM_{Peça} = \frac{SQ_{Peça}}{GL_{Peça}} = \frac{SQ_{Peça}}{12} \quad (20)$$

$$SQM_{Erro} = \frac{SQ_{Erro}}{GL_{Erro}} = \frac{SQ_{Erro}}{92} \quad (21)$$

O próximo passo é realizar a comparação dos valores de quadrados médios calculados. Esta metodologia se baseia no teste de hipótese, que admitti se uma hipótese inicial H_0 de que as médias obtidas nas amostras são iguais ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$). Caso o quadrado médio entre amostras apresente um valor bem maior que o quadrado médio dentro das amostras, esta hipótese pode ser rejeitada, aceitando assim a hipótese H_1 , de que as médias são diferentes. O procedimento de análise de variância utiliza uma classe de distribuição contínua de probabilidades, denominada distribuição F.

As probabilidades para uma variável aleatória que possui uma distribuição F são iguais às áreas sob a curva F. Uma curva F também depende do número de graus de liberdade, que neste caso são dois. Na figura 33 estão apresentados os desenhos de duas curvas F, aproveitando os graus de liberdade do exemplo iniciado neste item, sendo uma curva com $gl = (2,92)$, para a variável posição e repetição, e a outra com $gl = (11,92)$,

para a variável peça. O primeiro número é denominado graus de liberdade do numerador e o segundo, graus de liberdade do denominador.

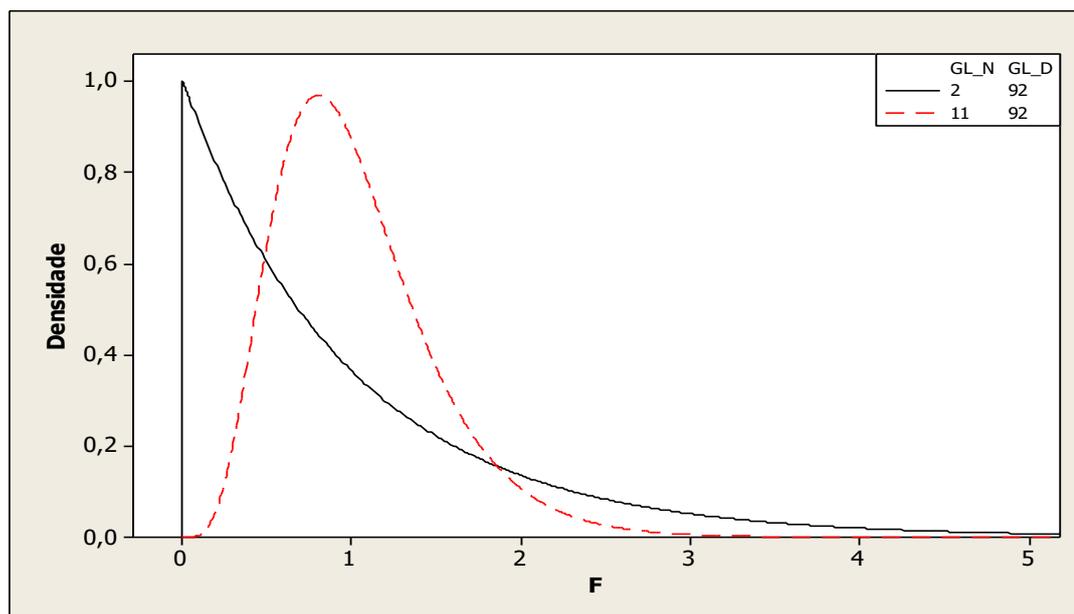


Figura 33 – Curva F para as variáveis posição, repetição e peça

As propriedades características das curvas F, é possuir área total sob a curva igual a 1, tem início no zero dos eixos das abscissas e se estende indefinidamente para a direita, e se aproxima de zero à medida que a variável cresce. Uma curva F não é simétrica, diferentemente da curva normal. Ela sobe rapidamente com F e desce se aproximando do eixo horizontal mais suavemente.

O valor F calculado é comparado com valores de F tabelados em função do número de graus de liberdade das variâncias e do nível de confiança desejado. Normalmente elas são usadas para um valor α igual a 0,01 ou 0,05 o que nos conduz à notação $F_{0,01}$ e $F_{0,05}$ para indicar os valores de F que definem uma área de 0,01 ou 0,05 à sua direita, respectivamente. No anexo A está apresentada a tabela que fornece os valores para $F_{0,01}$. No topo da tabela estão especificados os graus de liberdade para o numerador e na coluna à esquerda, os graus de liberdade para o denominador. No Anexo B, encontra-se a tabela que é similar à tabela do anexo A, fornecendo os valores para $F_{0,05}$.

Conforme mencionado para esta aplicação, é necessário decidir se a variação entre as médias das amostras (QMG), posição, repetibilidade e

peça são grandes o bastante para concluir que existe alguma diferença entre elas, pela comparação com a variação existente dentro das amostras (QM_{Erro}). Portanto, como QM_{Erro} é uma estimativa da variância comum das populações em estudo, se QMG é grande relativo a QME , então é possível inferir que a variação entre as médias das amostras é devida a diferenças entre as médias das populações e não da variação dentro das populações. Desta forma, se usa a variável aleatória F , conforme a expressão 22, como a estatística de teste. Grandes valores de F indicam que QMG é grande relativo a QME e assim, que a hipótese de médias de populações iguais deve ser rejeitada. O procedimento de análise de variância será explicado com base no exemplo a seguir

$$F = \frac{QMG}{QME}$$

(22)

O valor F tabelado é proveniente de uma distribuição de probabilidades da razão entre variâncias de duas amostras, extraídas ao acaso de uma mesma população com distribuição normal de variância σ^2 . A apresentação gráfica da curva desta distribuição depende do número de graus de liberdade das variâncias amostrais (numerador e denominador). A figura 34 apresenta a aparência da curva, e na área hachurada sob a curva corresponde à probabilidade de obter razões F maiores que o valor $F_{2,60}$ no eixo da abscissa a nível de significância $\alpha = 0,05$, conforme tabela do anexo B.

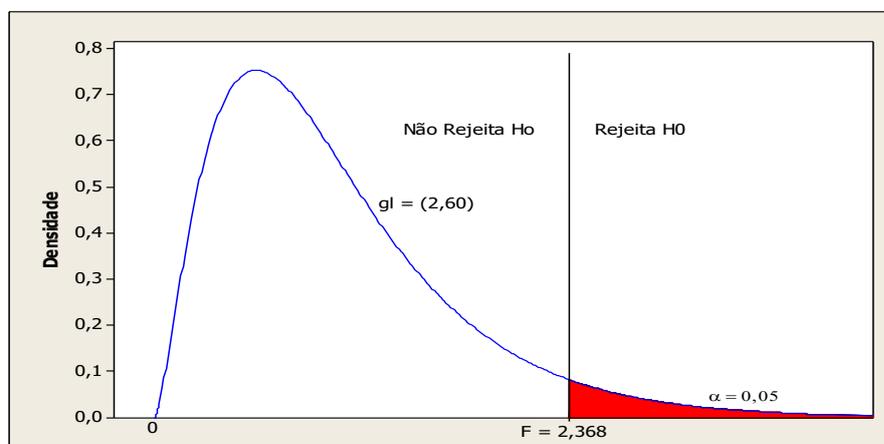


Figura 34 - Distribuição F para 2 e 60 graus de liberdade e nível de significância $\alpha = 0,05$

A apresentação dos resultados da análise de variância é feita através de um quadro. A tabela 9 apresenta o quadro da ANOVA do exemplo realizado neste capítulo. Para que os resultados encontrados sejam válidos, é necessário que as médias dos dados apresentem distribuição normal e que as variâncias dentro das amostras sejam aproximadamente iguais. O primeiro passo para a análise de variância, é definir a hipóteses nula e alternativa, seguido da definição do nível de significância α , e por fim, o valor crítico é F_{α} , com $GL = (k-1, n-k)$, onde n é o número total de dados. Se o valor da estatística F cair na região de rejeição, rejeite H_0 ; caso contrário não rejeite H_0 .

Tabela 9 – Tabela ANOVA para o exemplo aplicado neste capítulo

Fonte	GL	SQ	SQM	F _{Calculado}	F _{Est. $\alpha = 0,05$}	F _{Est. $\alpha = 0,01$}
Peça	11	SQ_{Peça}	$\frac{SQ_{Peça}}{11}$	$\frac{SQM_{Peça}}{SQM_{Erro}}$	$F_{[11,92]} = 1,83$	$F_{[11,92]} = 2,34$
Posição	2	SQ_{Posição}	$\frac{SQ_{Posição}}{2}$	$\frac{SQM_{Posição}}{SQM_{Erro}}$	$F_{[2,92]} = 3,07$	$F_{[2,92]} = 4,79$
Repetibilidade	2	SQ_{Repetibilidade}	$\frac{SQ_{Repetibilidade}}{2}$	$\frac{SQM_{Repetibilidade}}{SQM_{Erro}}$	$F_{[2,92]} = 3,07$	$F_{[2,92]} = 4,79$
Erro	92	SQ_{Erro}	$\frac{SQ_{Erro}}{92}$			
Total	107	SQT	$\frac{SQT}{107}$			

As conclusões abstraídas dos testes de hipóteses, como o teste F das variâncias amostrais, estão baseadas em curvas de distribuição de probabilidades, dois tipos de erros podem ser cometidos. Estes erros são denominados de erro do tipo I e erro do tipo II.

O erro do tipo I é o erro que se comete quando a hipótese inicial H_0 é verdadeira e o teste permite concluir pela sua rejeição. A probabilidade de cometer um erro deste tipo pode ser controlada pela seleção da confiança estatística desejada, na realização do teste de hipóteses. Assim, se a confiança escolhida for 99%, a probabilidade de rejeitar uma hipótese verdadeira é de 1%.

O erro do tipo II é o erro que se comete quando a hipótese inicial H_0 é falsa e o teste permite concluir pela sua aceitação. A probabilidade de

cometer este erro é denotada por β , e depende do tamanho da amostra, do desvio padrão amostral e da grandeza

Uma maneira de minimizar a incidência destes erros na estatística clássica, é observar o valor-p, também chamado de probabilidade de significância. Este valor é a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema que aquela observada em uma amostra, sob a hipótese nula H_0 , ou seja, é o menor nível de significância que conduz à rejeição da hipótese nula, com os dados fornecidos. Em um teste de hipótese, pode-se rejeitar a hipótese nula para o nível de significância $\alpha = 0,05$, caso o valor-p seja menor que 0,05, de tal modo que este é o menor nível de significância com que se rejeitaria a hipótese nula.

3.5 – ESTUDO DE REPETIBILIDADE E PRODUTIVIDADE (R&R)

O estudo de R&R é um caso especial da aplicação da ANOVA. Através desta ferramenta é possível também a realização dos estudos de repetibilidade e reprodutibilidade. Segundo Di Giacomo (2006), estes testes são amplamente aplicados para avaliação de variações em máquina de medir por coordenadas.

Em um ensaio tradicional para um estudo de R&R com aplicação da análise de variância, há o envolvimento de dois fatores. Estes fatores são denominados como fator peça (P) e o outro fator como avaliador (A). O modelo matemático tradicional clássico que representa a contribuição de cada variável do experimento para a variável resposta pode ser estabelecido pela expressão 9. Este modelo considera os fatores com efeitos fixos, onde todos os avaliadores que tem a função em operar o Sistema de Medição, são compreendidos como cada avaliador que avalia as mesmas peças, seguindo um mesmo padrão (MONTGOMERY, 2004).

A decomposição da variabilidade de um Sistema de Medição está apresentada na tabela 10. A repetitividade ou variação do equipamento é denominada VE, a reprodutibilidade ou variação dos avaliadores é denominada VA, a variação do Sistema de Medição é avaliada pelo cálculo do R&R, a variação total do estudo é denominada de VT e a variação da peça

ou processo é dada por VP. Para o cálculo da percentagem que cada fator contribui na variação total no Sistema de Medição, a variabilidade de cada fator é comparada com a variabilidade total. De acordo com a AIAG, devido a maior facilidade de interpretação, as componentes da variação do sistema são representadas por seis desvios - padrão, ao invés do uso da variância. Se aparecer valor negativo sob a raiz quadrada, a nulidade da contribuição deste fator, deve ser considerada. A apresentação da tabela 10 está relacionada ao exemplo deste capítulo, onde a variável avaliador está denominada de posição (MSA, 2010)

Tabela 10 – Componentes da variabilidade de um Sistema de Medição

Fonte de Variação	Desvio padrão = 6,0 sigmas	Percentual da Variação
Repetibilidade	$VE = 6. \sqrt{SQM_{Repetibilidade}}$	$\%VE = 100. \frac{VE}{VT}$
Reprodutibilidade	$VA = 6. \sqrt{\frac{SQM_{Posição}}{il}}$	$\%VA = 100. \frac{VA}{VT}$
Interação Peça x (P) Posição do artefato (Pa)	$VPaP = 6. \sqrt{\frac{SQM_{Posição.Peça} - SQM_{Peça}}{l}}$	$\%VPaP = 100. \frac{VAP}{VT}$
Peça	$VP = 6. \sqrt{\frac{SQM_{Peça} - SQM_{Posição.Peça}}{jl}}$	$\%VP = 100. \frac{VP}{VT}$
R&R	$R\&R = \sqrt{(VE)^2 + (VA)^2 + (VAP)^2}$	$\%R\&R = 100. \frac{R\&R}{VT}$
Total	$VT = \sqrt{(VR\&R)^2 + (VP)^2}$	

3.5 - Planejamento de Experimentos

A escolha do planejamento do experimento e a realização do mesmo, envolve uma série de considerações que devem ser realizadas vislumbrando atingir o objetivo do experimentador. Montgomery (2004) formalizou uma sequência de etapas com o intuito em facilitar estas tarefas, as quais são:

- 1) Reconhecimento e relato do problema;
- 2) Escolha das variáveis envolvidas e dos seus valores (fatores e níveis);
- 3) Seleção da variável resposta a ser medida;
- 4) Escolha do planejamento experimental;

- 5) Realização do experimento;
- 6) Análise dos dados obtidos;
- 7) Conclusões e recomendações.

O planejamento do experimento foi baseado no estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R), que determina a escolha de no mínimo dois operadores, de dez peças para a realização dos ensaios, e para cada peça são realizadas três repetições. As peças foram emuladas em um único padrão de doze faces e os operadores foram aqui denominados em estratégia, hora em posição.

CAPÍTULO 4

MÉTODO PARA MONITORAMENTO DO DESEMPENHO DAS MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS PELA APLICAÇÃO DE TESTES INTERINOS

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um procedimento de avaliação intermediária de forma indireta de Máquinas de Medir a Três Coordenadas através de medições realizadas em um artefato não calibrado, que em algumas circunstâncias fora denominado como peça. Análises, comparações e a aplicação de técnicas estatísticas, permitirão à obtenção de um número significativamente de informações sobre o comportamento das MMC ao longo do tempo, como o objetivo de monitorar a MMC no prazo especificado pelo fabricante da mesma, que se estende entre uma calibração e outra.

Através do planejamento dos experimentos de avaliação, a contribuição do artefato padrão para medição e a contribuição da MMC na

variabilidade das medições foram determinados, e a relação entre as variáveis experimentais e o desempenho da máquina foi investigada. As contribuições das variáveis estudadas na medição foram determinadas a partir da medição de um artefato padrão, posicionado em três diferentes localizações e orientações no volume de trabalho da MMC.

A distância entre as paredes do artefato padrão e o diâmetro interno foram adquiridos a partir da medição de uma peça de trabalho de geometria dodecagonal, contendo doze faces. Foram medidas doze distâncias lineares e um diâmetro interno, e os resultados de distância entre uma reta e um ponto e o valor do diâmetro, foram calculados pelo programa computacional da MMC denominado PC-DMIS®.

As vantagens do emprego do artefato padrão escolhido para avaliação indireta, correspondem ao custo e peso reduzidos deste artefato, além da facilidade de manipulação e posicionamento para medição.

A fundamentação do método proposto para o estudo de repetibilidade e produtividade (R&R) da MMC, se encontra nas técnicas de análise da variância, onde a variância de um conjunto de resultados experimentais pode ser desmembrada segundo as várias fontes de variabilidade presentes no experimento. Assim, a variância associada à cada uma das variáveis experimentais pode ser estimada e comparada com a variância total obtida, e as fontes de erros que mais contribuem para a incerteza de medição podem ser determinadas.

4.1 PLANEJAMENTO PARA MONITORAMENTO DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO.

O experimento foi planejado tendo início pela definição de quais variáveis estatísticas seriam convenientes estudar para a aplicação de um teste interino de desempenho na MMC. As variáveis escolhidas a serem monitoradas foram a repetibilidade e reprodutibilidade da máquina. Para analisar estas variáveis, foi necessário a definição da tolerância do processo de fabricação do artefato padrão, a aplicação de teste de análise de variância para o estudo de R&R e comparação entre médias.

De acordo com a ISO/TS 15530 - 3 (2011), a posição e a orientação da peça de trabalho de medição são livres dentro do espaço abrangido pela avaliação da incerteza, portanto, no arranjo experimental para realização dos ensaios foram propostas três posições distintas para medição da peça, ao longo do volume da máquina. Estas posições contemplam a área de maior utilização da máquina durante um processo de medição cotidiana.

Para cada posição definida na máquina, foram medidas doze distâncias lineares e um diâmetro interno, para cada característica de medida foram realizadas três repetições. O estudo de R&R proposto pelo MSA sugere um número mínimo de 10 peças e dois operadores com no mínimo três réplicas para cada peça.

Para um melhor entendimento das etapas envolvidas na aplicação do método proposto, foi sugerida uma subdivisão em quatro partes: a avaliação inicial da MMC na posição 1, a avaliação inicial da MMC nas três posições propostas, a avaliação de desempenho da MMC na Posição 1, 2 e 3, e por fim, a avaliação da reprodutibilidade da MMC nas Posições 1 e 3

4.2 ANÁLISES DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A avaliação inicial da MMC na posição 1 foi realizada com o objetivo em estudar a repetibilidade e a reprodutibilidade quando utilizadas duas estratégias de medição diferentes. Este estudo possibilitou a escolha da estratégia de medição a ser adotada e definiu parâmetros iniciais para as futuras comparações. Neste caso, foram aplicadas ferramentas estatísticas para o estudo de R&R completo e padronizado, também e foi aplicado o teste de hipótese com o auxílio da curva de distribuição de probabilidades F.

A avaliação inicial da MMC nas três posições propostas teve como objetivo verificar a consistência da repetibilidade e da reprodutibilidade da máquina, bem como a interação entre peça e posição. Assim como no ensaio anterior foi também realizado o estudo de R&R e os testes de hipóteses necessários para as comparações entre as posições de medição, foram aplicadas.

A avaliação de desempenho da MMC na posição 1, 2 e 3, representou o teste interino na máquina. Esta etapa é de extrema importância devido a responsabilidade envolvida em uma possível tomada de decisão a respeito da continuidade ou a parada do equipamento, seja para uma investigação mais profunda, uma calibração completa, uma manutenção, ou até mesmo a readequação nas tolerâncias das dimensões das peças medidas pelo equipamento. Os testes de hipóteses com o auxílio da curva de distribuição de probabilidades F, foram as ferramentas estatísticas escolhidas para esta tomada de decisão.

A avaliação da reprodutibilidade da MMC nas Posições 1 e 3, foi necessária devido aos resultados apresentados, quando a peça foi medida nas três posições diferentes. Este estudo comparou a medição do modo padrão realizado pela máquina, onde a peça fica parada e a máquina mede apalpando em todas as direções e orientações da peça, com a máquina medindo sempre na mesma direção e orientação, portanto a cada medição de distância, a peça foi girada e repetidos os processos de alinhamento e de medição.

Todas as variáveis estudadas foram calculadas e demonstradas com o auxílio dos programas computacionais Minitab 16® e Microsoft Excel®, que são programas muito aplicados na indústria há busca de melhorar a qualidade, devido às ferramentas de controle de qualidade contida em seu escopo.

O artefato padrão escolhido para desenvolvimento do trabalho está baseado na norma internacional ISO/TS 15530 – 3 (2011), que orienta para o uso de peças de trabalho ou padrões calibrados de medição, seja no procedimento de avaliação da incerteza, na reverificação e na verificação intercalar da máquina.

O método proposto está fundamentado nas técnicas de Análise de Sistemas de Medição (MSA) que apresenta diretrizes capazes de avaliar um Sistema de Medição direcionado à indústria automobilística, mas com diretrizes genéricas. Este manual tornou-se uma ferramenta muito aplicada para a obtenção da garantia da qualidade dos dados coletados nas medições e na garantia da confiabilidade metrológica.

CAPÍTULO 5

DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO PARA REALIZAÇÃO DE TESTES INTERINOS NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

Este capítulo apresenta o detalhamento do desenvolvimento do método proposto para a avaliação de desempenho de MMC através de testes interinos. Em conformidade com os aspectos teóricos apresentados no capítulo 3, a construção dos arranjos experimentais de acordo com o estudo R&R estão descritos, juntamente com as expressões para realizar os cálculos da análise de variância.

Todos os experimentos foram realizados em uma Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo Ponte Móvel, cujas características operacionais e construtivas são apresentadas, bem como os aspectos envolvidos na construção e no manuseio do padrão dodecagonal utilizado.

Para um melhor entendimento do método, o conteúdo está dividido em descrição da MMC, seguido da descrição do artefato de calibração, da

sequência das etapas necessárias para aplicação do método proposto, e por fim a análise estatística dos resultados, totalizando quatro etapas.

5.1 - DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Para realização dos testes experimentais, uma máquina de medir a três coordenadas, figura 35, foi utilizada.

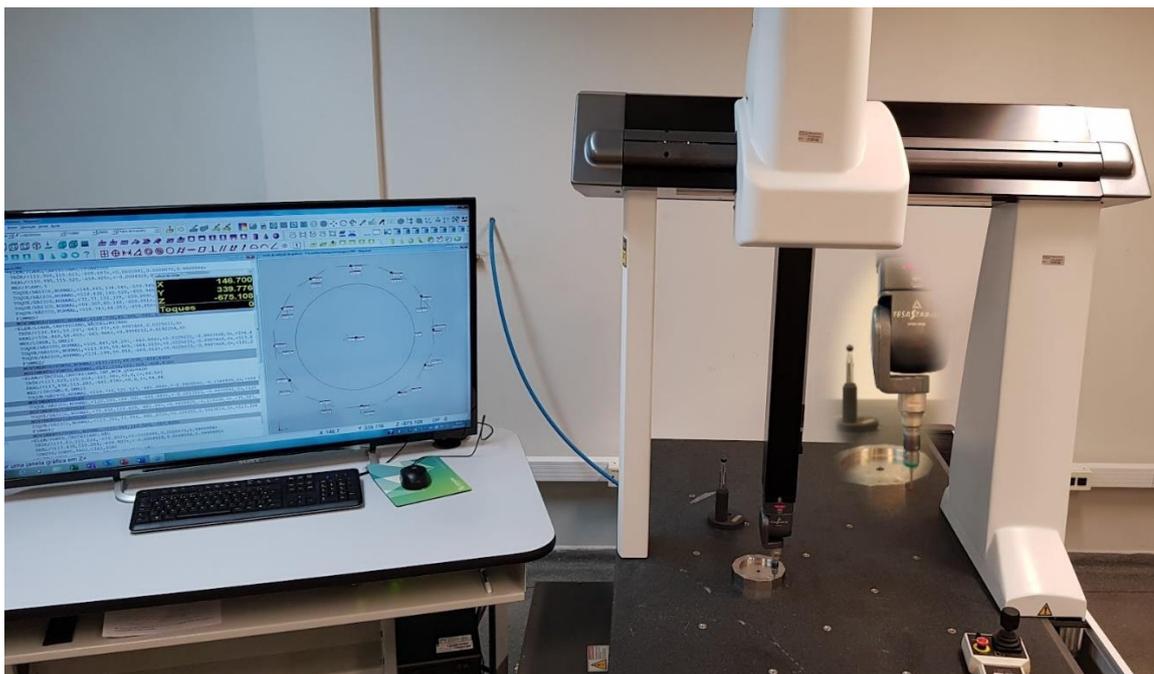


Figura 35 - Máquina de medir a três coordenadas.

Esta máquina é operada de forma semiautomática e automática. Ela possui em sua construção, uma viga transversal e o eixo Z confeccionadas em alumínio aero-anodizado com superfície resistente a temperaturas superiores, o que reduz a massa das partes em movimento e o movimento de inércia da máquina de medição, possibilitando a movimentação dos eixos em altas velocidades. Possui mancais aerostáticos de alta precisão e com sistema de autolimpeza para os três eixos, tornando as guias mais resistentes aos desgastes, conseqüentemente um deslocamento mais estável.

O sistema de leitura de posição dos eixos, é por meio de escalas ópticas de alta precisão, de resolução de até $0,078 \mu\text{m}$. Instaladas na guia da máquina, fixada em uma das extremidades, e a outra extremidade livre com possibilidade de movimentação, o que reduz a deformação da escala.

As guias em forma de cauda de andorinha integral utilizadas no eixo Y, reduzem o peso da máquina e minimizam as oscilações dinâmicas de forma eficaz, assegurando a precisão de medição e a estabilidade. O formato triangular da guia do eixo X, com baixo centro de gravidade e uma melhor relação de rigidez em massa, proporciona mais confiabilidade dos movimentos em relação ao perfil retangular. Todos os eixos se movimentam impulsionados por servos motores de corrente contínua (DC), o que garante movimentos firmes e precisos.

As movimentações da sonda nos três eixos ortogonais estão sustentadas pela estrutura da MMC que serve de suporte. Os cursos de movimentação efetiva dos três eixos ortogonais X, Y e Z, apresentam respectivamente cursos de operação de aproximadamente 500 x 600 x 400 mm, o que caracteriza uma MMC para pequenas dimensões. A figura 36 apresenta o modelo de sonda utilizado no ensaio.



Figura 36 - Sonda de medição

Fonte: Hexagon Metrology (2016)

Este tipo de sonda é constituído de duas peças principais, isto é, o módulo de montagem e o corpo do apalpador. Ambas as partes são montadas por meio de um sistema de acoplamento magnético, assegurando um reposicionamento com repetibilidade de até 0,1 μm , enquanto que permite a troca manual ou automático sem a necessidade de efetuar

constantes calibrações. São classificados em força baixa, padrão, média e estendida, devido a força de apalpamento. A sonda utilizada na medição foi a de força média, que corresponde a 0,10 N em 25 mm e 0,5 μm de repetibilidade.

A tabela 11 apresenta as especificações técnicas da máquina de medir por coordenadas utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 11: Informações Técnicas da MMC CROMA - SHEFFIELD.

Fonte: Adaptado de SEREIN METROLOGY (SHENZHEN) CO. LTD (2016)

Marca: Croma		
Modelo: Croma 060806		
Tipo: Ponte Móvel		
Cursos de operação (mm)	X	500
	Y	600
	Z	400
Tamanho total (mm)	Lx	1050
	Ly	1535
	Lz	2247
Capacidade (kg)		300
Peso da máquina (kg)		590
MPEP (μm)		3,5
MPEE (μm)		$2,8 + L / 300$
Resolução da escala		0,078 μm
velocidade espaço		520 mm / s
Aceleração do espaço		1730 mm / s ²
Pressão do ar		120NL / min, 0,45MPa
Temperatura		20 \pm 2 °C
Umidade		45% - 75%

O diagrama de blocos mostrado na figura 37, resume os passos do operador em um processo de medição de características geométricas genéricas desejadas. Um computador dedicado que executa um poderoso programa computacional específico denominado PC-DMIS[®], se encarrega

em capturar, organizar e manipular as coordenadas dos pontos apalpados. Servindo assim como interface entre máquina, computador e operador.

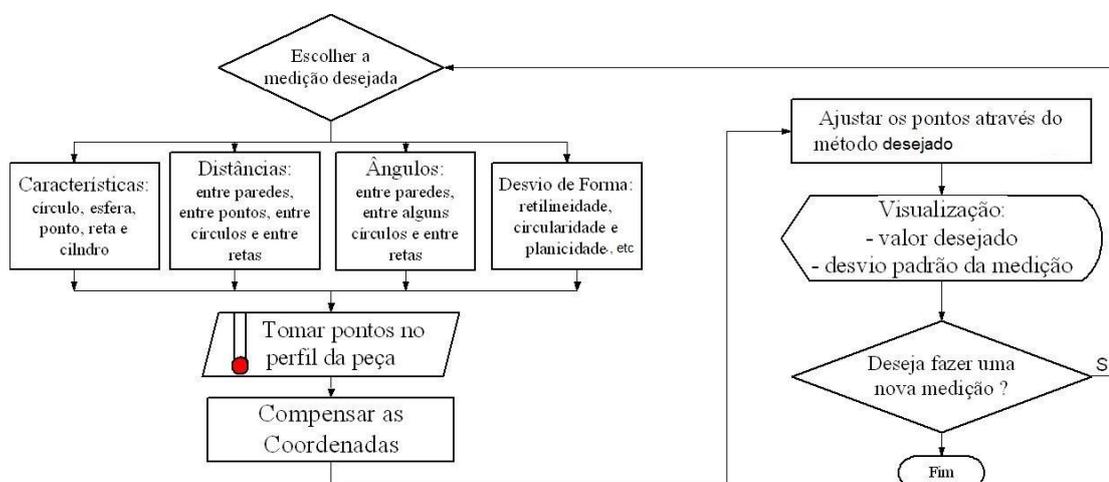


Figura 37 - Diagrama de blocos de um processo de medição

Fonte: Adaptado de Marques (2003)

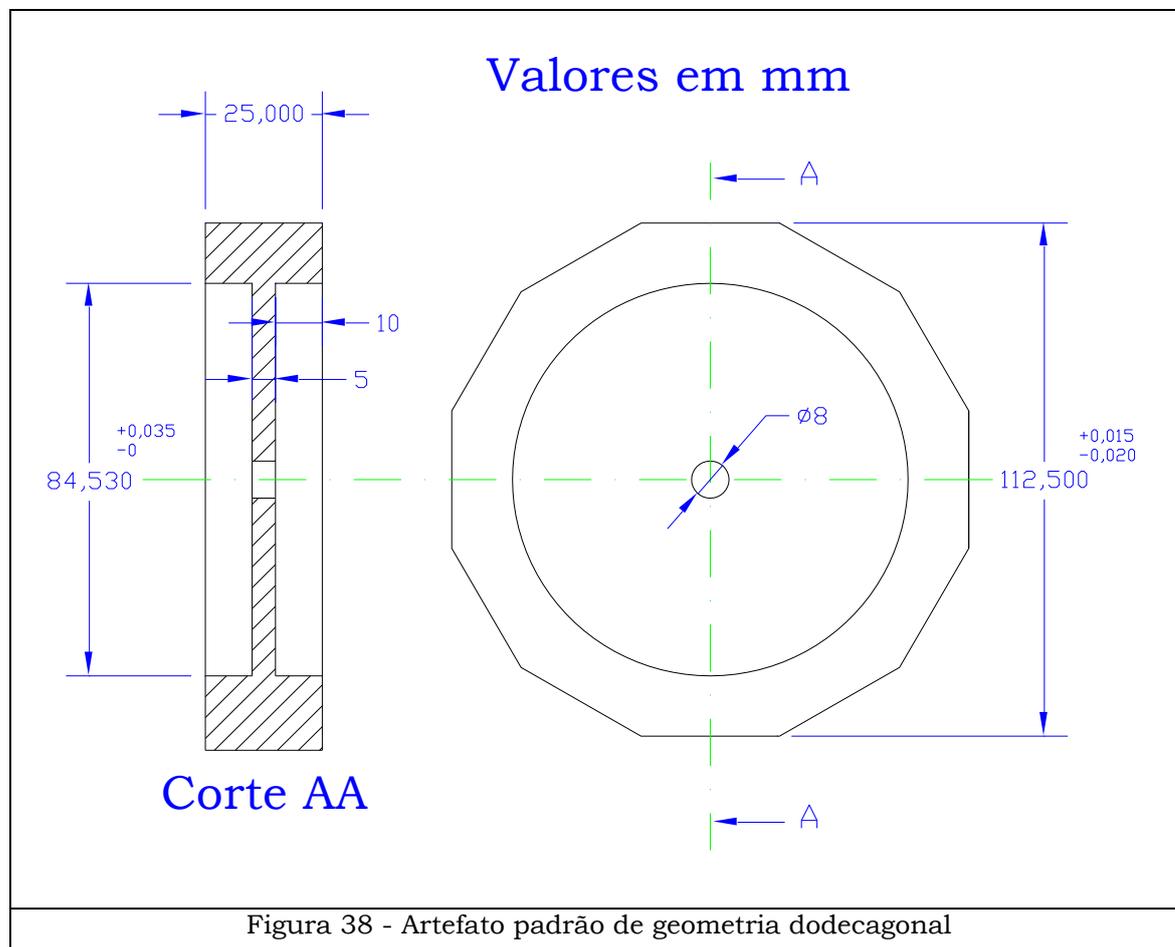
5.2 - DESCRIÇÃO DO ARTEFATO DE CALIBRAÇÃO

O artefato padrão de medição utilizado na calibração indireta da MMC tem em seu projeto características muito exploradas em processo de medição cotidiana que se resume em distância linear e diâmetro.

Para contemplar as necessidades deste trabalho, foi utilizado um artefato padrão que reúne boa parte destes requisitos e que envolve processos simples em sua fabricação. Este artefato foi projetado com a capacidade de ser calibrado com instrumentação de medição linear, uma vez que alta precisão pode ser obtida usando equipamentos-padrão e técnicas consagradas de calibração com esses equipamentos.

O artefato padrão confeccionado em aço inoxidável AISI 304 possui geometria dodecagonal, ou seja, uma peça prismática de doze faces, e também dois furos centrados. Os furos foram torneados e as faces fresadas, ambos por máquina de processos convencionais de usinagem. Posteriormente as faces foram lapidadas, e foram finalizadas com o processo de polimento, o que as deixou com aspecto espelhado. Todos os processos de fabricação foram realizados no Laboratório de Máquinas e Ferramentas (LAMAFE) da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC- USP.

A figura 38 mostra o desenho técnico do artefato padrão, os detalhes, as suas dimensões e as tolerâncias pertinentes ao experimento realizado.



O artefato reúne alguns requisitos positivos, entre eles estão a leveza, a durabilidade do material, a facilidade de manipulação e posicionamento sobre o desempenho da máquina, a facilidade de calibração, não oxidável, e a não complexidade na fabricação.

Os elementos geométricos contidos no artefato padrão envolvidos no experimento para análise de desempenho de MMC através de testes interinos, são os doze planos contidos nas faces externas e o diâmetro interno de 84,500 mm. Em cada uma das doze faces foram apalpados pontos que definiram uma reta, e também um ponto único na face oposta e paralela, para posteriormente serem calculadas pelo programa computacional, as doze distâncias entre uma reta e um ponto de valor nominal de 112,500 mm.

5.3 - SEQUÊNCIA DAS ETAPAS NECESSÁRIAS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Considerando que a máquina de medir por coordenadas em estudo tenha sido submetida a um processo de calibração periódica ou a um processo de calibração de liberação técnica, após a montagem realizada pelo fabricante, nos casos de máquinas novas. É a partir deste momento que se inicia os testes interinos.

O primeiro passo é a qualificação da máquina, o que corresponde seguir a orientação do programa computacional dedicado a medição que inicialmente solicita deslocar a máquina até a posição inicial de trabalho. A sonda de medição utilizada escolhida no banco de dados do programa ou criar uma configuração de uma nova sonda, especificando qual cabeçote, qual a força de apalpamento, comprimento da haste e diâmetro de ponta a ser usado. Após estas configurações deve ser feita a calibração da ponta de trabalho, medindo a esfera padrão localizada sobre o desempenho da máquina.

Antes de seguir o procedimento conforme o diagrama de blocos de um processo de medição ilustrado na figura 39, foi necessário realizar o segundo passo que é posicionar a peça no local desejado sobre o desempenho e realizar o alinhamento da máquina com a peça, definindo um plano, uma linha e um ponto, denominado alinhamento PLP. Estas geometrias foram medidas no artefato padrão e orientadas conforme o projeto mecânico e seguindo as orientações do programa para realização de alinhamento. Neste experimento, o plano ficou definido na face superior da peça, a origem do sistema de coordenadas foi posicionada no centro do furo de 84,530 mm e a direção e sentido na aresta da dimensão 1. Para todas as três posições utilizadas na máquina, a aresta 1 foi orientada na direção X da máquina.

O terceiro e último passo consistiu na realização das medições da peça em três posições distintas conforme ilustrado pela figura 39. Para cada posição foram realizadas 12 medições de distâncias entre paredes de faces paralelas por meio da opção ponto - linha no valor nominal de 112,500 mm

e um diâmetro interno de 84,500 mm. Para cada dimensão característica foram realizadas três repetições, seguindo as diretrizes do manual de referência MSA para o estudo de R&R, visando obter consistência dos dados e conseqüentemente uma maior garantia na tomada de decisão.

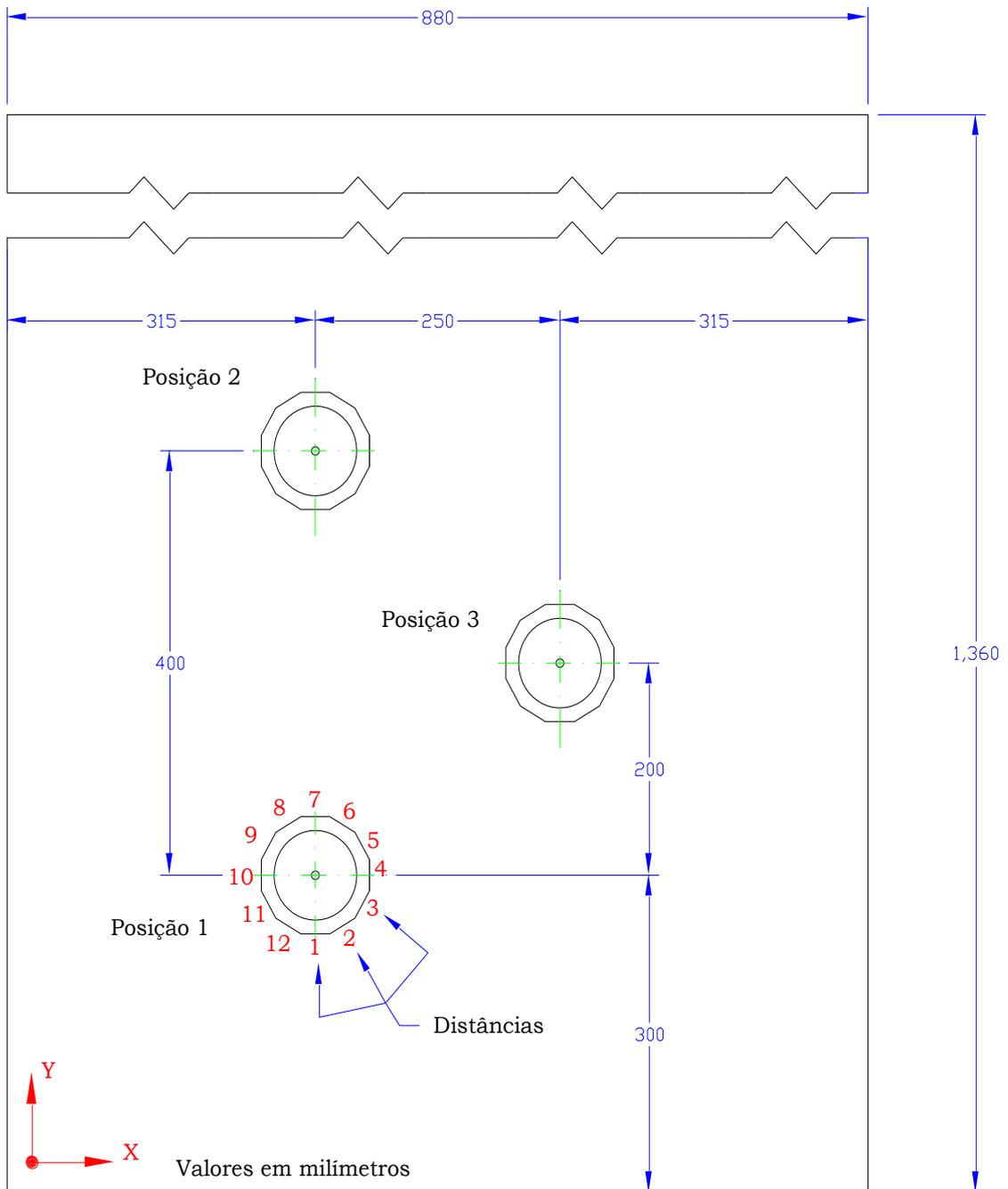


Figura 39 - Posicionamento da peça sobre o desempenho

5.4 - PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS DE AVALIAÇÃO INDIRETA DE DESEMPENHO DA MMC

O planejamento dos experimentos de avaliação indireta de desempenho da MMC foi realizado através da observação do comportamento das variáveis de repetibilidade e reprodutibilidade na operação da máquina, na medição de um padrão de distâncias não calibrado. Inicialmente, as variáveis experimentais e seus níveis foram estabelecidas, e os arranjos experimentais foram escolhidos.

É importante ressaltar que o objetivo do trabalho além de propor um método de avaliação de desempenho da MMC, é apresentar uma peça de trabalho para a realização desta avaliação. A peça apresentada tem a função de emular doze peças, portanto, cada dimensão do artefato padrão representa uma peça. Todas as dimensões foram fabricadas pelos mesmos processos, com as mesmas dimensões nominais e as mesmas tolerâncias.

5.5 - DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS

No capítulo 2 foi visto que as MMCs apresentam um número muito grande de variáveis que influenciam o comportamento dos erros de medição. A presença de interações entre estas variáveis contribui ainda mais para aumentar o número de ensaios que deve ser realizado.

A escolha das variáveis experimentais a investigar foi feita considerando o ponto de vista do usuário da MMC, que busca procedimentos rápidos e práticos para estimar o desempenho de operação da máquina. A literatura se refere a estes procedimentos como testes de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) (PHILLIPS, 1995).

As variáveis investigadas, chamadas de variáveis de qualificação da máquina, foram as variáveis Posição 1, 2, 3, simbolizada pela letra P, e as variáveis estratégia 1 e 2 de medição, simbolizada pela letra E. Outras variáveis poderiam ser incluídas, com o objetivo de estimar sua contribuição para a incerteza de medição da máquina, porém não foram consideradas

neste trabalho em virtude da dificuldade do seu controle, do aumento do tempo de teste e do custo da experimentação.

5.6 - DEFINIÇÃO DA CONDIÇÃO INICIAL DA MMC

A tabela 5 apresentada no capítulo 3 mostra o modelo do formato da organização dos dados das medições, para o estudo da variável posição, que analogamente foi aplicado para a variável estratégia de medição. Para a variável posição foram realizadas 108 medições, sendo 36 em cada posição. A peça possui doze dimensões e foram repetidas três vezes em cada posição, totalizando as 36 medidas.

Para a variável estratégia foram repetidos dois ensaios na posição 1, no primeiro ensaio para definir a reta, foram apalpados cinco pontos, denominado E1, e um ponto na parede oposta para composição da distância entre reta e um ponto, enquanto que no segundo ensaio, denominado E2, apenas dois pontos foram necessários para a definição da reta e novamente um ponto na parede oposta para a composição da distância. Para cada ensaio foram realizadas três repetições em cada dimensão do artefato padrão, totalizando 72 dimensões. Com o objetivo de minimizar ensaios e montagens, para a variável posição apenas a estratégia E1 foi aplicada.

Os ensaios para investigação da variável posição e estratégia serviram para definir um parâmetro inicial da condição da máquina. Este parâmetro inicial foi denominado como medição histórica, pois através dela é possível a comparação com o estado atual da máquina, que foi denominada de medição atual. É a partir da definição dos parâmetros iniciais que a MMC está pronta para ser submetida aos testes interinos de desempenho.

5.7 - APLICAÇÃO DOS TESTES INTERINOS DE DESEMPENHO NA MMC

Nesta etapa, a tomada de decisão a respeito da condição da MMC, foi baseada nos testes de hipóteses. Os testes foram aplicados para cada posição independentemente.

Assim como para a qualificação do estado inicial da MMC, a avaliação de desempenho seguiu as mesmas características, tanto no arranjo experimental quanto na montagem do artefato padrão nas três posições, e foi aplicado apenas a estratégia E1. Para causar uma avaria na máquina, foi utilizado uma ponta de trabalho de 3 mm de diâmetro nominal, mas com adição de uma camada de tinta sobre a superfície. Esta camada aumentou o diâmetro em aproximadamente 13 μm . Esse diâmetro calibrado pela máquina apresentou valor de 2,992 mm, já com a camada de tinta adicional.

As medições foram conduzidas conforme as orientações do item 5.3 deste capítulo, mas para que a máquina não compensasse a camada de tinta depositada na superfície da esfera, foi realizado apenas o passo número um deste capítulo com a sonda sem pintura de diâmetro 2,979 mm, calibrado pela máquina. A partir deste passo, as pontas foram trocadas, portanto, as etapas subsequentes foram concluídas com a ponta de 2,992 mm de diâmetro, inculindo um erro na medição devido à variação de diâmetro da ponta de contato.

5.8 - EXPERIMENTO COMPLEMENTAR ALTERNATIVO

A aplicação de técnicas tradicionais de medição do artefato padrão não foram muito favoráveis para as análises. Como o artefato escolhido tem a função de simular doze peças, e as dimensões apresentam uma defasagem entre si de 30 graus, devido a sua geometria dodecagonal, a MMC mediu de forma automática todas as dimensões em relação a uma orientação inicial, como descrita no passo 2 do item 5.3. Portanto, a máquina de forma automática foi contornando a peça, e medindo as retas e os pontos necessários para a composição das distâncias de 1 até 12, conforme ilustrado na figura 39. Essa metodologia de medição é normalmente aplicada cotidianamente na medição de peças. Este ensaio foi denominado de método padrão de medição, os resultados e a avaliação dos efeitos deste método estão apresentados e comentados no capítulo 6.

Como o arranjo experimental foi baseado no estudo de R&R e seguiu as diretrizes do MSA, que sugere no mínimo dez peças semelhantes, dois operadores e três repetições para cada medição, um novo ensaio complementar com essas mesmas características foi conduzido. Neste ensaio, diferentemente do método padrão que foi todo automático, este foi realizado de modo semiautomático. Como no ensaio anterior a máquina girou em torno da peça, embutindo na medição de cada dimensão as contribuições de diferentes erros de perpendicularidade, erros angulares, erros de posição e braço de Abbé, optou-se por realizar a medição das doze dimensões na mesma orientação da máquina, ou seja, após a medição de cada peça, o que corresponde a uma distância entre as paredes, uma parada no programa de medição foi inserida, para que o artefato padrão fosse girado afim de posicioná-lo na próxima dimensão a ser medida na direção de orientação, conforme ilustrado pela figura 40.

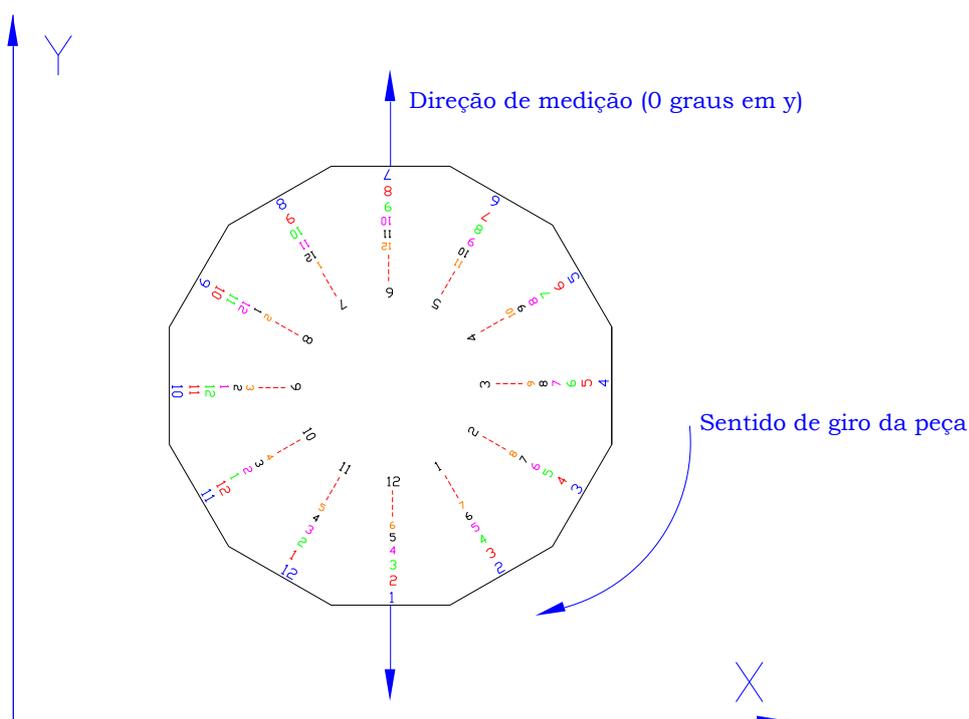


Figura 40 – Representação do método alternativo de medição

Assim como no ensaio utilizando o método padrão de medição, no ensaio alternativo as medições foram realizadas a 6 mm abaixo da superfície de referência, tanto para a coleta dos pontos para definição da reta, quanto para o ponto na parede oposta para compor a distância. No primeiro

método, o ponto coletado na parede oposta à reta foi realizado através de um único toque, enquanto que no segundo método foram apalpados três pontos na superfície, com o objetivo de definir um plano primeiro, para posteriormente de forma automática a MMC retorna na direção do vetor normal ao plano, a uma profundidade de 6 mm em relação ao plano de referência e na direção da linha de centro da peça, tocar o ponto.

Essa técnica faz com que o ponto seja sempre compensado na mesma direção, o que minimiza qualquer possibilidade de compensação do ponto em alguma direção desconhecida. Após a coleta dos pontos, o programa computacional os projeta no plano de referência, e através do método de mínimos quadrados é calculado a reta, para posteriormente definir uma distância perpendicular à reta calculada até o ponto coletado na parede oposta.

5.9 - PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS

Para um fácil entendimento, o estudo foi dividido em dois grupos para a análise. No primeiro, as medições foram realizadas pelo método padrão de medição e no segundo grupo foi aplicado o método alternativo de medição.

No grupo das medições realizadas pelo método padrão, dois subgrupos foram criados, avaliação inicial da máquina e avaliação de desempenho. Na avaliação inicial foi desenvolvido um estudo a respeito do comportamento da máquina, que foi denominada posteriormente de medições históricas. A partir desta análise, os parâmetros iniciais de desempenho foram definidos para o monitoramento futuro, em comparação com os resultados do estado atual, denominado de medições atuais. Nesta etapa foram investigadas as variáveis estratégia e posição. Para ambas as variáveis, a metodologia das medições foram as mesmas, bem como a forma da análise dos dados.

Foi aplicado um estudo padronizado de R&R e os dados organizados conforme a tabela 5, contida no capítulo 3, referente ao exemplo aplicado para descrição da ANOVA. Esta ferramenta estatística foi responsável em fornecer subsídios na tomada de decisão sobre as influências de cada uma

das variáveis na variabilidade do Sistema de Medição. Um modelo matemático que representa a contribuição de cada variável do experimento na variável resposta está apresentado na expressão 23. Nesta expressão, y_{ijl} é a resposta observada, μ é o efeito da média global, τ_i é o efeito do i -ésimo avaliador, β_j é o efeito da j -ésima peça, γ_l é o efeito da l -ésima repetição, $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre o avaliador i e a peça j , e ε_{ijl} é o resíduo ou erro aleatório

Nesta aplicação, a variável τ_i caracterizou a reprodutibilidade da máquina, que foi denominada em estratégia, quando o objetivo foi verificar estratégia de medição, em posição, quando o interesse foi observar a posição de medição dentro do volume de medição, e em medições históricas e atuais, para efeito de monitoramento interino do desempenho da MMC.

$$y_{ijl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_l + \varepsilon_{ijl} \quad \begin{cases} i=1,2,\dots,s \\ j=1,2,\dots,r \\ l=1,2,\dots,t \end{cases} \quad (23)$$

5.10 ANÁLISE DOS EFEITOS DAS VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS

A verificação dos efeitos das variáveis no comportamento dos erros de medição foi feita através da análise de variância para o método de medição padrão e alternativo. As estimativas das variâncias das variáveis experimentais foram obtidas pelos quadrados médios, e os testes F, juntamente com o valor - p foram usados como critério de seleção das variáveis significativas.

Os testes aplicados ao método padrão de medição teve três divisões de avaliação dos efeitos das variáveis. A primeira etapa consistiu em verificar o comprometimento e significância da variável estratégia de medição τ , na variabilidade do Sistema de Medição da MMC, a segunda etapa, ainda na fase de qualificação da máquina, a variável τ , relacionada à posição de medição, foi responsável para verificar a significância da influência desta variável quando o artefato padrão foi medido nas três posições, descritas na figura 39. E por fim, o monitoramento do

desempenho da MMC através da variável τ , medidas históricas, medição sem tinta na esfera de trabalho, e atuais, com a esfera pintada. Esta variável foi responsável em apresentar a variabilidade do Sistema de Medição da MMC após um período de tempo.

Similar ao ensaio do método padrão, o ensaio para o método alternativo realizado nas posições 1 e 3, foi conduzido. Também foi realizada a avaliação inicial da máquina, analisando o comprometimento da variável posição na variabilidade das medições, o que forneceu dados para compor as medições históricas para o monitoramento de desempenho da MMC. Na segunda e última etapa, o estudo das variabilidades entre medições históricas e atuais foi apresentado.

O estudo de R&R e o cálculo da variabilidade do Sistema de Medição, as influências das variáveis e o comprometimento de cada uma delas, tanto para o método padrão e alternativo de medição, foram realizados pelas técnicas da ANOVA. O exemplo apresentado no capítulo 3, foi desenvolvido em função do estudo da variável posição deste trabalho, analogamente a este exemplo, todos os demais estudos, seguiram o mesmo formato, com a substituição da variável posição por estratégia e medidas históricas e atuais.

CAPÍTULO 6

TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a apresentação dos aspectos teóricos e dos procedimentos dos cálculos, no capítulo anterior, cabe agora apresentar os resultados encontrados através da aplicação do método proposto em uma MMC do tipo Ponte Móvel, de operação semiautomática ou totalmente automatizada.

Todos os ensaios experimentais foram realizados mantendo a temperatura ambiente em 21,3 °C a 21,8 °C, com a umidade relativa do ar sendo 40% e 50%.

Para a máquina estudada, o sistema de sondagem da MMC do tipo Ponte Móvel utilizado foi qualificado com um único apalpador, disposto na direção vertical (eixo Z) e com esfera de trabalho de diâmetro nominal 3 mm. Na inicialização da máquina, os valores deste diâmetro foram determinados várias vezes, sendo que qualquer variação de diâmetro encontrada não deve influenciar as medidas das dimensões da peça padrão realizadas nos ensaios experimentais, para a medição denominada sem erro.

Outro ensaio com as mesmas características do anterior foi conduzido, chamado de medição com erro, onde além da esfera de medição possui diâmetro $13\ \mu\text{m}$ maior que do experimento anterior. Esta esfera foi recoberta com uma camada de tinta, afim de aumentar o seu diâmetro.

A apresentação dos resultados foi dividida em função do método proposto para avaliar a MMC. Os experimentos com o método proposto estão apresentados, analisados e discutidos.

6.1 AVALIAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS EMPREGANDO O MÉTODO PROPOSTO

O método proposto para a avaliação do desempenho de MMC foi conduzido através da realização de dois experimentos planejados para cada posição. O primeiro experimento denominado sem erro, teve sua montagem realizada na posição 1 da máquina como descrita no capítulo 5. Para cada posição, foi realizado um ensaio experimental com duas variáveis, que caracterizaram as estratégias E1 e E2 envolvidas na medição. Na estratégia E1 foram tocados cinco pontos para o cálculo da reta e nove para o cálculo do diâmetro do furo, enquanto que na E2, apenas dois pontos para reta e quatro pontos para o furo. Sucessivamente os ensaios foram conduzidos às posições 2 e 3.

No segundo experimento denominado com erro, foram realizados os ensaios igualmente ao primeiro, mas com a adição de um erro planejado no diâmetro da esfera de medição. Foi depositada uma camada de tinta na superfície da esfera de aproximadamente $0,010\ \text{mm}$, com objetivo de induzir um erro na medição. Para que o erro de medição desejado não fosse compensado pelo programa computacional, esta esfera não foi novamente qualificada. Os diâmetros das esferas de trabalho medidos pela MMC foram $2,979\ \text{mm}$ para a medição sem erro e $2,992\ \text{mm}$ para a esfera com erro.

A peça padrão escolhida dispõe de doze faces, o que possibilitou a realização de doze dimensões distintas de distância, além de um diâmetro

interno. Para todas as características medidas da peça, foram realizadas três repetições

A primeira etapa consistiu em medir as amostras e apresentar as médias e os desvios padrão das dimensões, seguido da caracterização do estudo, aplicando um teste de normalidade para as amostras, o estudo de R&R e o teste de igualdade entre as médias das dimensões da MMC para as condições previstas neste trabalho. Também estão apresentados neste capítulo os resultados do estudo denominado Com Erro, afim de caracterizar uma condição de não conformidade da MMC.

6.2 AVALIAÇÃO INICIAL DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS PROPOSTA NA POSIÇÃO 1

Em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelo projeto, um valor que indica o maior nível de qualidade aceitável para um produto ou serviço, o limite superior de controle é usado em conjunto com o limite inferior de controle para criar a gama de variabilidade para as especificações de qualidade, afim de permitir à manufatura o fornecimento de um nível ideal de excelência nas peças fabricadas.

A peça padrão foi confeccionada em aço inox pelos processos de fabricação de torneamento, de fresamento, e posteriormente foi submetida ao processo de lapidação e polimento. A Tolerância dimensional para os comprimentos medidos da peça padrão, foi estimada em função dos processos de fabricação e fixada em 0,035 mm, o que confere um ISO Tolerância IT7. Todos os valores apresentados a seguir estão de acordo com o SI de unidades e denotados em milímetros (mm).

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados das dimensões de comprimento da peça padrão que foram medidas na posição 1 da MMC, denominada Sem Erro (E1), pelo método padrão de medição.

Tabela 12 – Medições dimensionais em mm das amostras selecionadas sem erro (E1)

Peça	Med_1	Med_2	Med3_3	Média	D. Padrão	Amplitude
1	112,485	112,485	112,485	112,485	0,0000	0,0000
2	112,481	112,482	112,481	112,481	0,0006	0,0010
3	112,499	112,499	112,498	112,499	0,0006	0,0010
4	112,510	112,510	112,509	112,510	0,0006	0,0010
5	112,511	112,510	112,510	112,510	0,0006	0,0010
6	112,507	112,507	112,508	112,507	0,0006	0,0010
7	112,485	112,485	112,483	112,484	0,0012	0,0020
8	112,481	112,481	112,482	112,481	0,0006	0,0010
9	112,499	112,497	112,499	112,498	0,0012	0,0020
10	112,510	112,510	112,510	112,510	0,0000	0,0000
11	112,510	112,511	112,511	112,511	0,0006	0,0010
12	112,507	112,508	112,508	112,508	0,0006	0,0010
Média	112,499	112,499	112,499	112,499	0,0006	0,0011
Desvio Padrão	0,0123	0,0123	0,0125	0,0124	0,0003	0,0005
Amplitude	0,030	0,030	0,030	0,029	0,0012	0,0020
Amplitude total			0,030			

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados das dimensões de comprimento da peça padrão que foram medidas na posição 1 da MMC, pelo método padrão de medição, sem erro, da estratégia 2.

Tabela 13 – Medições dimensionais em mm das amostras selecionadas sem erro (E2)

Peça	Med_1	Med_2	Med_3	Média	D. Padrão	Amplitude
1	112,483	112,484	112,484	112,484	0,0006	0,0010
2	112,483	112,482	112,484	112,483	0,0010	0,0020
3	112,499	112,500	112,499	112,499	0,0006	0,0010
4	112,511	112,511	112,511	112,511	0,0000	0,0000
5	112,511	112,511	112,512	112,511	0,0006	0,0010
6	112,508	112,508	112,507	112,508	0,0006	0,0010
7	112,485	112,485	112,485	112,485	0,0000	0,0000
8	112,482	112,481	112,481	112,481	0,0006	0,0010
9	112,500	112,500	112,500	112,500	0,0000	0,0000
10	112,510	112,511	112,510	112,510	0,0006	0,0010
11	112,510	112,510	112,510	112,510	0,0000	0,0000
12	112,507	112,507	112,507	112,507	0,0000	0,0000
Média	112,499	112,499	112,499	112,499	0,0004	0,0007
Desvio Padrão	0,0123	0,0126	0,0123	0,0124	0,0003	0,0007
Amplitude	0,029	0,030	0,031	0,030	0,0010	0,0020
Amplitude total			0,031			

A figura 41 apresenta graficamente uma carta de controle Xbarra e uma carta R. A carta Xbarra compara a variação entre peças com as componentes de repetibilidade, enquanto a carta R é composta pelo controle das amplitudes que representam graficamente a consistência da estratégia de medição.

Na carta Xbarra, os pontos no gráfico representam a média de cada peça para cada estratégia de medição adotada, a linha central representa a

média geral $\bar{\bar{X}}$ de todas as medições das peças medidas pelas duas estratégias, e as linhas paralelas à média geral representam, os limites de controle superior e inferior (LSC e LIC), que foram baseados no número de medições em cada média e na estimativa de repetibilidade.

Como as peças escolhidas para um estudo de medição R&R devem representar toda a gama de peças possíveis, este gráfico idealmente exibirá falta de controle. É desejável observar mais variação entre médias de peças do que é esperado, quando comparado apenas pela variação de repetibilidade. Nos dados avaliados, muitos pontos estão acima ou abaixo dos limites de controle. Estes resultados indicam que a variação entre peças é muito maior que a variação do dispositivo de medição, que apresentou um valor da amplitude da repetibilidade da MMC de aproximadamente 0,002 mm.

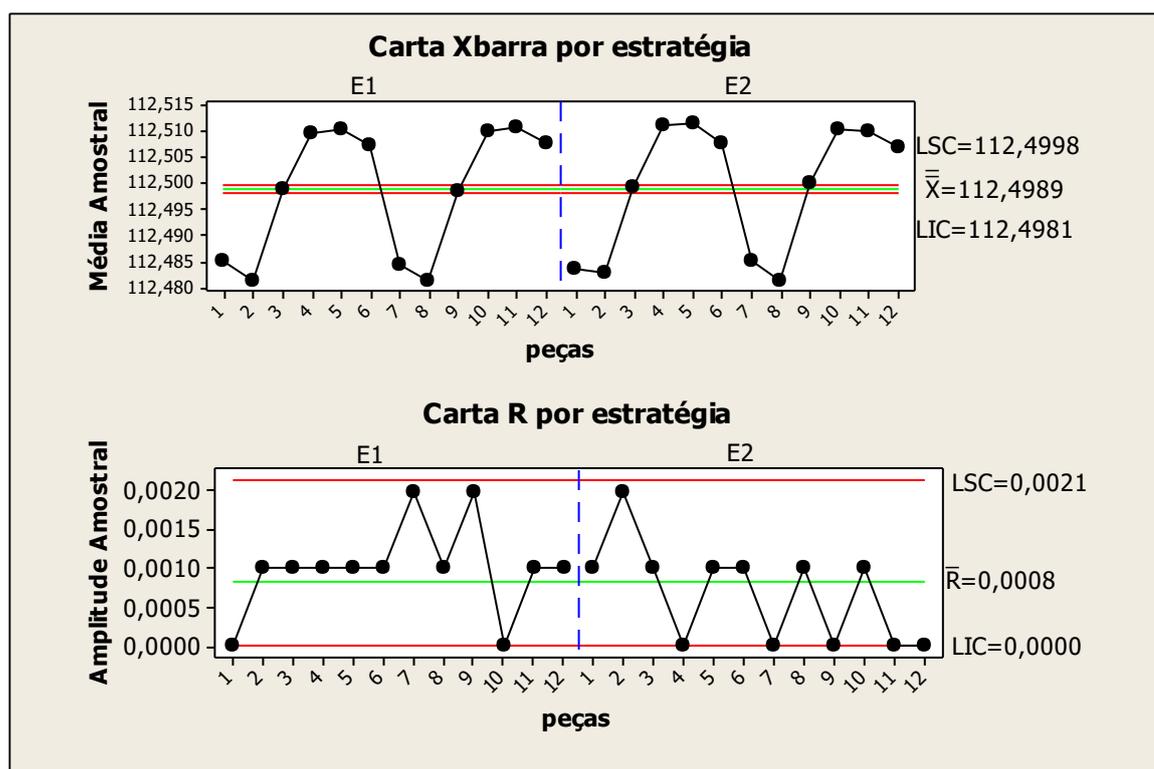


Figura 41- Carta Xbarra e Carta R por estratégia

A carta R apresentada na figura 41 os pontos graficamente para cada estratégia, demonstra a diferença entre a maior e menor medição de cada peça, possibilitando assim, a comparação da consistência de cada estratégia. A Linha central representa a média global das amplitudes,

representado pelo \bar{R} , e as linhas paralelas determinam os limites de controle LSC e LIC, calculados a partir da variação entre as duas estratégias.

O valor do LSC apresentado foi de apenas 0,002 mm, e nenhum ponto foi superior a esse limite, portanto é possível inferir que as duas estratégias estudadas estão medindo as peças de forma consistente, observado por essa análise.

A figura 42 apresenta o gráfico dos resultados das medições por estratégia do estudo. Os círculos pretos representam as médias e uma linha os conecta, enquanto que as linhas paralelas dentro dos blocos representam a mediana. Se a linha de conexão entre as médias for paralela ao eixo horizontal, significa que os operadores estão medindo as peças de forma similar, em média, senão, os operadores estão medindo as peças de forma diferente, em média.

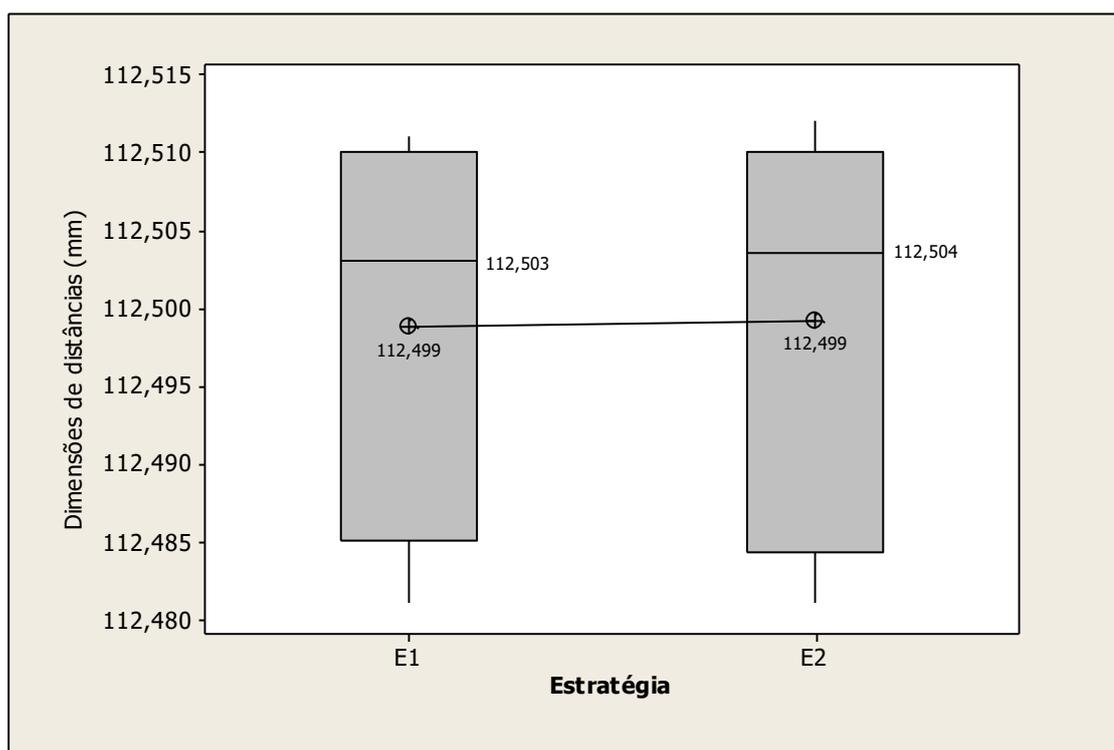


Figura 42- Valores médios para as duas estratégias

Esta é uma análise que também possibilita o questionamento de como está a dispersão das medições, se são semelhantes ou se existe variação nas medições de uma estratégia para outra.

Nessa comparação entre as médias das estratégias 1 e 2 que apresentaram valores iguais de 112,499 mm e mediana no valor de 112,503

mm para E1 e 112,504 mm para E2, é possível também verificar uma consistência das medições, por apresentarem variabilidade muito similares. Graficamente é possível concluir que nas duas estratégias, as médias apresentam valores iguais, apenas a distribuição obteve uma leve variação, o que demonstra que neste caso, as estratégias não influenciaram significativamente nos resultados das médias, pois apresentam aproximadamente a mesma variação.

No gráfico da figura 43 estão apresentados os resultados de todas as medições do estudo, organizados por peça, possibilitando analisar a dispersão das medições e a variabilidade das dimensões. Os círculos vazios paralelos ao eixo vertical representam as medições, enquanto que os asteriscos coloridos apresentam a média e a linha conecta as médias das medições para cada peça, afim de demonstrar o comportamento da tendência das variações do conjunto de peças medidos.

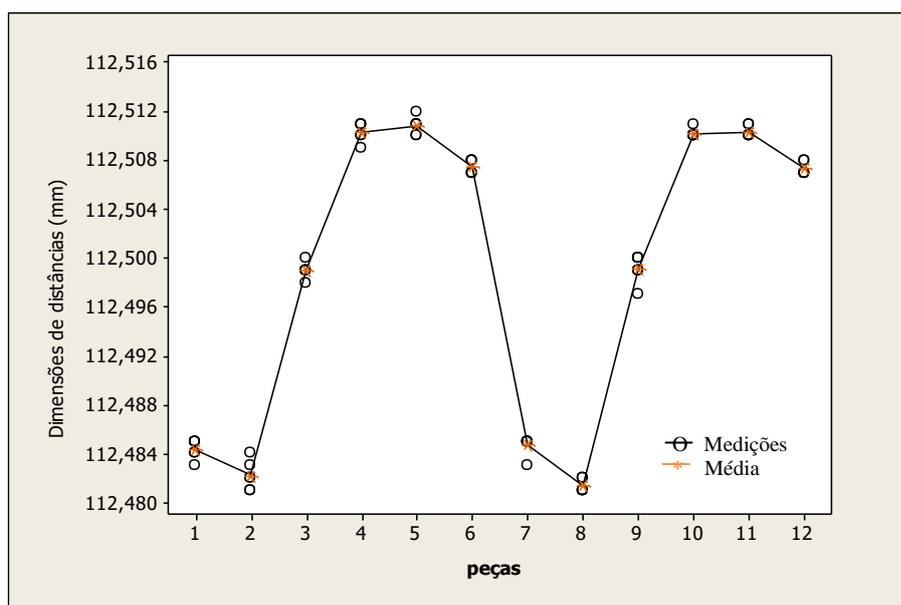


Figura 43– Medições organizadas por peças

A proximidade entre os círculos vazios demonstra que na maioria das peças ocorreu pouca variação entre as medições, conseqüentemente uma baixa amplitude entre os valores. Em contrapartida as médias de cada peça variam o suficiente para que as diferenças entre peças fiquem bem evidentes.

A figura 44 apresenta o gráfico que demonstra a interação entre as duas estratégias de medição utilizadas, através da demonstração das médias de cada peça. Para diferenciar o comportamento das estratégias utilizadas, linhas são conectadas entre as médias de cada peça, para cada estratégia.

Se as linhas forem quase idênticas, é possível inferir que as estratégias utilizadas estão medindo as peças de forma muito similar. Nos casos em que uma linha está claramente acima ou abaixo das outras, demonstra que existe diferença na consistência dos valores medidos entre as duas estratégias adotadas, e por fim, se a capacidade de cada estratégia adotada depende de qual peça está sendo medida, ou seja, as linhas não são paralelas, ou se cruzam, conclui-se que existe um forte indicio de interação entre as duas estratégias.

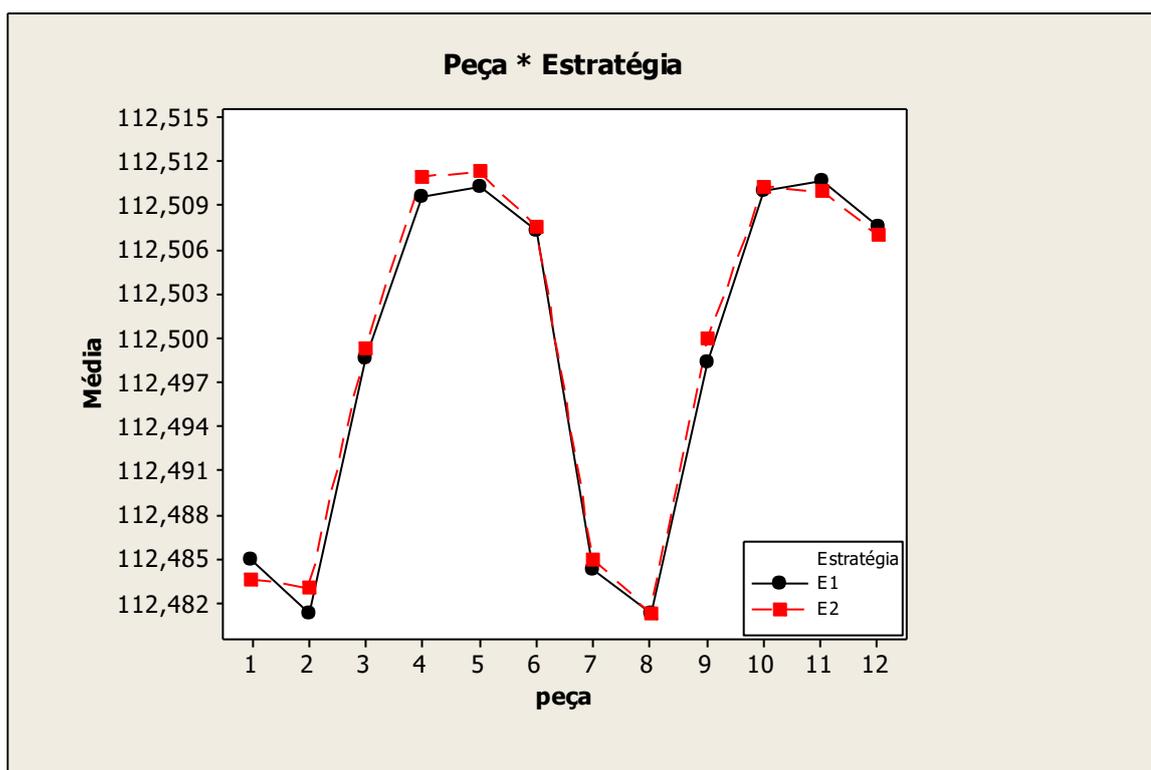


Figura 44– Interação entre Peça e Estratégia

Neste primeiro experimento, teve como objetivo principal, observar se os resultados medidos utilizando as estratégias E1 e E2 para as mesmas peças, apresentariam valores e comportamento semelhantes. Neste caso em que a MMC utilizada é automática e programável, as estratégias E1 e E2

tem o caráter de simular como sendo uma eventual troca de operadores. Notavelmente os resultados apresentados no gráfico da figura 44 demonstram que as estratégias E1 e E2 aparentam medir as peças de forma semelhante, quando a comparação se limita apenas devido aos valores das baixas amplitudes apresentadas entre as dimensões das mesmas peças.

Mas devido ao comportamento não paralelo de algumas linhas, e em dois casos, houve o cruzamento das linhas, esses fatos indicam que há indícios de que peças e estratégias possuam interação entre si, portanto, é necessária uma investigação mais cautelosa e profunda dos dados, com objetivo de avaliar qual o nível de sensibilidade desta variável no Sistema de Medição.

Como na estratégia E1 foram tomados cinco pontos na superfície que determinam a reta para compor a distância entre reta e ponto, e na estratégia E2, apenas dois pontos foram coletados para determinar a mesma reta, este fato reforça que dependendo da peça medida, a estratégia tem influência significativa no resultado.

Essa interação entre peça e estratégia é possível também evidenciar através dos resultados obtidos na análise de variância apresentados na tabela 14. Um teste de hipótese foi aplicado para um nível de significância $\alpha=0,05$. A hipótese nula H_0 representa que não existe interação entre peça e estratégia, e a hipótese alternativa H_1 , representa não existir interação entre peça e estratégia. O valor-p da interação apresentado é de 0,000, o que indica rejeitar a hipótese H_0 , e aceitar a hipótese H_1 , atesta que ocorreu a interação entre peça e estratégia de medição ao nível de significância α igual a 0,05.

Tabela 14 - ANOVA com dois fatores de interação

Fonte	GL	SQ	SQM	F	P
Peça	11	0,0100758	0,0009160	669,861	0,000
Estratégia	1	0,0000031	0,0000031	2,285	0,159
Peça VS Estratégia	11	0,0000150	0,0000014	3,938	0,000
Repetibilidade	48	0,0000167	0,0000003		
Total	71	0,0101107			

Outra análise ainda mais aprofundada está apresentada na tabela 15, agora sem a interação entre peça e estratégia, onde é possível comparar o grau de comprometimento de cada fonte relacionado ao nível de significância α 0,05 e 0,01. Nesta análise de variância é possível identificar que a maior variação do processo de medição se dá devido à variação da peça, que apresentou um altíssimo valor do F estatístico de 1648,29, que independentemente do nível de significância adotado, encontra-se muito acima do valor do F crítico. Este valor limita a área na região de aceitação ou rejeição dos dados sob a curva de distribuição F, de acordo com os graus de liberdade.

No caso da repetibilidade, o valor F estatístico apresentado de 0,02 comprova novamente a eficiência da máquina, que para ambos os valores de α , este valor ficou localizado na região de aprovação sob a curva de distribuição dos dados, demonstrando assim uma alta repetibilidade da máquina. Por fim, a estratégia de medição adotada se mostrou mais sensível a essa análise, onde o valor do F estatístico de 5,62 apresentado, aproximou-se muito do F crítico de valor 7,08, para o nível de significância α igual a 0,01, e em contrapartida, o F estatístico se mostrou superior ao F crítico para o nível de significância α 0,05 que apresentou valor igual a 4,00. Portanto, a estratégia de medição é uma variável que requer um maior cuidado ao ser estudada, por influenciar diretamente na reprodutibilidade da máquina.

Tabela 15 - ANOVA com dois fatores sem de interação para as duas estratégias

Fonte	GL	SQ	SQM	F_{estatístico}	F_c α = 0,05	F_c α = 0,01	P - Valor
Peça	11	0,0100758	0,0009160	1648,29	$F_{[11,57]} = 1,92$	$F_{[11,57]} = 2,50$	0,000
Estratégia	1	0,0000031	0,0000031	5,62	$F_{[1,57]} = 4,00$	$F_{[1,57]} = 7,08$	0,021
Repetib.	2	0,0000000	0,0000000	0,02	$F_{[2,57]} = 3,15$	$F_{[2,57]} = 4,98$	0,975
Erro	57	0,0000317	0,0000006				
Total	71	0,0101107					

O fato de ocorrer interação entre peça e estratégia de medição, no caso de medições de distâncias, se dá pelo fato que na medição da parede, houve variação do número de pontos coletados para cálculo da reta em E1

e E2, portanto qualquer variação do erro de retitude apresentado em alguma parede da peça, favorece a mudança de posição da reta ajustada por mínimos quadrados, conseqüentemente distâncias diferentes entre reta e ponto são obtidas. Além das características físicas da peça, a sensibilidade da variável estratégia demonstrada pela análise de variância na tabela 15 corrobora para essa interação. Essas ocorrências evidenciam a necessidade de considerações cautelosas quanto à escolha do número de pontos a serem coletados, pois um bom ajuste de reta depende diretamente do desvio de forma da parede da peça a ser medida.

Nas tabelas 16 e 17 estão apresentados os valores relacionados ao diâmetro interno de valor nominal 84,500 mm da E1 e E2, respectivamente. Os resultados mantiveram um comportamento estável, não aparentando indícios que a diminuição do número de pontos coletados seja o fator de representatividade, exceto nas direções X e Y da E2, onde ocorreu a diminuição dos valores de posição do centro do círculo. O que provavelmente aconteceu neste fato, é que, os cinco pontos coletados para esta medição não serem suficiente para atingir a distribuição máxima dos desvios de circularidade.

Como o ajuste do círculo é calculado pelo método dos mínimos quadrados, onde o resultado é um elemento médio, calculado a partir de todos os pontos disponíveis na medição, de tal forma que o somatório quadrático dos desvios residuais de cada ponto ao elemento ajustado é o menor possível, a posição do deslocamento do centro em E1 é maior, possivelmente, devido ao desvio de circularidade alcançado em E1 ter sido maior que em E2, 0,018 mm e 0,016 mm, respectivamente.

Na Tabela 16 estão apresentados os resultados das medições do diâmetro interno da peça padrão que foram medidas na posição 1 da MMC, medição sem erro (E1).

Tabela 16 – Medições do diâmetro interno em mm da peça padrão sem erro (E1)

Réplicas	Med_1	Med_2	Med_3	Média	D. Padrão	Amplitude
Posição X	-0,006	-0,006	-0,007	-0,006	0,0006	0,001
Posição Y	-0,005	-0,006	-0,005	-0,005	0,0006	0,001
Diâmetro	84,533	84,532	84,533	84,533	0,0006	0,001

A Tabela 17 estão apresenta os resultados das medições do diâmetro interno da peça padrão obtidos na posição 1 da MMC, medição com erro (E2).

Tabela 17 – Medições do diâmetro interno em mm da peça padrão com erro (E2)

Réplicas	Med_1	Med_2	Med_3	Média	D. Padrão	Amplitude
Posição X	-0,005	-0,005	-0,005	-0,005	0,0000	0,000
Posição Y	-0,002	-0,002	-0,003	-0,002	0,0006	0,001
Diâmetro	84,531	84,532	84,532	84,532	0,0006	0,001

A tabela 18, extraída do estudo de R&R, apresenta as fontes responsáveis pela variação do Sistema de Medição e as componentes da variância. O estudo também disponibilizou através do cálculo da ANOVA, a contribuição baseada na estimativa dos componentes da variância percentual e individual, de cada variável envolvida no processo de medição. Para este estudo, foi atribuída uma tolerância de fabricação IT7 no valor de 0,035 mm para as medições de distância.

De acordo com os parâmetros sugeridos pela AIAG, em que variações do Sistema de Medição abaixo de 10% são considerados aceitáveis, de 10% a 30% pode ser aceito em algumas aplicações, e por fim, acima de 30% inaceitáveis, é possível inferir através do percentual total do estudo de 0,48% apresentado na tabela 18, que o Sistema de Medição é um sistema capaz. Como o foco do estudo é o Sistema de Medição, a contribuição de 99,52% proporcionada pelas peças é irrelevante, porque a variabilidade entre as peças não é uma preocupação principal neste estudo.

Tabela 18 – Porcentual do estudo R&R para as duas estratégias

Fonte	% Contribuição
Total do Estudo R&R da Medição	0,48
Repetibilidade	0,23
Reprodutibilidade	0,25
Estratégia	0,03
Estratégia vs Peça	0,22
Peça a Peça	99,52
Varição Total	100,00

Devido à baixa contribuição de 0,23% da MMC na variabilidade das medidas, o estudo de R&R atestou uma alta confiabilidade do Sistema de Medição ao nível de confiança de 95%, quando realizadas medições das dimensões lineares do artefato padrão na posição 1. Nas medições do diâmetro interno, medições multidirecionais, a máquina também demonstrou uma boa repetibilidade, devido aos baixos valores de amplitudes apresentados, e conseqüentemente, apresentou mínimos valores para os desvios – padrão.

6.3 AVALIAÇÃO INICIAL DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS NAS TRÊS POSIÇÕES PROPOSTAS

Todas as análises realizadas anteriormente, comprovaram que a MMC possui um desempenho adequado para as tolerâncias atribuídas ao artefato padrão na posição 1. Analogamente ao ensaio anterior, que estudou juntamente com a repetibilidade, as estratégias aplicadas na medição, os resultados a seguir têm objetivo em avaliar se também nas posições 2 e 3, a MMC se mantém consistente medindo as mesmas características do padrão.

Como os resultados anteriores comprovaram a necessidade de critérios cuidadosos ao escolher a estratégia de medição devido à sensibilidade observada na E2, medição com menos pontos de apalpagem, e também devido aos erros de forma presentes no artefato padrão, o ensaio a seguir foi conduzido aplicando apenas a estratégia E1, medição sem erro. Os dados destas medições estão contidos no anexo D.

A carta de controle Xbarra apresentada na figura 45 que compara a variação entre peças com as componentes de repetibilidade, novamente exibiu uma falta de controle, fato esperado em função da grande variação das dimensões das peças em relação à repetibilidade da MMC. Estes dados demonstraram muitos pontos acima e abaixo dos limites de controle, o que indicam que a variação entre peças é muito maior que a variação do dispositivo de medição. O gráfico demonstra ainda uma certa semelhança

entre as curvas nas posições 1, 2 e 3, respectivamente P1, P2 e P3, mas com uma certa variação de posição entre elas. Este fato não comprometeu a repetibilidade dos valores médios das dimensões, que se manteve estável na ordem de 0,0023 mm.

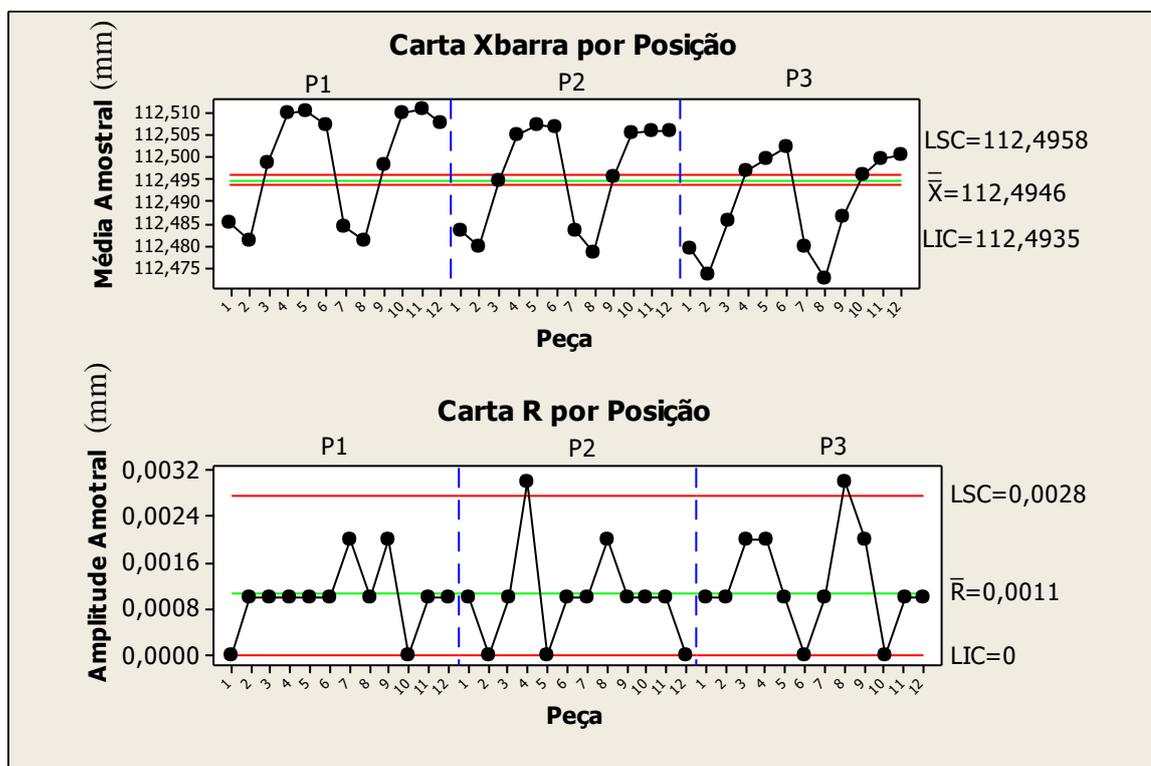


Figura 45– Carta Xbarra e Carta R por posição

Na carta R apresentada na figura 45, os pontos demonstram graficamente para cada posição, a diferença entre a maior e a menor medição de cada peça, possibilitando assim, a comparação da consistência de cada posição.

O valor do LSC apresentado de 0,0028 mm continua sendo um valor pequeno e apenas um ponto da posição P2 e um da P3 encontra-se acima do LSC. Isso indica que nas três posições escolhidas sobre o desempenho, o resultado das medições realizadas pela máquina são consistentes.

O diagrama de caixas dos resultados das médias das medições do estudo, organizados por posições, demonstrado na figura 46, possibilita observar que a dispersão dos valores obtidos em cada posição não são semelhantes, em virtude da variação dos tamanhos das caixas, dos limites inferiores e superiores alcançados pelos dados, e por fim, em função das retas que interligam as médias que não estão paralelas, indicando assim

uma diferença entre as médias que pode ser considerável. A significância desta variação ficará mais evidente, logo abaixo na apresentação da análise gráfica e na análise de variância para as interações entre médias das dimensões das peças e as três diferentes posições, à um nível de confiança de 95%.

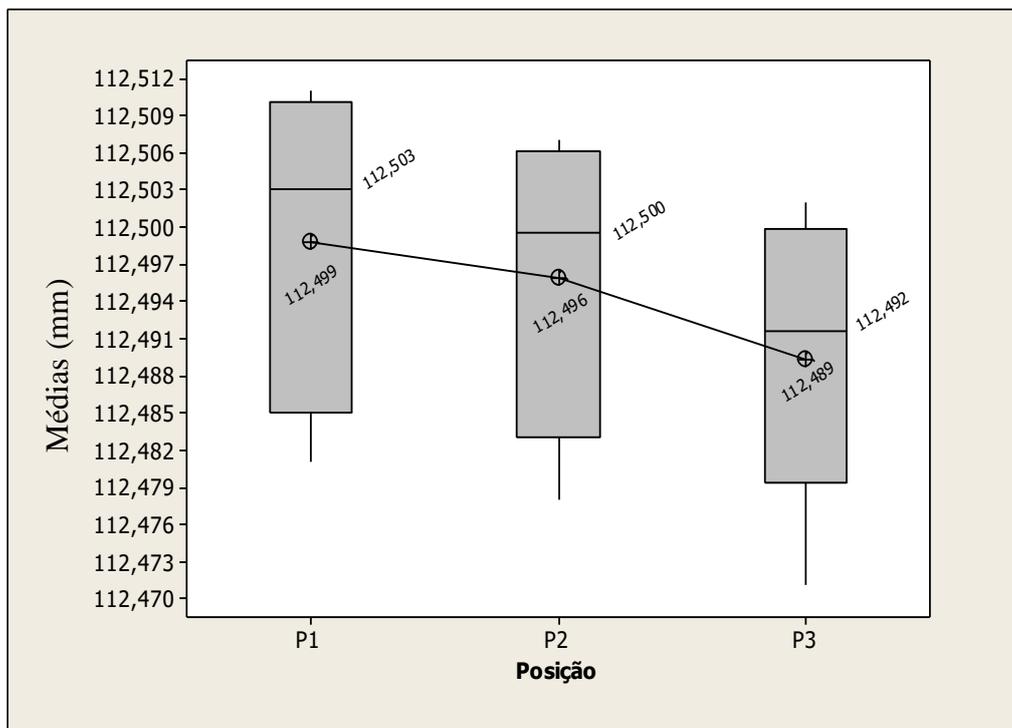


Figura 46- Valores médios das peças para as três posições

Esta etapa do experimento tem por objetivo analisar se nas três posições no volume da máquina escolhidos, os valores apresentados têm comportamento semelhantes e se são iguais estatisticamente. Como a MMC utilizada é automática e programável, nas três posições, todas as medições foram programadas em relação ao mesmo alinhamento, a fim de garantir que os pontos apalpados nas paredes da peça, mantivessem nas mesmas alturas e mesmas posições em relação ao alinhamento inicial.

Na figura 47 está apresentado o gráfico que demonstra as curvas referentes às médias de cada peça medida nas três posições da máquina. Nesta análise é possível observar claramente o deslocamento para baixo da curva na posição 3, este deslocamento mostra que existe diferença na consistência dos valores medidos das posições 1 e 2 em relação à posição 3. Mas como diferença observada no gráfico entre as posições 1 e 2 é sutil

em relação à posição 3, o que impossibilita inferir se esta diferença é ou não suficiente para afirmar que existe interação da dimensão medida, em relação à posição escolhida na máquina, a análise de variância apresentada na tabela 19 esclarece qualquer dúvida de interpretação.

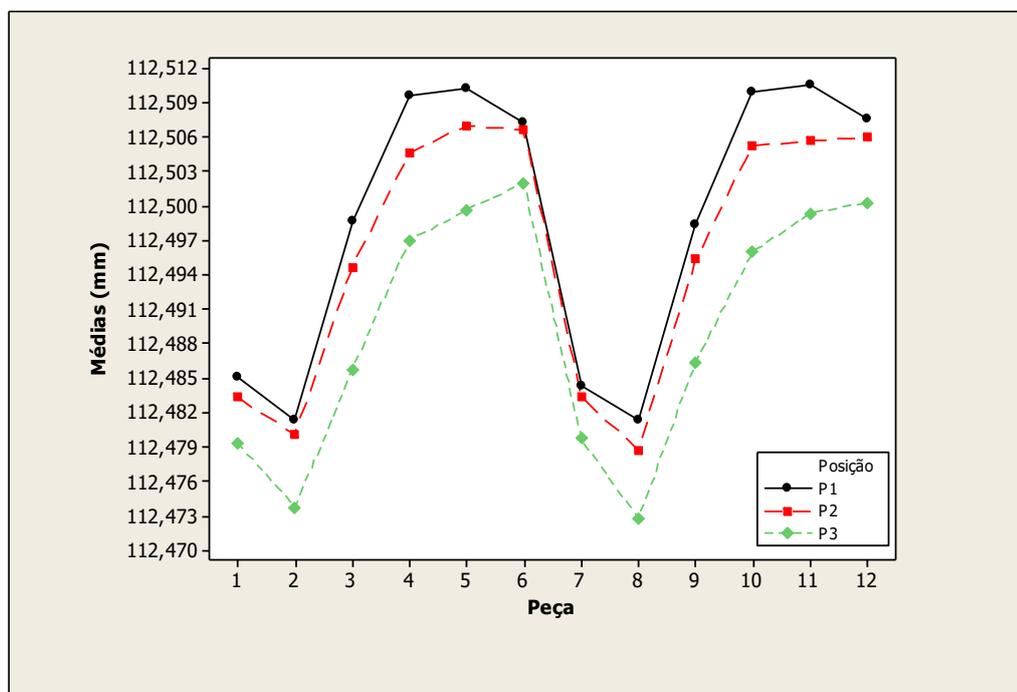


Figura 47- Interação entre Peça e Posição

Como graficamente não foi suficiente para tomada de decisão a respeito da interação entre peça e posição, a tabela 19 apresenta uma análise de variância para um nível de significância α de 0,01 e 0,05. Tanto para a peça quanto para a posição de medição na máquina, a hipótese nula H_0 , foi rejeitada, o que indica relevância nas variações advindas dessas duas variáveis. Como a peça foi estudada anteriormente, e foi visto que dela provém a maior variação, esta etapa tem como foco estudar a variável posição. O valor do F estatístico de 346,48 é muito superior aos valores do F calculados tanto para α de 0,01 e 0,05, o que indica uma forte contribuição provinda da posição de medição escolhida na máquina.

A repetibilidade da máquina mostrou valor F estatístico de 0,36, caracterizando assim mais uma vez que a repetibilidade da MMC é constante independentemente das três posições avaliadas. Analogamente ao ensaio das estratégias, a posição de medição no volume de trabalho da máquina representou, os resultados das medições da mesma peça

efetuadas sob condições variadas de medição, portanto, ao contrário da repetibilidade, a reprodutibilidade da MMC se mostrou deficiente para este ensaio, que apresentou valor do F estatístico de 346,48 e Valor P de 0,000.

Tabela 19 - ANOVA com dois fatores sem interação para as três posições

Fonte	GL	SQ	SQM	F_{estatístico}	F_{c α = 0,05}	F_{c α = 0,01}	P - Valor
Peça	11	0,0132516	0,0012047	496,75	F _[11,92] = 1,83	F _[11,92] = 2,34	0,000
Posição	2	0,0016805	0,0008403	346,48	F _[2,92] = 3,07	F _[2,92] = 4,79	0,000
Repetib.	2	0,0000017	0,0000009	0,36	F _[2,92] = 3,07	F _[2,92] = 4,79	0,702
Erro	92	0,0002231	0,0000024				
Total	107	0,0151569					

A tabela 20 extraída do estudo de R&R, possibilita a análise da contribuição individual de cada variável na variação total do sistema da MMC. O total do estudo R&R alcançado de 16,51%, sendo 16,17% para a reprodutibilidade, ou seja, a posição adotada, e 0,34% para a repetibilidade, enquadra o estudo na faixa que varia entre 20% a 30% na tabela de critérios de aceitação para o estudo R&R. De acordo com esses parâmetros sugeridos pela AIAG, quando o Sistema de Medição se encontra nessa faixa de classificação, o Sistema de Medição pode ser aceito, dependendo da importância da medição.

Tabela 20 – Porcentual do estudo R&R para as três posições

Fonte	% Contribuição
Total do Estudo R&R da Medição	16,51
Repetibilidade	0,34
Reprodutibilidade	16,17
Posição	16,17
Posição vs Peça	1,66
Peça a Peça	83,49
Variação Total	100,00

Uma análise estatística que compara as médias globais das três posições, está apresentada na tabela 21. Para esta análise de variância foi aplicado um nível de confiança de 95%.

Tabela 21 – ANOVA para comparação entre as médias das três posições

Fonte	GL	SQ	SQM	F _{estatístico}	F _{c α = 0,05}	F _{c α = 0,01}	P - Valor
Posição	2	0,001681	0,000840	6,55	F _[2,105] = 3,07	F _[2,105] = 2,34	0,002
Erro	105	0,013476	0,000128				
Total	107	0,015157					

O valor do F estatístico calculado de 6,55 para as médias das dimensões medidas em cada posição, demonstrou estar acima do valor F calculado para α igual a 0,05 e α igual a 0,01, acompanhado do valor P de 0,002, o que implica em rejeitar a hipótese nula. Isto representa que as médias nas três posições não são iguais estatisticamente. Mas também foi realizado a mesma análise fazendo a comparação das três posições agrupadas aos pares. O resultado deste agrupamento, mostrou que a posição 1 e a posição 2 são estatisticamente iguais, isto é, pertencem ao mesmo grupo, conforme tabela 22, grupo A, enquanto que a posição 3 mostrou não ser igual estatisticamente.

Tabela 22 – Agrupamento das posições

Agrupamento	Posição	N	Média (mm)	D.P (mm)		
Grupo A	P1	36	112,499	0,012	(--*--)	
Grupo A	P2	36	112,496	0,011	(---*--)	
Grupo B	P3	36	112,489	0,011	(--*--)	
			112,488	112,500	112,512	112,524

Como o objetivo deste trabalho é propor um método de calibração interino, rápido e que não cause dúvidas a quem aplicá-lo, um novo teste com blocos - padrão foi aplicado à mesma dimensão nominal, mesmas condições ambientais, mesmas características de medição, mesma estratégia e as mesmas posições na máquina, a fim de verificar qual posição apresenta valor similar ao padrão. Para esta montagem, foram necessários apenas dois blocos – padrão para compor o comprimento de 112,500 mm, um bloco de 100 mm e outro bloco de 12,500 mm, referente ao valor nominal do comprimento do artefato padrão definido nos ensaios anteriores.

A tabela 23 apresenta os valores médios, os desvios – padrão e as amplitudes das medições do bloco padrão e da dimensão 1 do artefato

padrão, ambas medidas nas mesmas orientações da máquina, ou seja, alinhada na direção do eixo y.

Tabela 23 – Medições do Bloco padrão

Posição	Peça	Média(mm)	Desvio Padrão (mm)	Amplitude (mm)
Posição 1	Bloco Padrão	112,505	0,0006	0,002
	Artefato Padrão	112,485	0,0006	0,001
Posição 2	Bloco Padrão	112,501	0,0006	0,002
	Artefato Padrão	112,483	0,0006	0,001
Posição 3	Bloco Padrão	112,500	0,0005	0,002
	Artefato Padrão	112,479	0,0006	0,000

Apesar da tabela 23 evidenciar a igualdade estatística das posições 1 e 2, a medição com os blocos - padrão, aferiu que na posição 3 é a localização na MMC onde os resultados das medições mais se aproximam do valor Real. Como a posição 3 está mais próxima da escala do eixo Y, conseqüentemente teve uma menor incidência do braço de Abbè, possivelmente sofreu menos a influência deste erro. Em contrapartida, nas posições 1 e 2, o centro do artefato padrão foi posicionado no desempenho da máquina com as mesmas distâncias na direção X, conseqüentemente, alinhadas com o eixo Y, portanto, influenciadas pelo mesmo comprimento do braço de Abbè, o que pode ser indício de apresentarem certa semelhança.

6.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS NA POSIÇÃO 1

O teste denominado teste de hipótese, é um dos métodos estatísticos utilizado na tomada de decisão. Uma hipótese é simplesmente uma afirmação de que alguma coisa é verdadeira. O teste de hipótese aplicado nesta série de ensaios, tem como o objetivo, decidir qual providência adotar a respeito de uma eventual intervenção na MMC, seja uma possível readequação nas tolerâncias designadas pelo projeto, ou até mesmo uma possível parada para reavaliação da máquina.

Tipicamente existem duas hipóteses em um teste de hipótese. Uma delas é chamada de hipótese nula e a outra de hipótese alternativa. A

hipótese nula adotada, H_0 , é de que as médias das medidas do artefato padrão do ensaio inicial apresentado no item 6.3 são iguais estatisticamente às médias das medidas realizadas a cada teste interino aplicado na MMC, já a hipótese nula é de que as médias não são iguais estatisticamente. Esta análise foi aplicada individualmente para cada posição da MMC, devido à grande contribuição na variação dos resultados proveniente da reprodutibilidade, quando a variável posição foi alterada.

Na tabela 24 estão apresentados para cada peça medida na posição 1, os valores históricos das médias, amplitudes e desvios – padrão, que caracteriza a MMC na condição de máquina dentro do desempenho previsto e os valores atuais das médias, amplitudes e desvios – padrão, que caracterizam a MMC com alguma avaria no Sistema de Medição. Também estão denotados os valores gerais das médias, das médias das amplitudes e dos desvios – padrão.

Tabela 24 – Dados amostrais para o teste interino (mm)

Peças	Média Histórica	Média Atual	Amplitude Histórica	Amplitude Atual	D. Padrão Histórico	D. Padrão Atual	Amplitude das Médias
1	112,485	112,493	0,0010	0,0010	0,0000	0,0006	0,0083
2	112,481	112,497	0,0010	0,0010	0,0006	0,0006	0,0153
3	112,499	112,509	0,0010	0,0010	0,0006	0,0006	0,0100
4	112,510	112,520	0,0010	0,0010	0,0006	0,0006	0,0100
5	112,510	112,521	0,0010	0,0020	0,0006	0,0010	0,0107
6	112,507	112,519	0,0010	0,0010	0,0006	0,0006	0,0113
7	112,484	112,492	0,0020	0,0030	0,0012	0,0015	0,0080
8	112,481	112,496	0,0010	0,0030	0,0006	0,0015	0,0143
9	112,498	112,510	0,0020	0,0010	0,0012	0,0006	0,0113
10	112,510	112,520	0,0000	0,0010	0,0000	0,0006	0,0103
11	112,511	112,520	0,0010	0,0010	0,0006	0,0006	0,0097
12	112,508	112,520	0,0010	0,0010	0,0006	0,0006	0,0120
Média	112,499	112,510	0,0011	0,0014	0,0006	0,0008	0,0109
Desvio Padrão	0,0123	0,0116	0,0125	0,0008	0,0003	0,0002	0,0025
Amplitude	0,0300	0,0290	0,002	0,0020	0,0012	0,0001	0,0080

Ao longo da medição, os valores das amplitudes de cada peça se mantiveram constante em sua maioria, conforme apresentado no gráfico de

amplitudes de cada dimensão, da figura 48. A máxima amplitude no valor de 0,003 mm, foi observada na medição das peças 7 e 8, chamada de amplitude atual. Esta variação mesmo que mínima, provavelmente deve ter sido proveniente da não uniformidade da camada de tinta depositada na superfície da esfera de trabalho utilizada na medição atual. É importante ressaltar que a esfera de trabalho utilizada nesta medição de diâmetro 2,992 mm, não foi qualificada pela MMC, portanto qualquer erro de esfericidade gerado pela tinta depositada, não foi calculada pela máquina. Este valor de amplitude indica que a repetibilidade da máquina para os dois ensaios está em conformidade com os ensaios iniciais.

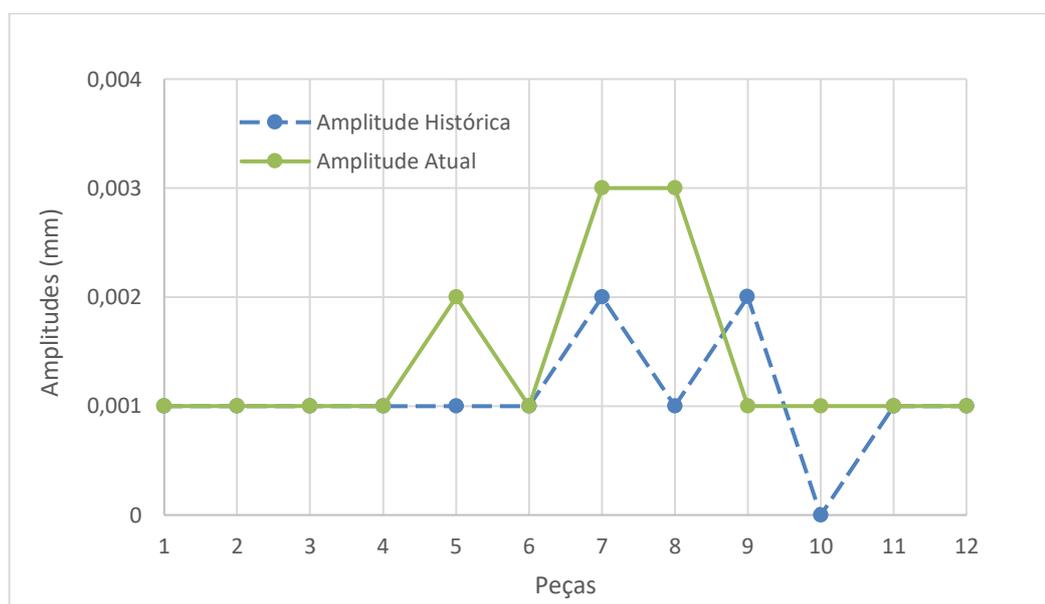


Figura 48 – Amplitude das médias de cada peça na P1

O gráfico das médias dos dois ensaios, históricos e atuais, da figura 48, mostra que existe diferença entre as médias das peças para os dois ensaios. É importante novamente ressaltar que a esfera de trabalho qualificada pela máquina possui diâmetro de 2,979 mm. Foram realizadas com esta esfera as medições para obtenção dos dados históricos.

Para a medição dos dados atuais, com objetivo de simular um teste interino de desempenho da MMC, foi utilizada uma esfera com diâmetro de 2,992 mm, que não foi qualificada pela máquina quando realizada as medições. Portanto, a variação de diâmetro de valor 0,013 mm e os possíveis erros de forma introduzidos pela camada de tinta na superfície da esfera,

não foram identificados pela máquina. As médias dos resultados obtidos estão apresentadas na figura 49.

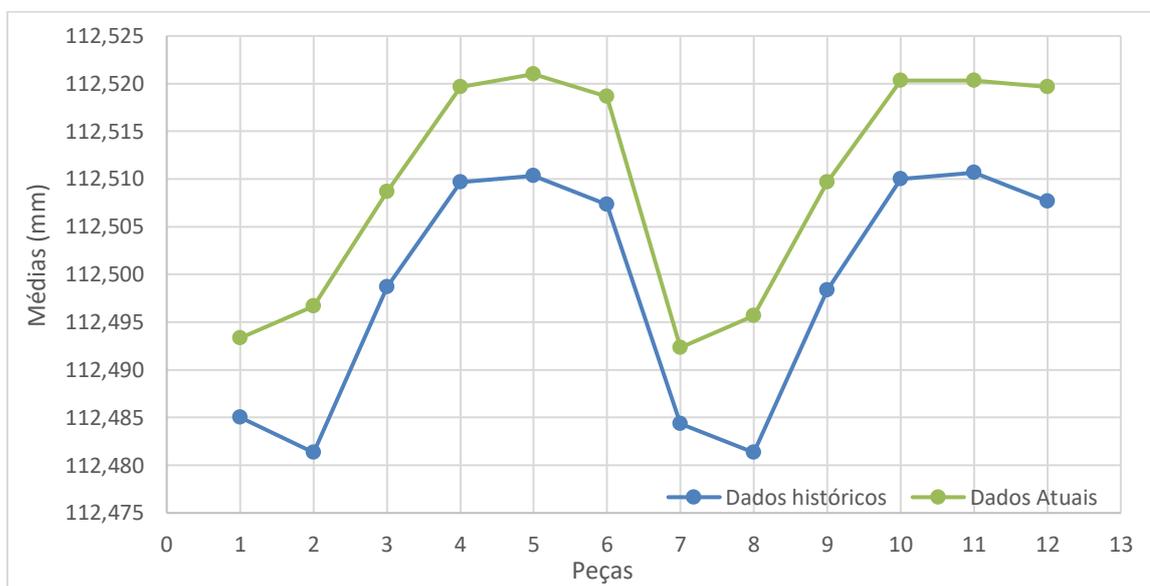


Figura 49– Médias dos dados Históricos e Atuais na P1

Para um melhor entendimento e clareza na apresentação das médias, o gráfico das amplitudes das comparações entre as médias está apresentado na figura 50. Os valores das amplitudes variaram aproximadamente entre 0,008 mm e 0,015 mm, com média de 0,011 mm. Os maiores valores das amplitudes foram observados nas peças 2 e 8, cuja direção de medição é a mesma na MMC, têm uma possível causa na não uniformidade da espessura da camada de tinta depositada na superfície da esfera de medição.

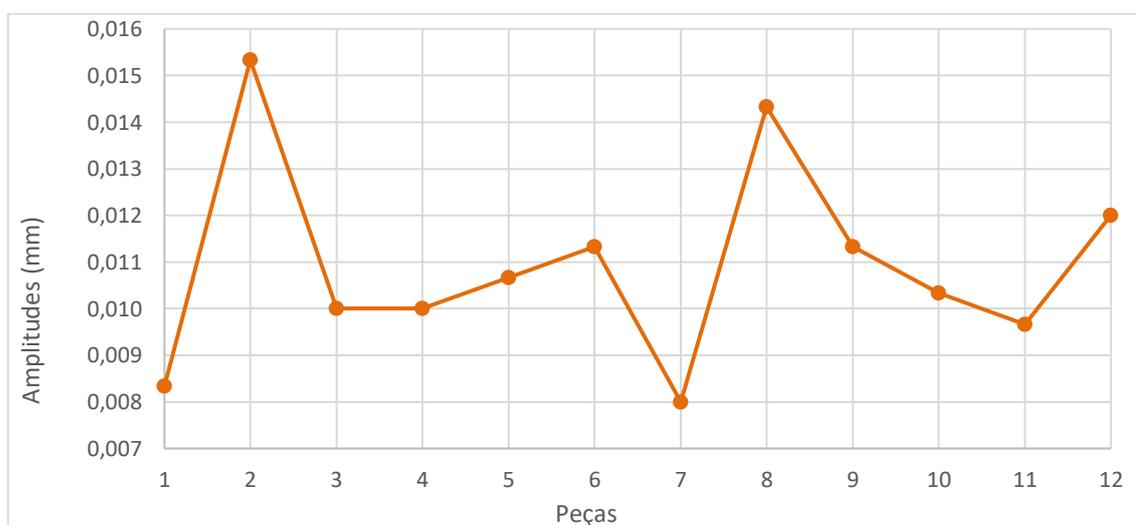


Figura 50 – Amplitudes entre as médias Históricas e Atuais medidas na P1

A tomada de decisão sobre qual providência adotar a respeito da continuidade ou não das medições executadas pela MMC é de alto grau de responsabilidade e complexidade, por envolver não só o Sistema de Medição, mas também o processo de fabricação outrossim a área de projeto, em caso de adequação das tolerâncias. Portanto, se faz necessário a realização de uma análise de variância com o objetivo em conhecer o comportamento da variável reprodutibilidade da máquina, para os dados históricos e Atuais.

A tabela 25 apresenta o cálculo da ANOVA para os níveis de significância α no valor de 0,05 e 0,01, respectivamente. O valor do F crítico de 0,75 e o valor P de 0,477 apresentados e em conformidade com o gráfico 48 que mostrou baixos valores de amplitudes de cada peça, indicam que a repetibilidade da MMC para os dois ensaios, foram mantidos. Em contrapartida, a reprodutibilidade apresentou o valor do F crítico de 1197,43 e o valor P de 0,000, que independentemente do nível de confiança adotado 95% ou 99%, o F crítico se encontra muito acima do valor F calculado. Esta variável é de extrema relevância para este ensaio, tendo em vista que o fator de decisão e tomada de providência, se dará através desta interpretação.

O teste de hipótese realizado, declina para uma alta relevância da variável reprodutibilidade, que apresentou valor P igual a 0,000, enquanto a repetibilidade se manteve estável em todos os ensaios e novamente demonstrou um valor P - valor bem acima de 0,05, como indicado na tabela 25.

Tabela 25 – ANOVA para os dados Históricos e Atuais

Fonte	GL	SQ	SQM	F_{estatístico}	F_c α = 0,05	F_c α = 0,01	P-Valor
Reprodutibilidade	1	0,0021561	0,0021549	1197,43	$F_{[1,57]} = 4,00$	$F_{[1,57]} = 7,08$	0,000
Peça	11	0,0096699	0,0008786	488,22	$F_{[11,57]} = 1,92$	$F_{[11,57]} = 2,50$	0,000
Repetibilidade	2	0,0000027	0,0000013	0,75	$F_{[2,57]} = 3,15$	$F_{[2,57]} = 4,98$	0,471
Erro	57	0,0001026	0,0000018				
Total	71	0,0101107					

De acordo com a análise de variância, a reprodutibilidade da MMC está comprometida, mas somente com o teste F não é possível mensurar

qual o nível de comprometimento desta variável no Sistema de Medição. Portanto, a tabela 26, extraída do estudo de R&R, apresenta o percentual que cada variável contribuiu na variabilidade do processo.

Tabela 26 – Contribuição percentual de cada variável na variação do Sistema de Medição

Fonte	% Contribuição
Total do Estudo R&R da Medição	29,66
Repetibilidade	0,87
Reprodutibilidade	28,79
Peça a Peça	70,34
Variação Total	100,00

O estudo R&R através da ANOVA atestou a contribuição de 29,66% na variabilidade no Sistema de Medição, desse percentual, 0,87% foi destinado a repetibilidade e 29,66% a reprodutibilidade. De acordo com os parâmetros sugeridos pela AIAG para a análise de um Sistema de Medição, este percentual de R&R é inaceitável, por estar muito próximo da margem dos 30%, limite de aceitação com restrição, pois dependendo da aplicação, é necessária uma intervenção.

6.5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS NA POSIÇÃO 2

No item 6.3 foi constatado que a posição da peça sobre o desempenho da máquina é um fator de relevância, e que embutiu uma contribuição na variação do Sistema de Medição de 16,17%, que segundo a AIAG, este nível de contribuição é aceitável, mas com restrição. Portanto, este item analisa a posição 2 separadamente das demais posições, considerando a relevância do fator posição para o Sistema de Medição da MMC.

Neste item não serão aplicados os mesmos testes da posição 1, pois já foi constatado que a máquina possui alto grau de repetibilidade nas três posições, mas com um baixo nível de reprodutibilidade quando a peça é mudada para as posições previamente escolhidas.

Assim como na posição 1, estão apresentadas as médias históricas e as médias atuais das medições realizadas na posição 2. A tabela 27 ainda apresenta as amplitudes das médias, as médias globais e também os desvios – padrão das médias e das amplitudes.

Tabela 27 – Resultados das médias e amplitudes na posição 2

Peças	Média Histórica (mm)	Média Atual (mm)	Amplitude (mm)
1	112,483	112,492	0,0087
2	112,480	112,495	0,0147
3	112,495	112,504	0,0097
4	112,505	112,516	0,0113
5	112,507	112,516	0,0087
6	112,507	112,517	0,0100
7	112,483	112,492	0,0090
8	112,479	112,493	0,0140
9	112,495	112,506	0,0103
10	112,505	112,516	0,0103
11	112,506	112,513	0,0073
12	112,506	112,517	0,0107
Média	112,496	112,506	0,0104
Desvio Padrão	0,0116	0,0107	0,0021

No gráfico da figura 51 estão apresentados para cada peça medida na posição 2, os valores das médias das medições históricas e atuais.

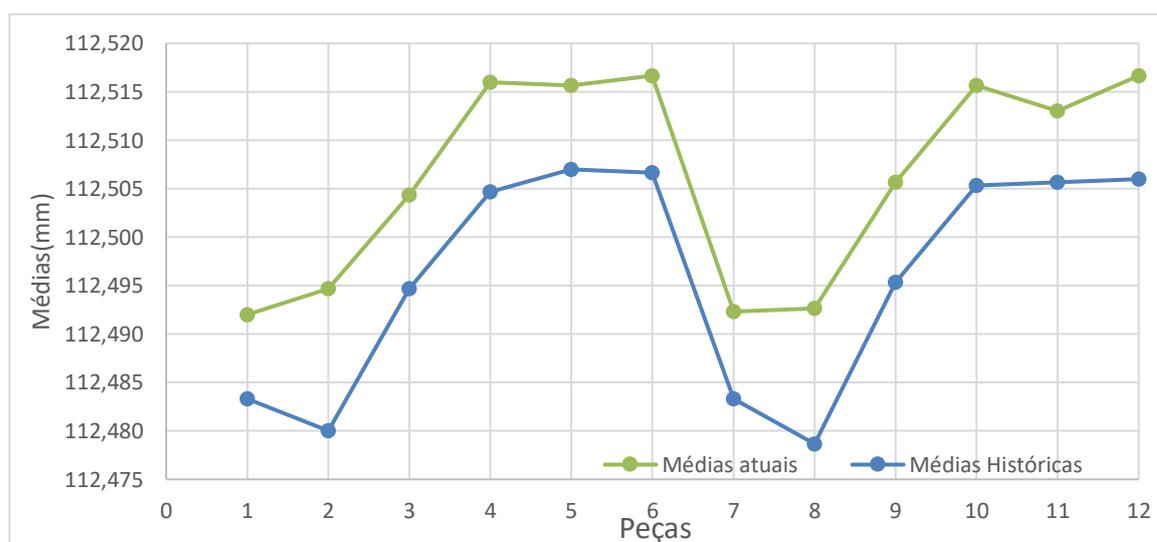


Figura 51– Médias Históricas e Atuais de cada peça na P2

O gráfico da figura 51 referente às médias das dimensões do artefato padrão na posição 2, é semelhante ao gráfico da figura 49 que se refere às

médias das mesmas dimensões medidas na posição 1. A semelhança apresentada, não se resume apenas no aspecto visual da distribuição das médias no gráfico, mas também no valor numérico do deslocamento das curvas e a direção deste deslocamento. Na posição 1 o deslocamento médio foi de 0,0111 mm, enquanto para a posição 2 foi de 0,0104 mm, apresentando uma mínima diferença entre as medias das médias das curvas no valor menor a 0,001 mm. Inferindo que na posição 2, a reprodutibilidade da MMC é muito semelhante à da posição 1.

Igualmente à figura 50 que apresenta o gráfico das amplitudes entre as médias das peças dos ensaios das médias históricas e atuais da posição 1, a figura 52 faz a mesma comparação das médias na posição 2. Os resultados observados demonstram uma certa semelhança no comportamento das amplitudes, tanto no aspecto gráfico quanto no aspecto numérico. A menor das amplitudes entre médias foi de 0,008 mm para posição 1 e 0,007 mm para a posição 2 e a máxima amplitude foi de aproximadamente 0,015 mm nas duas posições

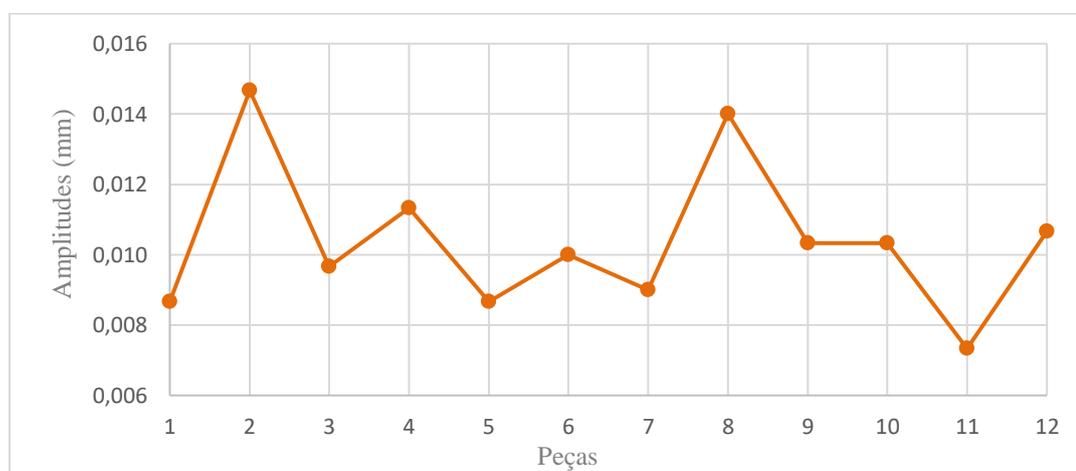


Figura 52 – Amplitudes entre as médias Históricas e Atuais medidas na posição 2

Uma comparação entre o gráfico da figura 50 e o gráfico da figura 52 está apresentada na figura 53. Este gráfico demonstra a amplitude dos resultados entre as médias históricas e atuais para a posição 1 e posição 2. Esta análise evidenciou que o erro adicionado à esfera de medição afetou quase que imperceptivelmente a MMC no que se refere a sua repetibilidade, quando mediu o artefato padrão nas duas posições. O gráfico mostra que

em cinco dimensões ocorreram diferenças nas amplitudes, mas a variação média foi de aproximadamente 0,001 mm, menos de 3% da tolerância do artefato padrão.

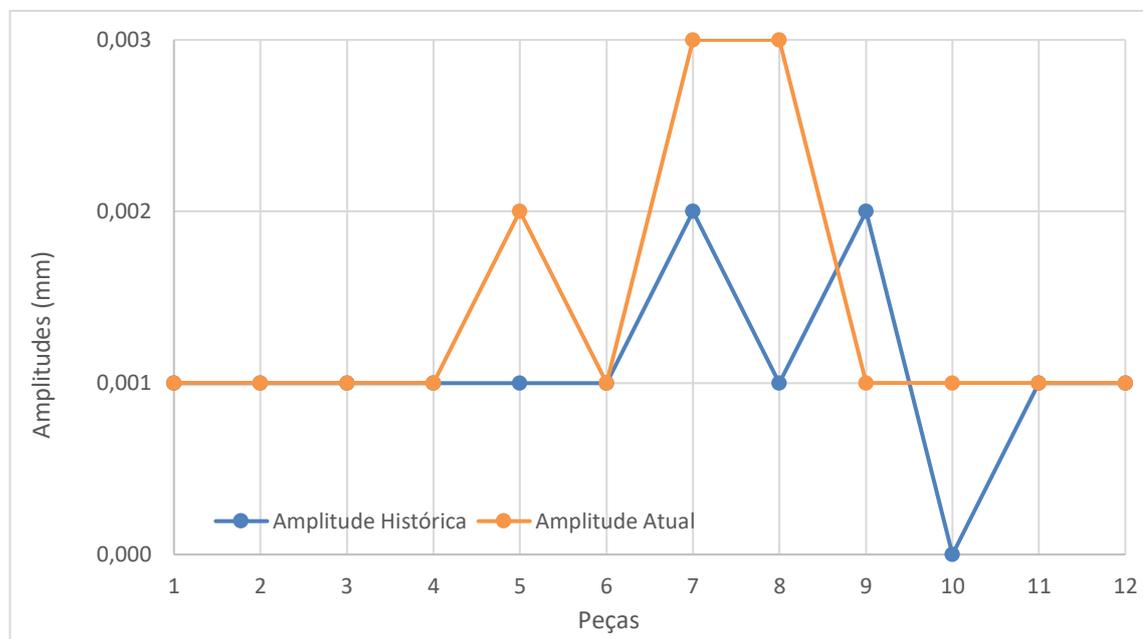


Figura 53 – Diferença entre as amplitudes das médias Históricas e Atuais medidas na posição 1 e 2

6.6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS NA POSIÇÃO 3

No item 6.3 que avaliou as três posições da MMC, constatou - se que a repetibilidade da máquina se manteve estável tanto na posição 1 quanto nas posições 2 e 3. A partir desta inferência, foi decidido pela não aplicação das mesmas análises na posição 3, o que mostraria uma análise repetitiva. Mesmo assim a planilha com os dados da medição do artefato padrão realizada na posição três com erro, esfera com deposição de camada de tinta sobre a superfície, e sem erro, está apresentada no Anexo C.

6.7 AVALIAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DA MMC NAS POSIÇÕES 1 E 3 PELO MÉTODO ALTERNATIVO

A estratégia de medição adotada em relação aos números de pontos coletados, posição onde a peça foi apalpada, forma de qualificação, posicionamento do sistema de referência da máquina em relação a peça e as condições ambientais, foram as mesmas em todos os ensaios anteriores.

Para um melhor entendimento desta análise, os ensaios anteriores foram denominados ensaio padrão e este como ensaio alternativo. Este ensaio investigou as três direções de medição da máquina que apresentaram maiores amplitudes das médias de cada peça, quando foi medido o artefato padrão nas posições 1, 2, 3. Como a maior variação encontrada foi entre a posição 1 e 3, e o teste de hipótese para comparação das medias apresentado na tabela 22, demonstrou que as posições 1 e 2 são iguais estatisticamente, portanto a posição 2 foi descartada deste estudo.

A tabela 28 apresenta as doze médias de cada peça de um novo ensaio padrão realizado nas posições 1 e 3 da máquina.

Tabela 28 – Ensaio padrão nas posições 1 e 3

Peça	P1_0° (mm)	P3_0° (mm)	Amplitude (mm)
1	112,481	112,480	0,001
2	112,477	112,472	0,005
3	112,496	112,486	0,010
4	112,505	112,495	0,010
5	112,505	112,500	0,005
6	112,504	112,503	0,001
7	112,482	112,480	0,002
8	112,476	112,471	0,005
9	112,496	112,487	0,009
10	112,506	112,496	0,010
11	112,505	112,500	0,005
12	112,505	112,504	0,001
Média	112,495	112,490	0,005
Desvio padrão	0,012	0,012	0,000
Amplitude	0,030	0,033	0,003
Amplitude máxima	0,035		

Assim como na figura 47, ensaio realizado nas três posições, o gráfico da figura 54 demonstra que as amplitudes de cada dimensão não têm comportamento linear, apresentando como mínima amplitude o valor de 0,001 mm e máxima de 0,010 mm. Esta dispersão das amplitudes, está relacionada diretamente com a posição e orientação da MMC, tendo em vista que este processo de medição foi totalmente automatizado, onde a sonda da máquina contorna a peça apalpando pontos em cada parede para definição da reta e na parede oposta a cada reta medida, um plano é medido, para que o ponto medido oposto a reta, seja projetado neste plano. Portanto todos os erros geométricos, erros de escala, erros de Abbè, tiveram contribuições importantes para estas variações observadas.

Neste experimento, a máquina foi orientada uma única vez, como nas medições anteriores, com a orientação na parede da reta da dimensão 1, que casualmente estava posicionada na direção do eixo X, e a origem do sistema no centro do furo maior. Todas as dozes medidas foram realizadas em função deste alinhamento.

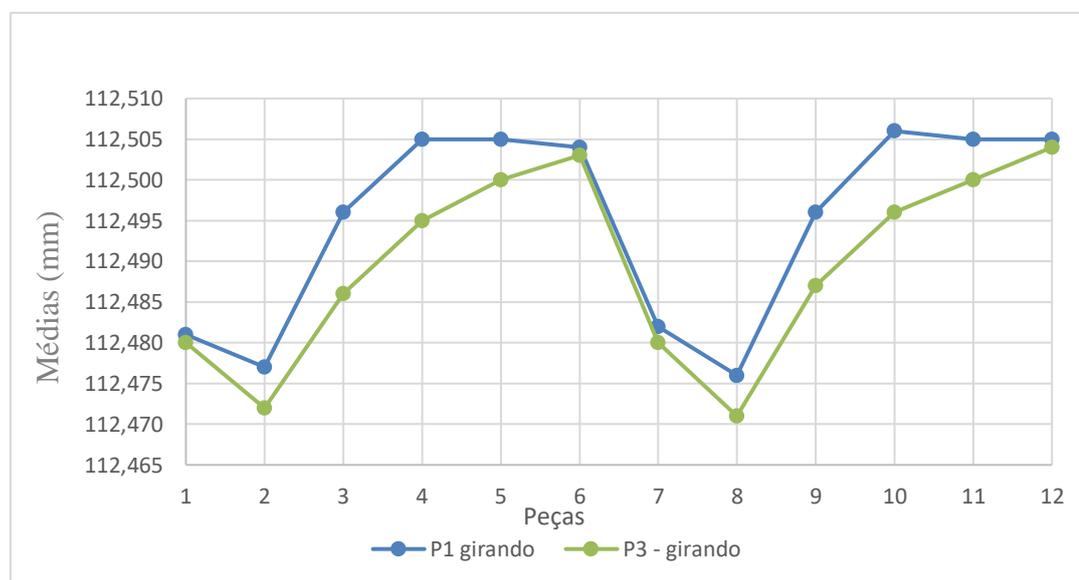


Figura 54 – Médias obtidas pelo método padrão de medição

Nos ensaios que seguem, foi aplicado o método alternativo de medição, que adota o mesmo procedimento de alinhamento e a mesma forma estratégica de apalpar e coletar os pontos na peça. A diferença é que a medição não foi totalmente automatizada. Foram escolhidas a dimensão

1, que está alinhada na direção Y da máquina, chamada de 0 graus, e as duas dimensões de maiores amplitudes com rotação angular de 60 graus e a 90 graus em relação ao eixo Y, conseqüentemente, dimensões 3 e 4. Na direção destas três dimensões, foram realizadas as medições da peça para as dimensões de 1 a 6 apenas, devido ao fato das dimensões de 7 a 12 serem repetições, mas com alternância entre reta e ponto.

Nesta medição, para cada dimensão medida, um novo alinhamento foi realizado, portanto na direção a zero graus do eixo Y, as dimensões de 1 a 6 foram realizadas. A cada término de um ciclo de medição, um giro de 30 graus no sentido horário foi dado na peça, posicionando a nova dimensão a ser medida e realinhando a máquina. Com isso cada peça teve seu próprio alinhamento. Analogamente foram repetidos os mesmos procedimentos para os ângulos de 60 e 90 graus. Os valores das médias e amplitudes das peças de 1 a 6 medidas nas posições 1 e 3 estão apresentadas na tabela 29.

Tabela 29 – Resultados das medições nas posições 1 e 3 a 0° pelo método alternativo

Peça	P1_0° (mm)	P3_0° (mm)	Amplitude (mm)
1	112,481	112,486	0,000
2	112,478	112,486	0,000
3	112,490	112,495	0,000
4	112,502	112,506	0,000
5	112,500	112,507	0,000
6	112,506	112,510	0,001
Média	112,493	112,493	0,010
Desvio padrão	0,012	0,011	0,001
Amplitude	0,028	0,027	0,001
Amplitude máxima	0,028		

Nas posições 1 e 3, orientadas a 0° em relação ao eixo Y, foi observado que praticamente não ocorreu variação das amplitudes para as dimensões de 1 a 6. O valor 0,001 mm apresentado na peça 6 é irrelevante diante do comportamento linear da variação. Tal comportamento tão estável está fundamentado nas primícias de que para a realização da medição de todas as peças, apenas o deslocamento na direção do eixo Y foi computado. Como o eixo Y é o que carrega os demais eixos, X e Z, isso faz com que os efeitos

dos erros geométricos sejam minimizados, conseqüente se alguma variação for observada na medição, pode ser conseqüência do erro de posição da escala, erros angulares e ou um possível erro de Abbè. A figura 55 apresenta o gráfico das médias das medições das seis peças na posição 1 e 3 da máquina. Com a peça sempre orientada na direção Y, ou seja, a 0°.

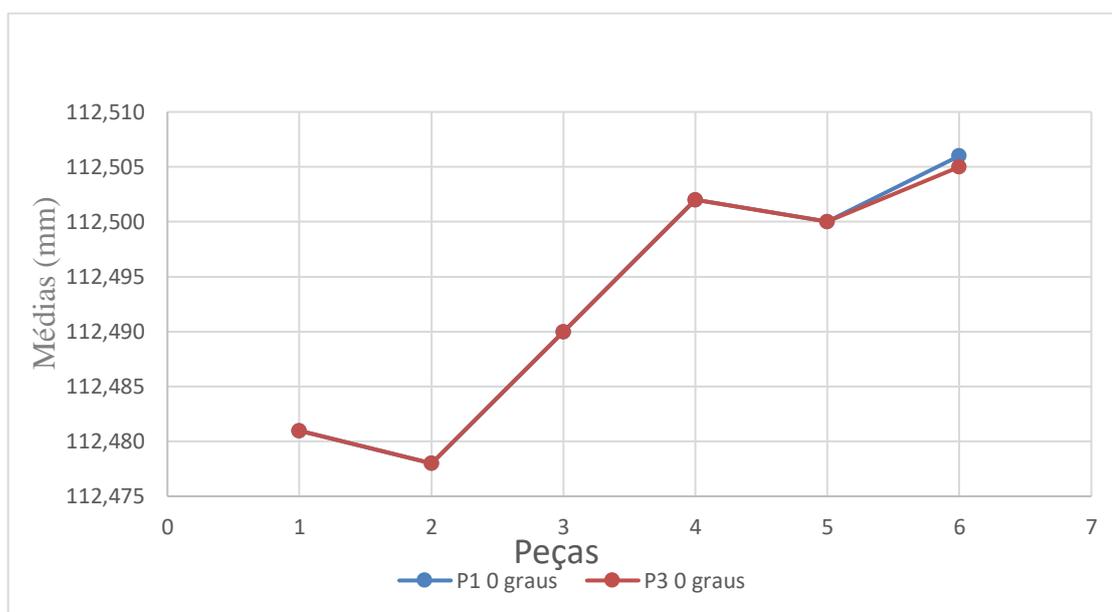


Figura 55 – Médias das dimensões de 1 a até medidas a 0°

Na tabela 30 estão apresentados os valores médios e as amplitudes das medições realizadas na posição a 60°, em relação ao eixo Y no sentido anti-horário.

Tabela 30 – Resultados das medições nas posições 1 e 3 a 60° pelo método alternativo

Peça	P1 60° (mm)	P3 60° (mm)	Amplitude (mm)
1	112,486	112,477	0,009
2	112,486	112,474	0,012
3	112,495	112,485	0,010
4	112,506	112,499	0,007
5	112,507	112,497	0,010
6	112,510	112,502	0,008
Média	112,498	112,489	0,011
Desvio padrão	0,011	0,012	0,001
Amplitude	0,024	0,028	0,004
Amplitude máxima	0,036		

Na direção a 60° , da posição 1 para a posição 3, ocorreu um deslocamento da curva das médias, apresentando uma diminuição das dimensões. A amplitude média foi de 0,011 mm, quase linear, como mostrado na figura 56.

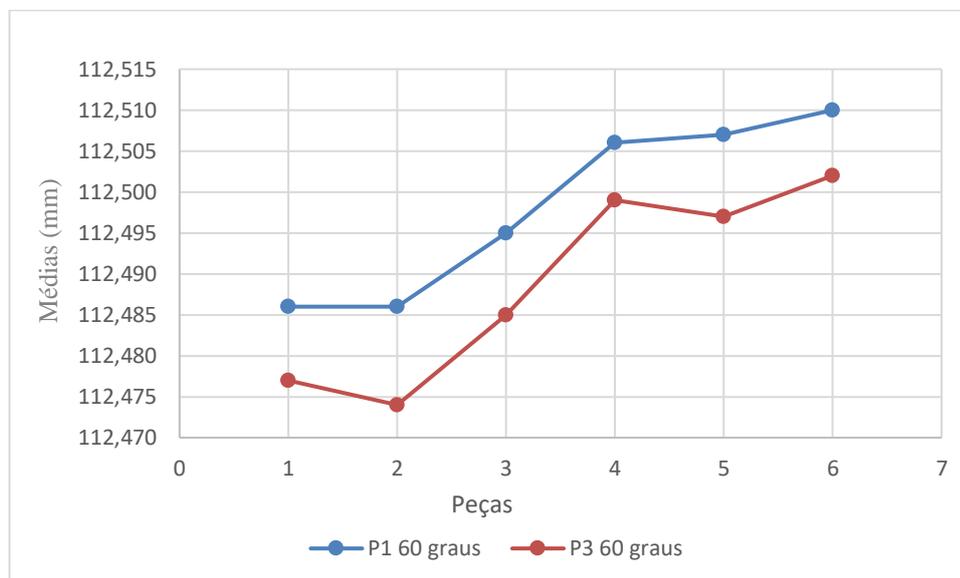


Figura 56 - Médias das dimensões 1 a 6 nas posição 1 medidas a 60°

Os valores médios e as amplitudes das medições realizadas na posição a 90° , em relação ao eixo Y no sentido anti-horário estão apresentados na tabela 31.

Tabela 31 – Medições nas posições 1 e 3 a 90° pelo método alternativo

Peça	P1 90° (mm)	P3 90° (mm)	Amplitude (mm)
1	112,484	112,474	0,010
2	112,483	112,475	0,008
3	112,494	112,485	0,009
4	112,505	112,496	0,009
5	112,504	112,494	0,010
6	112,510	112,499	0,011
Média	112,497	112,487	0,010
Desvio padrão	0,011	0,011	0,000
Amplitude	0,027	0,025	0,002
Amplitude máxima	0,036		

Assim como a medição na direção a 60° , a 90° as amplitudes se mantiveram constantes e apresentaram deslocamento praticamente linear.

Novamente ocorreu a diminuição das medidas da posição 1 para a posição 3, mantendo uma amplitude média de 0,010mm. O gráfico da figura 57 apresenta o comportamento das médias das dimensões de 1 até 6.

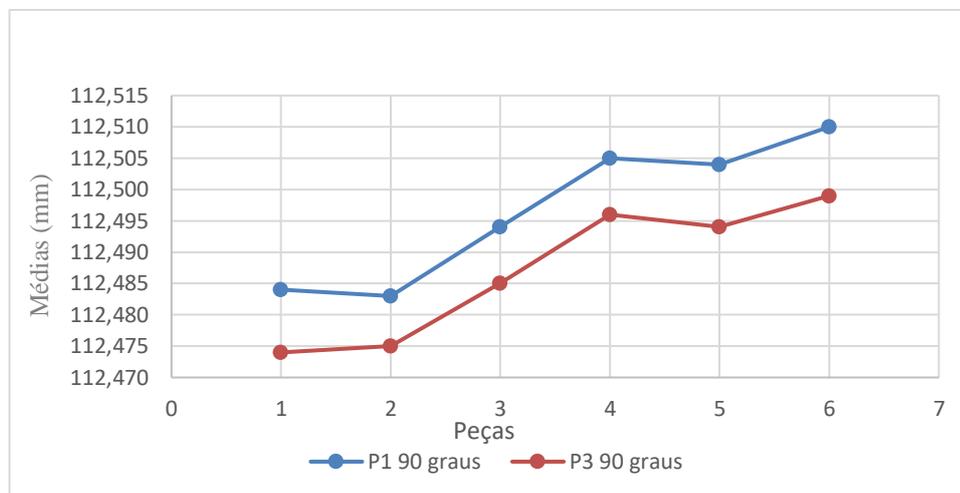


Figura 57- Médias das dimensões nas posições 1 a 6 medidas a 90°

O gráfico da figura 58 apresenta o comportamento das amplitudes das peças medidas nas duas posições. Foram comparadas entre si na mesma direção para os três ângulos diferentes.

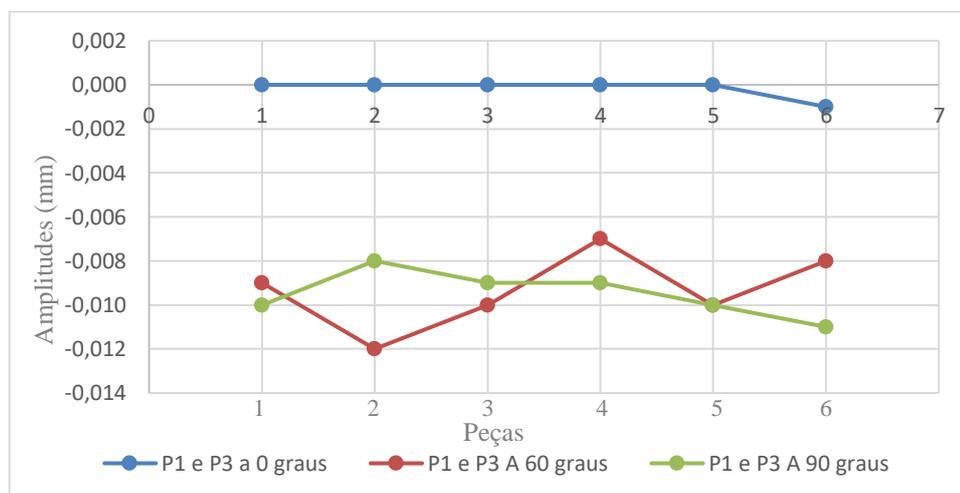


Figura 58 - Amplitudes nas posições 1 e 3 medidas a 0°, 60° e 90°

A análise das seis peças em diferentes posições e orientações, mostrou que o comportamento de medição da MMC não se mantém constante, exceto na direção Y. Mediante os deslocamentos das médias observados nesta investigação, se optou por conduzir um novo teste de R&R e uma avaliação de desempenho nas posições 1 e 3, com as mesmas características do ensaios e arranjos anteriores para as doze dimensões do artefato padrão.

6.7.1 ANOVA E ESTUDO DE R&R NAS POSIÇÕES 1 E 3 DA MMC

Nesta análise serão apresentados os gráficos pertinentes, as tabelas de ANOVA e as tabelas de percentuais de comprometimento de cada variável na variabilidade do Sistema de Medição. As tabelas de dados estão dispostas no anexo E.

O comportamento das dimensões do artefato padrão medidas na direção a 0° em relação ao eixo Y, se mostraram estáveis tanto na posição 1 quanto na posição 3. Enquanto para o ângulo de 60° , houve um aumento na posição 1 e uma diminuição na posição 2, na ordem de 0,004 mm. Assim como no método padrão, no método alternativo, o desvio padrão das medições em cada posição se manteve estável em 0,010 mm e 0,001 mm para cada peça. Este deslocamento das curvas de medição para as mesmas peças pode ser atribuído aos possíveis erros de montagem da MMC.

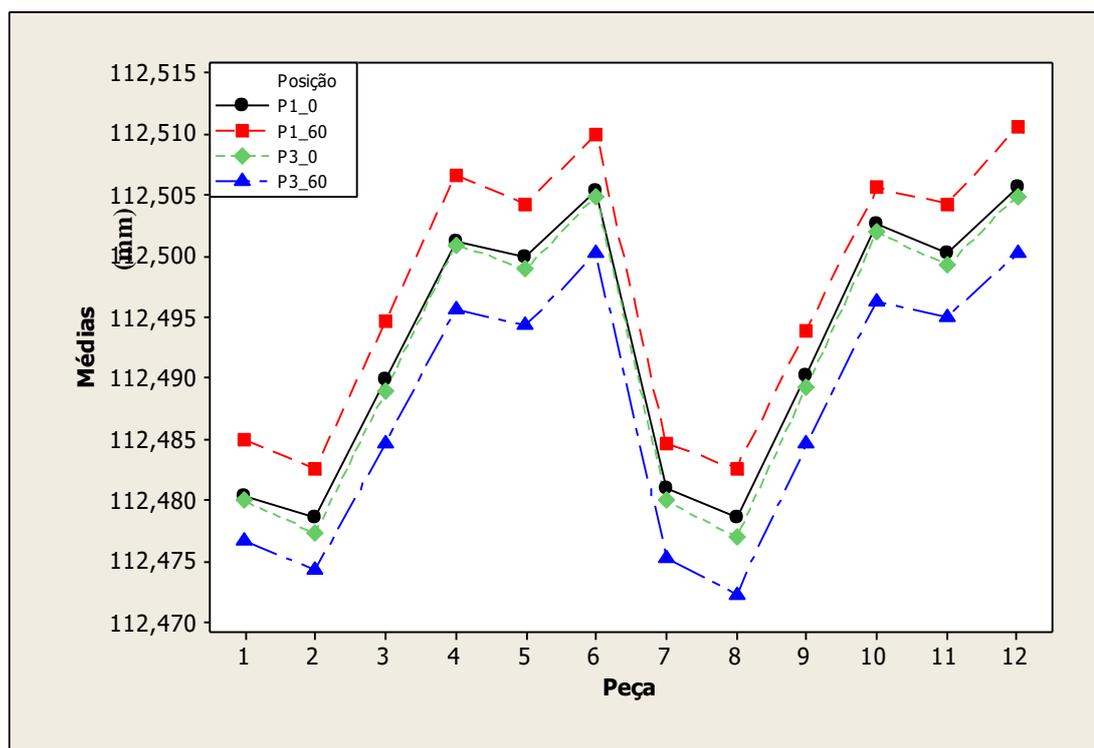


Figura 59 – Médias das dimensões nas posições 1 e 3 medidas a 0° e 60° , com a esfera sem tinta

A figura 60 demonstra o gráfico das amplitudes das doze peças, todas realizadas na mesma orientação nas duas posições diferentes. É possível observar a linearidade da curva que mostra a diferença das amplitudes

quando a peça é girada, mantendo a mesma orientação de deslocamento da máquina.

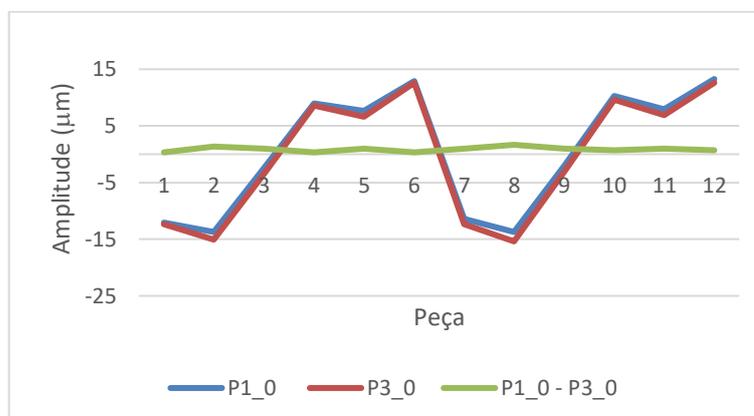


Figura 60 – Amplitudes de todas as dimensões realizadas na mesma orientação da MMC

Ao contrário da figura 60, o gráfico apresentado na figura 61 demonstra que quando a sonda de medição contorna a peça, a curva da diferença das amplitudes não mais se aproxima de uma reta, indicando uma variabilidade aleatória em função da orientação e direção que a sonda toca a peça.

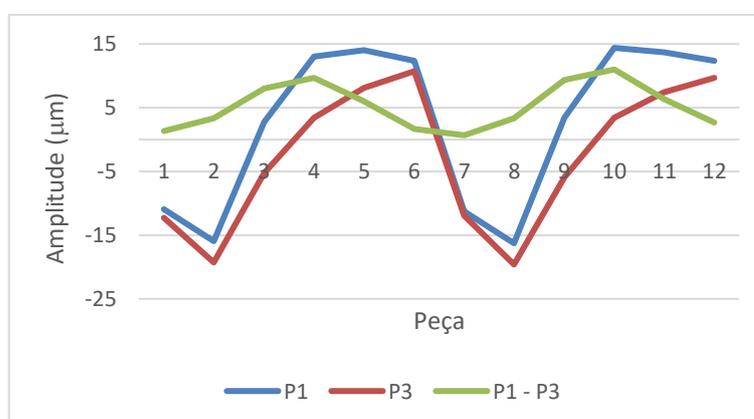


Figura 61 - Amplitudes de todas as dimensões com a MMC contornado a peça

A ANOVA demonstrou que a repetibilidade da máquina quando aplicado o método alternativo de medição não se altera, mas a reprodutibilidade continua influenciando na variabilidade dos resultados. A tabela 32 demonstra o estudo das medições realizadas nas posições 1 e 3 e nos ângulos 0° e 60° . Para esta análise, estes dados foram agrupados na variável posição, sendo P1 a 0° e 60° graus e P3 a 0° e 60° graus, totalizando quatro séries de medição.

Foi visto anteriormente que a repetibilidade não se alterou e a variável peça é a de maior influência, os comentários serão direcionados à variável posição, que representa a reprodutibilidade da MMC. É possível observar na tabela 32, que o F estatístico, ou seja, o calculado, independente no nível de confiança de 95% ou 99%, é maior que o F crítico, fato este que rejeita H_0 , o que demonstra que a variável posição influencia na variabilidade das medições.

Tabela 32 – ANOVA para as posições 1 e 3 nos ângulos de 0° e 60°.

Fonte	GL	SQ	SQM	F_{estatístico}	F_c α = 0,05	F_c α = 0,01	P – Valor
Peça	11	0,0158494	0,0014409	3087,33	$F_{[11,127]} = 1,75$	$F_{[11,127]} = 2,18$	0,000
Posição	3	0,0016766	0,0005589	1197,51	$F_{[3,127]} = 2,60$	$F_{[3,127]} = 3,78$	0,000
Repetib.	2	0,0000002	0,0000001	0,19	$F_{[2,127]} = 3,00$	$F_{[2,127]} = 4,61$	0,824
Erro	127	0,0000593	0,0000005				
Total	143	0,0175855					

Como a análise da tabela 32 só demonstra que a variável influencia na medição, mas não qual o percentual deste comprometimento, foi conduzido um estudo de R&R expandido com o mesmo arranjo experimental dos dados para ANOVA, afim de obter essas contribuições. A tabela 33 apresenta os percentuais de contribuição do método padrão e do método alternativo de medição.

Tabela 33 – Percentuais de contribuição na variabilidade das medições pelo método padrão e alternativo de medição.

Fonte	% Contribuição Método Alternativo	% Contribuição Método padrão
Total do Estudo R&R da Medição	11,75	16,51
Repetibilidade	0,34	0,34
Posição /Reprodutibilidade	11,41	16,17
Peça a Peça	88,25	83,49
Variação Total	100,00	100,00

Com a aplicação do método alternativo de medição, como já era esperado, a repetibilidade se manteve constante. Apesar de ter ocorrido uma diminuição de 30% na contribuição da variabilidade da variável reprodutibilidade, o valor apresentado do estudo de R&R de 11,75%, aprova

a máquina, mas continua deixando-a em estado de alerta em relação aos parâmetros de aceitação AIAG.

6.7.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS NA POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO INDEPENDENTES.

Mediante os resultados da contribuição para a variabilidade das medições de 11,41% referido ao fator posição, optou-se por conduzir a avaliação de desempenho para cada posição e cada orientação independente. A medição apresentada no gráfico da figura 59 corresponde a condição do desempenho histórico da MMC.

O gráfico da figura 62 ilustra as médias das dimensões das peças que foram medidas com a esfera de trabalho, com a adição da camada de tinta na superfície e não calibrada pela MMC, portanto inserindo um erro na medição. Esta medição é considerada como a condição de desempenho atual da máquina.

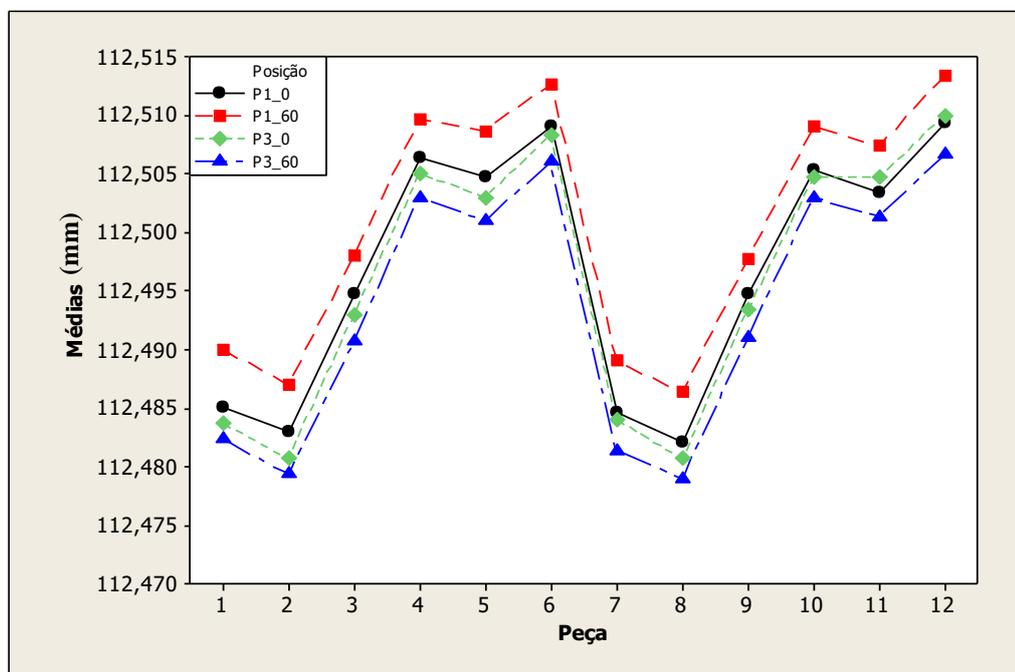


Figura 62- Médias das dimensões nas posições 1 e 3 medidas a 0° e 60° com a esfera pintada

A semelhança do gráfico da figura 62 com o gráfico figura 59, demonstra que se o estudo de R&R for realizado de maneira isolada, ou

seja, não possuir uma medição história, muito provavelmente o estudo apresentará uma condição muito próxima de repetibilidade e reprodutibilidade, não permitindo inferir se houve ou não avaria na máquina. Por isso, as comparações sempre exigirão uma medição histórica e uma medição atual para verificar o monitoramento do desempenho da MMC.

De forma resumida e compactada a seguir estão apresentados os estudos das ANOVA para comparação entre as médias históricas e médias atuais das dimensões do artefato padrão e os percentuais de contribuição na variabilidade das medições através do estudo de R&R obtidos por ANOVA. Nesta análise foram estudados de forma individual cada posição e cada orientação, portanto, são quatro séries de testes denominados P1_0 e P1_60 que corresponde a medição na posição 1 a 0° e a 60° e P3_0 e P3_60, analogamente a P1, mas na posição 3. Na tabela 34 estão apresentadas a estatística de testes de comparação das variâncias das medidas históricas e atuais de cada série, para $\alpha = 0,05$ e $0,01$. Estas variáveis representam a reprodutibilidade da máquina nas posições e orientações mencionadas.

Tabela 34 – ANOVA das quatro séries de medição para o teste de hipóteses

Fonte	GL	SQ	SQM	F _{estatístico}	F _c $\alpha = 0,05$	F _c $\alpha = 0,01$	P - Valor
P1_0 Graus	1	0,000284	0,000284	2,55	F _{[1,70]} = 4,00}	F _{[1,70]} = 7,08}	0,114
P1_60 Graus	1	0,000235	0,000235	2,12	F _{[1,70]} = 4,00}	F _{[1,70]} = 7,08}	0,150
P3_0 Graus	1	0,000276	0,000276	2,32	F _{[1,70]} = 4,00}	F _{[1,70]} = 7,08}	0,132
P3_60 Graus	1	0,000697	0,000697	6,26	F _{[1,70]} = 4,00}	F _{[1,70]} = 7,08}	0,015

Os valores do F estatístico para P1_0, P1_60 e P3_0, atestam igualdade estatística entre as medidas históricas e atuais, para estas três séries de medição, devido aos valores do F estatístico se posicionarem abaixo dos F tabelados e o valor - p acima de 0,05. Na posição P3_60 o valor F estatístico de 6,26 está posicionado na área de rejeição da curva F de probabilidades para nível de confiança α igual a 0,05, e aceito para um α de 0,01. O valor p abaixo de 0,05, para o α ao qual foi calculado, também demonstrou que nesta posição e neste ângulo, existe uma maior influência nas medições. Para uma melhor visualização do comprometimento de cada

variável posição e orientação refletidas nas fontes do estudo, a tabela 35 apresenta estes percentuais.

Tabela 35 – Percentual de contribuição da variabilidade devido as medições histórica e atual

Fonte	% Contribuição P1_0 Graus	% Contribuição P1_60 Graus	% Contribuição P3_0 Graus	% Contribuição P3_60 Graus
Total do Estudo R&R	6,62	5,72	5,94	14,53
Repetibilidade	0,00	0,00	0,00	0,00
Reprodutibilidade	6,26	5,25	5,72	14,08
Peça a Peça	93,38	94,28	94,06	85,47
Erro	0,36	0,47	0,22	0,45
Variação Total	100,00	100,00	100,0	100,00

É importante lembrar que a esfera de medição utilizada neste ensaio é a mesma utilizada no ensaio do método padrão de medição, que acusou um comprometimento do estudo R&R de 29,66%, sinalizando uma situação de alerta para a MMC. Conforme demonstrado na tabela 35, o ensaio realizado pelo método alternativo de medição para as três séries iniciais de testes, apresentaram índices abaixo de 10%, que pela AIAG o Sistema de Medição está aceito. No caso da posição P3_60 que apresentou 14,53% de contribuição, alguma variável não controlada influenciou de forma significativa nas medições, reforçando a necessidade da aplicação do método de avaliação de desempenho nas posições e orientações independentes.

Como forma de aumentar a confiabilidade das medições realizadas na peça padrão pelo método alternativo, foi realizado um ensaio similar nas posições P1_0, P1_60, P3_0, P3_60, com o uso bloco padrão de mesmo comprimento nominal.

Assim como nas medições realizadas na peça padrão pelo método alternativo de medição, as realizadas no bloco padrão apresentaram comportamento semelhante, tanto para a posição, quanto para a

orientação. Por meio do gráfico da figura 63 que apresenta as médias das medidas de uma montagem de blocos – padrão de dimensão nominal 112,500 mm e as médias da peça padrão, é possível constatar pela semelhança das curvas que as duas dimensões tem a mesma tendência. Se tomar a posição P1_0 e P3_0 como referência, para ambas as medições houve um aumento de 0,004 mm para a posição P1_60, e uma diminuição para P3_60, de aproximadamente a mesma cota

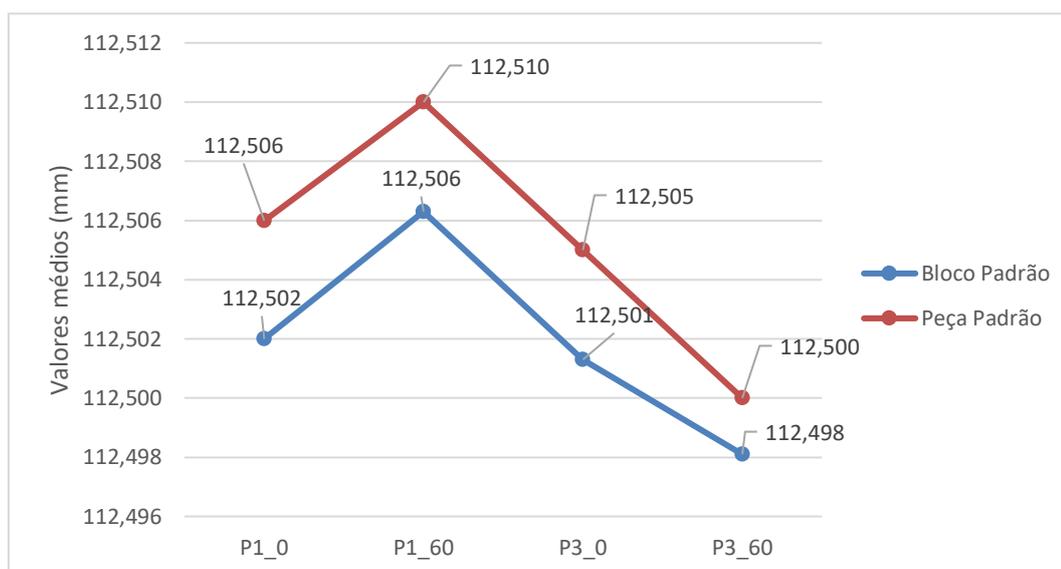


Figura 63 – Médias das dimensões do bloco padrão e da peça padrão nas posições P1_0, P1_60, P3_0 e P3_60.

Os valores de desvio padrão do bloco e da peça estão todos permeando 0,001 mm, o que garante a eficiência da repetibilidade da máquina. A defasagem de aproximadamente 0,004 mm para mais e para menos, quando o bloco é girado a sessenta graus, similar ao apresentado na peça padrão dodecagonal, mostra que a reprodutibilidade da MMC está relacionada à posição e orientação. A tabela dos valores das medições referente ao ensaio com o bloco padrão, está disposta no anexo G.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES

Foi apresentado neste trabalho um método para avaliação do desempenho de Máquinas de Medir a Três Coordenadas de forma indireta. Para a realização das medições, um artefato padrão, também chamada de peça de trabalho, foi utilizado, além das ferramentas estatísticas, análise de variância e teste de hipóteses.

Através da literatura que abordou o assunto, ficou evidenciada a necessidade de testes rápidos para a avaliação de desempenho e que permitam uma visão geral do comportamento metrológico das MMCs. Este tipo de teste pode ser classificado como estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R).

A utilização de técnicas estatísticas para avaliar a MMC e máquinas ferramentas, está cada vez mais atual e usual. Dentre estas técnicas pode ser mencionada a análise de variância, que além de ser usada para comparar várias médias simultaneamente, a análise de variância permite estimar as componentes de variância, relacionadas às variáveis envolvidas em um determinado experimento.

As variabilidades das medições foram determinadas medindo um padrão dodecagonal na condição inicial de trabalho da MMC, máquina calibrada ou liberada, que foi denominada de medição histórica, comparada a medição atual, o que representou um período posterior ao início do controle de desempenho da máquina. As variáveis que mais influenciaram na variabilidade do Sistema de Medição foram determinadas, assim como

as componentes de variância para as variáveis experimentais, através da análise de variância.

Os resultados obtidos com a aplicação do método proposto em uma MMC do tipo Ponte Móvel automática, sugerem as seguintes conclusões:

- Na avaliação inicial da MMC na posição 1 foi observado as influências das estratégias, variando o número de pontos coletados na superfície da parede para determinar a reta. Para o artefato padrão de trabalho escolhido não foram significantes, visto que o estudo apontou uma variabilidade total de 0,48%, classificando o Sistema de Medição como aceitável e sem restrição. Portanto a repetibilidade e a reprodutibilidade da máquina não foram afetadas pelas estratégias, o que concede à máquina a condição de apta para uso.
- A avaliação inicial da MMC nas três posições propostas, para a qualificação da máquina para a aplicação do método padrão de medição proposto, constatou que a repetibilidade da máquina se mantém constante, independentemente da posição escolhida para a medição, mas a reprodutibilidade da máquina demonstrou uma forte contribuição no estudo da variabilidade do Sistema de Medição de 16,51%. Além desta porcentagem está no regime de atenção na classificação da AIAG, as amplitudes das dimensões são variadas em função da direção e orientação da medição. O teste de hipótese conferiu que as médias de cada medida não são iguais estatisticamente, quando medida nas três posições diferentes. O que sugeriu as análises em cada posição independente.
- A avaliação de desempenho da MMC na posição 1, 2 e 3, se mostrou sensível ao erro inserido propositalmente na esfera de medição, pois foi capaz de observar a variabilidade nas medições classificadas com erro e sem erro. A ANOVA demonstrou através do teste de hipótese que a repetibilidade da máquina se encontra na área de aceitação, mas a reprodutibilidade se comportou na área de rejeição do teste.

- O método ainda foi capaz de expedir um percentual da contribuição da variabilidade do Sistema de Medição na comparação entre as médias históricas e as médias atuais. A variabilidade total do estudo foi de 29,66%, sendo 0,87% para a repetibilidade e 28,79% para a reprodutibilidade. De acordo com AIAG estes percentuais estão no limiar da rejeição do Sistema de Medição, portanto, devem ser bem interpretados e tratados com extrema importância devido a responsabilidade envolvida e ao grau de complexidade na tomada de decisão a respeito da continuidade ou a parada do equipamento, seja para uma investigação mais profunda, uma calibração completa, uma manutenção, ou até mesmo a readequação nas tolerâncias das dimensões das peças medidas pelo equipamento.
- A avaliação da reprodutibilidade da MMC nas Posições 1 e 3, foi essencial para o entendimento do comportamento da variabilidade das medições quanta a metodologia de medição padrão e a metodologia alternativa. Para os dois métodos, a mesma MMC, o mesmo artefato, as mesmas esferas de medição e as mesmas posições foram utilizadas. O método padrão embutiu erro na medição provinda de variáveis não controladas neste estudo, como os erros geométricos e erros angulares, o que praticamente reprovou a MMC, quando o erro na esfera de medição foi inserido.
- No caso do método alternativo de medição, em que as medições foram realizadas na mesma orientação, as influências dos erros geométricos e angulares, de certo modo foram filtradas. Com isso as amplitudes das medições, mesmo mudando a peça de posição, se mantiveram estáveis, conseqüentemente as variâncias apresentaram valores menores que o método padrão, portanto, menor contribuição no estudo de R&R, o que aprovou a MMC para a continuidade de operação de acordo com os padrões da AIAG.

- Para a posição P3_60 no estudo da avaliação de desempenho que apresentou contribuição de 14,53%, e que causou um alerta nesta diferença, é importante ressaltar que esse percentual equivale a 0,0042 mm da amplitude total do processo de medição, e de acordo com o certificado de calibração da MMC citado no anexo F, o máximo erro de exatidão permissível (MPE_e) para o comprimento de 112,500 mm, corresponde a 0,0032 mm. Portanto se levar em consideração essas informações de incerteza, é possível classificar a MMC como aceitável.
- É possível concluir também, que o método alternativo de medição é mais estável e consistente que o método padrão, embasado pela semelhança dos valores obtidos da peça padrão e do bloco padrão.

A partir dos resultados das investigações e conclusões obtidas, algumas propostas de trabalhos futuros, estão delineados a seguir.

- Medir o padrão em mais posições, com variação de altura, para investigar o comportamento da MMC no volume de trabalho do eixo Z.
- Realizar medições em todas as direções do padrão pelo método alternativo, para observar o comportamento do método padrão em relação ao método alternativo de medição.
- Investigar a possível causa da variação da posição P3_60, e como esse efeito atua nas outras direções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158**: Sistema de Tolerâncias e Ajustes. Apresentação Rio de Janeiro, 1995. 79 p.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/ THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ANSI/ASME B89.4.1**: Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines. 1995. 78 p.
- _____. **B4.2 - 1978**: Preferred Metric Limits and Fits. R2009. 78 p.
- BASEI, S.R. et al. Monitorando máquinas de Medir por coordenadas pela internet. **Banas Qualidade**, São Paulo, v. set, p. 128-134, set. 2009. Disponível em: < <http://goo.gl/b4J1Xh> > Acesso em: 01 jan. 2015.
- BOSCH, J. A. (1995). Coordinate Measuring Machines., BOSCH, J. A. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. New York: Marcel Dekker, Inc.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BSI 6808** - Coordinate Measuring Machines. Part 1: Glossary of terms, 1986. Part 2: Methods for verifying performance, Part 3: Code of practice, 1989.
- BROWN & SHARPE Manual do Usuário: Sistema de Medição por coordenadas. **Panambra**, 1988.

- CARDOZA, J.A.S. **Máquinas virtuais de medir a três coordenadas.** 1995. 209p. Tese de Doutorado (Doutorado em Projeto Mecânico) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- CASKEY, G., PHILLIPS, S., BORCHARDT, B., Results of the NIST National Ball Plate Round Robin, **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, EUA, v.102, n. 1, p. 85-93 Jan. 1997. Disponível em: < <http://goo.gl/iA1ITP>>. Acesso em: 08 mar. 2015.
- DIETRICH, C.F. **Uncertainty, calibration and probability.** London: Adam Hilger, 1973.
- DI GIACOMO, B. **Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines.**1986. 418p. Tese de Doutorado - University of Manchester, Institute of Science and Technology, Inglaterra, 1986.
- _____. **A expressão da incerteza de medição por coordenadas.** 2006. 192p. Tese (Livre-Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- DI GIACOMO, B; PIRATELLI FILHO. A; ZIRONDI, R. B. Application of Taguchi design of Experiments Techniques to estimate Coordinate Measuring Machine Uncertainty. In: **COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 1999, Águas de Lindóia. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999.

- FLACK, D. Good practice guide Nº 42 - CMM Verification, **National Physical Laboratory**, jul. 2011. Disponível em: <http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mgpg42.pdf>. Acesso em jan. 2016.
- FORMA3. **Reconstrução Matemática a partir de pontos**: Disponível em: <<http://www.forma3d.com.br/downloads/reconstrucao%20matematica.pps>>. Acesso em: 15 de abr. 2015
- GONÇALVES FILHO, E. V.; TSUNAKI, R. H. **Estatística**. São Carlos: EESC - USP, 2012. 248p.
- HEXAGON METROLOGY. Disponível em: <<http://www.hexagonmetrology.com.br/Index.htm> >. Acesso em mar. 2016.
- _____. **Apostila de Treinamento de Pc-Dmis Módulo Cad d Cad++**. Disponível em: <<http://www.metrologia.ufpr.br/pdfs/TMC/Apostila%20PC-DMIS%20Cad++.pdf>>. Acesso em: 15 de abr. 2015
- HOCKEN, R.J.; BOSCH, J.A. The international standard of length. In: HOCKEN, R.J; PEREIRA, P.H. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. 2.ed. New York, Marcel Dekker, Inc. 2011.
- INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**, 1. ed. Luso-Brasileira. Rio de Janeiro/RJ,2012. Disponível em:<http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 15530-3**: Geometrical Product Specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement — Part 3: Use of calibrated workpieces or standards. Switzerland, 2011.

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-2**: Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) -- Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions. Switzerland, 2001.
- BRYAN, JB. UNITED STATES PATENT. EUA (1984). **Telescoping magnetic ball bar test gage**. N. 4.435.905, 13 mar, 1984.
- JINWEN W.; YANLING C. (2010). The geometric dynamic errors of CMMs in fast scanning-probin. **Measurement**, p. 511-517, Nov.
- KNAPP, W.; TSCHUDI, U. & BUCHER, A. Comparison of different artefacts for interim coordinate measuring machine checking: a report from the Swiss Standards Committee. **Precision Engineering**, v.13, p. 277-291, out. 1991.
- KUNZMANN, H.; WÄLDELE, F. (1988). Performance of CMM. **Annals of CIRP**. v.37, n.2, p.633-640.
- KUNZMANN, H.; NI, J.; WÄLDELE, F. (1995). Accuracy Enhancement. Bosch, J. A. **Coordinate Measuring and Systems**. New York: Marcel Dekker, Inc.
- MARQUES, A. **Uma interface eletrônica e computacional para medições a três coordenadas**. 2003. 150p. Tese de Doutorado (Doutorado em Projeto Mecânico) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003
- MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. 4. Ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.

- MORAIS, C. A. G. **Modelos de sintetização plena e reduzida de erros em máquinas de medir por coordenadas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Projeto Mecânico) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- MSA - MANUAL DE REFERÊNCIA – **Análise dos Sistemas de Medição, 4ª edição**, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/NmyXUJ>>. Acesso em 10 mar. 2014.
- PEGGS, G.N. Traceability for coordinate measurement technology. 27th International. **MATADOR Conference.**, Manchester, 1990: 463-8.
- PHILLIPS, S.D. Performance evaluations. In: BOSCH, J.A. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995.
- PIRATELLI FILHO, A. **Método para avaliação do desempenho de máquinas de medir a três coordenadas através de planejamento de experimentos**. 1998. 225p. Tese de Doutorado (Doutorado em Projeto Mecânico) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- PORTAL ACTION **Distribuição Normal**. <Disponível em: <<http://goo.gl/pkkdCm>>. Acesso em: 08 jan. 2015.
- RENISHAW. Apply Innovation. Disponível em: <<http://goo.gl/tCWZJv>>. Acesso em: 20 mar. 2015.
- SEREIN METROLOGY (SHENZHEN) CO. LTD. Disponível em: <<http://www.serein.com.cn/en/Products/Productsa/149.html>>

- SWORNOWSKI, P. J. A critical look at the coordinate measuring technique. **Mechatronics**, Poland, v. 23, n. 1, p. 80-93, fev. 2013. Disponível em: < <http://goo.gl/fQoB66> >. Acesso em: 10 ago. 2014.
- SWYT, D.A;. The international standard of length. In: HOCKEN, R.J; PEREIRA, P.H. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. 2.ed. New York, Marcel Dekker, Inc. 2011.
- TRAPET, E. & WÄLDELE, F. **Asseguramiento de la calidad para máquinas de medir por coordenadas**. PTB - Physikalish Technische Bundesanstalt. Seminario en el Centro Español de Metrologia, 17 al 21 de junio de 1991.
- UNIMETRIK METROLOGIC AND CALIBRATION. Disponível em: <<http://www.unimetrik.es/en/products/artifacts/machine-tool-artifacts/>>. (Acesso em jan de 2016).
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE/VERBAND DEUTSCHER ELEKTRO-TECHNIKER. **VDI/VDE 2617: Accuracy of Coordinate Measuring Machines. Part 1: Characteristics and their checking**, 1986.

ANEXO AVALORES DE F ($F_{0,01}$) PARA UMA ÁREA DE 0,01 À DIREITA DE F.

		Graus de Liberdade para o Numerador								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Graus de Liberdade para o Denominador	1	4052.00	4999.50	5403.00	5625.00	5764.00	5859.00	5928.00	5981.00	6022.00
	2	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39
	3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35
	4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66
	5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16
	6	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98
	7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72
	8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91
	9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35
	10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94
	11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63
	12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39
	13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19
	14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03
	15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89
	16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78
	17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68
	18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60
	19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52
	20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46
	21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40
	22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35
	23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30
	24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26
	25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22
	26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18
	27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15
	28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12
	29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09
	30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	
∞	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	

Continua

Valores de F ($F_{0,01}$) para uma área de 0,01 à direita de F.

		Graus de Liberdade para o Numerador									
		10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
Graus de Liberdade para o Denominador	1	6056	6106	6157	6209	6235	6261	6287	6313	6339	6366
	2	99.40	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.47	99.48	99.49	99.50
	3	27.23	27.05	26.87	26.69	26.60	26.50	26.41	26.32	26.22	26.13
	4	14.55	14.37	14.20	14.02	13.93	13.84	13.75	13.65	13.56	13.46
	5	10.05	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02
	6	7.87	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88
	7	6.62	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65
	8	5.81	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.86
	9	5.26	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31
	10	4.85	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91
	11	4.54	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60
	12	4.30	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36
	13	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17
	14	3.94	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00
	15	3.80	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96	2.87
	16	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84	2.75
	17	3.59	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65
	18	3.51	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57
	19	3.43	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49
	20	3.37	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42
	21	3.31	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36
	22	3.26	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31
	23	3.21	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26
	24	3.17	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21
	25	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27	2.17
	26	3.09	2.96	2.81	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23	2.13
	27	3.06	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20	2.10
	28	3.03	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.35	2.26	2.17	2.06
	29	3.00	2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14	2.03
	30	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01
40	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80	
60	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60	
120	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38	
∞	2.32	2.18	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.47	1.32	1.00	

Conclusão

ANEXO BVALORES DE F (F_{0,05}) PARA UMA ÁREA DE 0,05 À DIREITA DE F.

		Graus de Liberdade para o Numerador								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Graus de Liberdade para o Denominador	1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.32	3.14	3.07	3.02
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
	28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
	29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	

Continua

Valores de F ($F_{0,05}$) para uma área de 0,05 à direita de F.

		Graus de Liberdade para o Numerador									
		10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
Graus de Liberdade para o Denominador	1	241.90	243.90	245.90	248.00	249.10	250.10	251.10	252.20	253.30	254.30
	2	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
	3	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
	4	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
	5	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
	6	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
	7	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
	8	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
	9	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
	10	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
	11	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
	12	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
	13	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
	14	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
	15	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
	16	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
	17	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
	18	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
	19	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
	20	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
	21	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
	22	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
	23	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
	24	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
	25	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
	26	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
	27	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.93	1.88	1.79	1.73	1.67
	28	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
	29	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
	30	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
60	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	
120	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25	
∞	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00	

Conclusão

ANEXO C

TABELA DE DADOS DA MEDIÇÃO DA POSIÇÃO 3, MEDIÇÃO SEM ERRO. VALORES EM MM

Peça	Med_1	Med_2	Med3_3	\bar{y}	S	R
1	112,480	112,479	112,479	112,479	0,0006	0,0000
2	112,473	112,474	112,474	112,474	0,0006	0,0010
3	112,485	112,487	112,485	112,486	0,0012	0,0020
4	112,497	112,498	112,496	112,497	0,0010	0,0020
5	112,500	112,500	112,499	112,500	0,0006	0,0010
6	112,502	112,502	112,502	112,502	0,0000	0,0000
7	112,479	112,480	112,480	112,480	0,0006	0,0010
8	112,474	112,473	112,471	112,473	0,0015	0,0030
9	112,487	112,487	112,485	112,486	0,0012	0,0020
10	112,496	112,496	112,496	112,496	0,0000	0,0000
11	112,499	112,499	112,500	112,499	0,0006	0,0010
12	112,500	112,501	112,500	112,500	0,0006	0,0010
\bar{x}	112,489	112,490	112,489	112,489	0,0007	0,0012
S	0,0109	0,0110	0,0112	0,01100	0,0005	0,0009
R	0,029	0,029	0,031	0,02933	0,0015	0,0030
Amplitude máxima = 0,031						

TABELA DE DADOS DA MEDIÇÃO DA POSIÇÃO 3, MEDIÇÃO COM ERRO. VALORES EM MM

Peça	Med_1	Med_2	Med3_3	\bar{y}	S	R
1	112,489	112,488	112,488	112,488	0,0006	0,0010
2	112,486	112,486	112,484	112,485	0,0012	0,0020
3	112,498	112,497	112,497	112,497	0,0006	0,0010
4	112,507	112,507	112,508	112,507	0,0006	0,0010
5	112,510	112,510	112,508	112,509	0,0012	0,0020
6	112,513	112,512	112,511	112,512	0,0010	0,0020
7	112,488	112,487	112,487	112,487	0,0006	0,0010
8	112,488	112,485	112,484	112,486	0,0021	0,0040
9	112,498	112,496	112,496	112,497	0,0012	0,0020
10	112,507	112,507	112,508	112,507	0,0006	0,0010
11	112,509	112,507	112,506	112,507	0,0015	0,0030
12	112,511	112,511	112,512	112,511	0,0006	0,0010
\bar{x}	112,500	112,499	112,499	112,500	0,0010	0,0018
S	0,0104	0,0107	0,0110	0,0107	0,0005	0,0010
R	0,027	0,027	0,028	0,027	0,0015	0,0030
Amplitude máxima = 0,030						

ANEXO D

TABELA DE DADOS DA MEDIÇÃO DAS TRÊS POSIÇÕES PELO MÉTODO PADRÃO, SEM ERRO. VALORES EM MM.

Sequencia	Peça	Posição	Repetição	Valor medido
1	1	1	1	112,485
2	2	1	1	112,481
3	3	1	1	112,499
4	4	1	1	112,510
5	5	1	1	112,511
6	6	1	1	112,507
7	7	1	1	112,485
8	8	1	1	112,481
9	9	1	1	112,499
10	10	1	1	112,510
11	11	1	1	112,510
12	12	1	1	112,507
13	1	2	1	112,483
14	2	2	1	112,480
15	3	2	1	112,494
16	4	2	1	112,506
17	5	2	1	112,507
18	6	2	1	112,507
19	7	2	1	112,484
20	8	2	1	112,478
21	9	2	1	112,496
22	10	2	1	112,505
23	11	2	1	112,505
24	12	2	1	112,506
25	1	3	1	112,480
26	2	3	1	112,473
27	3	3	1	112,485
28	4	3	1	112,497
29	5	3	1	112,500
30	6	3	1	112,502
31	7	3	1	112,479
32	8	3	1	112,474
33	9	3	1	112,487
34	10	3	1	112,496
35	11	3	1	112,499
36	12	3	1	112,500

Continua

7	1	1	2	112,485
38	2	1	2	112,482
39	3	1	2	112,499
40	4	1	2	112,510
41	5	1	2	112,510
42	6	1	2	112,507
43	7	1	2	112,485
44	8	1	2	112,481
45	9	1	2	112,497
46	10	1	2	112,510
47	11	1	2	112,511
48	12	1	2	112,508
49	1	2	2	112,483
50	2	2	2	112,480
51	3	2	2	112,495
52	4	2	2	112,505
53	5	2	2	112,507
54	6	2	2	112,507
55	7	2	2	112,483
56	8	2	2	112,478
57	9	2	2	112,495
58	10	2	2	112,506
59	11	2	2	112,506
60	12	2	2	112,506
61	1	3	2	112,479
62	2	3	2	112,474
63	3	3	2	112,487
64	4	3	2	112,498
65	5	3	2	112,500
66	6	3	2	112,502
67	7	3	2	112,480
68	8	3	2	112,473
69	9	3	2	112,487
70	10	3	2	112,496
71	11	3	2	112,499
72	12	3	2	112,501

Continuação

73	1	1	3	112,485
74	2	1	3	112,481
75	3	1	3	112,498
76	4	1	3	112,509
77	5	1	3	112,510
78	6	1	3	112,508
79	7	1	3	112,483
80	8	1	3	112,482
81	9	1	3	112,499
82	10	1	3	112,510
83	11	1	3	112,511
84	12	1	3	112,508
85	1	2	3	112,484
86	2	2	3	112,480
87	3	2	3	112,495
88	4	2	3	112,503
89	5	2	3	112,507
90	6	2	3	112,506
91	7	2	3	112,483
92	8	2	3	112,480
93	9	2	3	112,495
94	10	2	3	112,505
95	11	2	3	112,506
96	12	2	3	112,506
97	1	3	3	112,479
98	2	3	3	112,474
99	3	3	3	112,485
100	4	3	3	112,496
101	5	3	3	112,499
102	6	3	3	112,502
103	7	3	3	112,480
104	8	3	3	112,471
105	9	3	3	112,485
106	10	3	3	112,496
107	11	3	3	112,500
108	12	3	3	112,500

Conclusão

ANEXO E

TABELA DE DADOS DA MEDIÇÃO DAS POSIÇÕES 1 E 3 PELO MÉTODO ALTERNATIVO, NOS ÂNGULOS DE 0 E 60 GRAUS SEM TINTA NA ESFERA. VALORES EM MM.

Peça	P1_0 graus		P1_60 graus		P3_0 graus		P3_60 graus	
	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ
1	112,480	0,0006	112,485	0,0000	112,480	0,0000	112,477	0,0006
2	112,479	0,0006	112,483	0,0006	112,477	0,0006	112,474	0,0006
3	112,490	0,0000	112,495	0,0006	112,489	0,0000	112,485	0,0015
4	112,501	0,0006	112,507	0,0006	112,501	0,0000	112,496	0,0006
5	112,500	0,0000	112,504	0,0006	112,499	0,0000	112,494	0,0006
6	112,505	0,0006	112,510	0,0010	112,505	0,0000	112,500	0,0012
7	112,481	0,0010	112,485	0,0012	112,480	0,0000	112,475	0,0006
8	112,479	0,0006	112,483	0,0006	112,477	0,0000	112,472	0,0012
9	112,490	0,0006	112,494	0,0000	112,489	0,0006	112,485	0,0006
10	112,503	0,0006	112,506	0,0006	112,502	0,0000	112,496	0,0006
11	112,500	0,0006	112,504	0,0006	112,499	0,0006	112,495	0,0010
12	112,506	0,0006	112,511	0,0006	112,505	0,0000	112,500	0,0006
\bar{y}	112,493	0,0005	112,497	0,0006	112,492	0,0001	112,488	0,0008

TABELA DE DADOS DA MEDIÇÃO DAS POSIÇÕES 1 E 3 PELO MÉTODO ALTERNATIVO, NOS ÂNGULOS DE 0 E 60 GRAUS COM TINTA NA ESFERA. VALORES EM MM.

Peça	P1_0 graus		P1_60 graus		P3_0 graus		P3_60 graus	
	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ
1	112,485	0,0000	112,490	0,0017	112,484	0,0006	112,482	0,0006
2	112,483	0,0000	112,487	0,0000	112,481	0,0006	112,479	0,0012
3	112,495	0,0006	112,498	0,0010	112,493	0,0000	112,491	0,0006
4	112,506	0,0006	112,510	0,0006	112,505	0,0000	112,503	0,0000
5	112,505	0,0006	112,509	0,0006	112,503	0,0000	112,501	0,0000
6	112,509	0,0010	112,513	0,0006	112,508	0,0006	112,506	0,0000
7	112,485	0,0006	112,489	0,0000	112,484	0,0000	112,481	0,0012
8	112,482	0,0010	112,486	0,0012	112,481	0,0006	112,479	0,0010
9	112,495	0,0006	112,498	0,0006	112,493	0,0006	112,491	0,0000
10	112,505	0,0006	112,509	0,0000	112,505	0,0006	112,503	0,0010
11	112,503	0,0006	112,507	0,0006	112,505	0,0012	112,501	0,0006
12	112,509	0,0006	112,513	0,0006	112,510	0,0000	112,507	0,0006
\bar{y}	112,497	0,0006	112,501	0,0006	112,496	0,0004	112,494	0,0006

ANEXO F

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MMC, página 1 de 3


HEXAGON
 METROLOGY

 LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO
 PELA CGCRE SOB O Nº 292


Certificado de Calibração

Nº **DEA 699-13**

DADOS DO SOLICITANTE

PÁGINA 1 DE 3

NOME : USP - ESCOLA DE ENGENHARIA DE SAO CARLOS
ENDEREÇO : AVENIDA TRABALHADORES SÃO CARLENSE, 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 MÍNIMA DURANTE TODO O PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.

MINIMA : 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 DESTES CERTIFICADOS REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE AO INSTRUMENTO SUBMETIDO À CALIBRAÇÃO NAS CONDIÇÕES ESPECIFICADAS, NÃO SENDO EXTENSIVO A QUALQUER LOTE.
- 3 - A REPRODUÇÃO DESTES CERTIFICADOS 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 20°C.
- 6 - NA FÓRMULA DO "MPEe" E DA "INCERTEZA DE MEDIÇÃO", "L" CORRESPONDE AO COMPRIMENTO MEDIDO EM MILÍMETROS.
- 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 MÁQUINA 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 2101
 www.hexagonmetrology.com.br

Continua

Certificado de Calibração da MMC, página 2 de 3



HEXAGON
METROLOGY

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO PELA CGCRE
SOB O Nº 292



Certificado de Calibração Nº DEA 699-13

MÉTODO DE CALIBRAÇÃO - EXATIDÃO (MPEe)

Página 2 de 3

PARA ESTE PROCESSO FOI UTILIZADO O PADRÃO ESCALONADO

FORAM TOMADOS 5 PONTOS NA ESCALA, SENDO QUE O MENOR É $\leq 30\text{mm}$ 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.

Certificado de Calibração da MMC, página 3 de 3



LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO PELA CGCRE
SOB O Nº 292



Certificado de Calibração Nº **DEA 699-13**

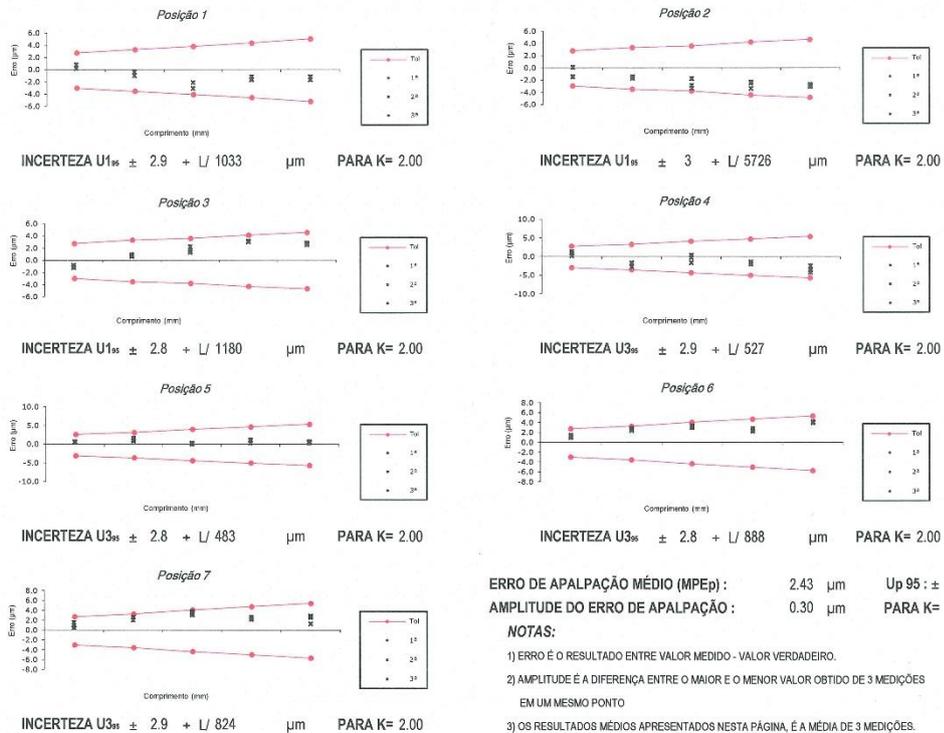
RESULTADO MÉDIO DAS MEDIÇÕES

PÁGINA 3 DE 3

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)		
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 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 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



ANEXO G

TABELA DE DADOS DA MEDIÇÃO DAS POSIÇÕES 1 E 3 PELO MÉTODO ALTERNATIVO, NOS ÂNGULOS DE 0 E 60 GRAUS DA MONTAGEM DE BLOCOS PADRÕES DE VALOR NOMINAL DE 112,500MM.

Repetição	P1_0	P1_60	P3_0	P3_60
1	112,502	112,507	112,501	112,499
2	112,502	112,506	112,501	112,498
3	112,502	112,506	112,501	112,498
4	112,502	112,506	112,502	112,498
5	112,502	112,505	112,501	112,499
6	112,502	112,506	112,502	112,498
7	112,502	112,507	112,501	112,497
8	112,502	112,507	112,501	112,498
9	112,502	112,507	112,502	112,498
10	112,502	112,506	112,501	112,498
Média	112,502	112,506	112,501	112,498
Desvio Padrão	0,0000	0,0007	0,0005	0,0006
Amplitude	0,000	0,002	0,001	0,002