

Caroline Moretto

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO
DE MEDIÇÃO COM APALPADORES EM
CENTROS DE USINAGEM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientadora: Profa.: Dra. Sueli Fischer Beckert.

Joinville
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Moretto, Caroline
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO
COM APALPADORES EM CENTROS DE USINAGEM / Caroline
Moretto ; orientador, Sueli Fischer Beckert, 2017.
130 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós
Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas,
Joinville, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Medição On
line. 3. Centro de Usinagem. 4. Apalpadores. 5.
Controle de processos. I. Beckert, Sueli Fischer .
II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências
Mecânicas. III. Título.

Caroline Moretto

**AValiação DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE
MEdição COM APALPADORES EM CENTROS DE
USINAGEM**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Joinville, 08 de Dezembro de 2017.



Prof. Breno Salgado Barra, Dr.
Coordenador do Curso

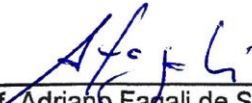
Banca Examinadora:



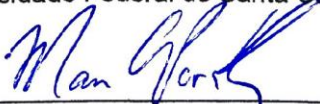
Prof.ª Sueli Fischer Beckert, Dr.ª

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Mauricio De Campos Porath, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Luiz Veriano O. Dalla Valentina, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina

À minha família, que dignamente me apresentou à importância da honestidade e persistência. Ao Willyam, minha escolha, minha certeza, meu amor.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Guido e Maria Moretto, que, desde pequena, me ensinaram valores e princípios, se esforçaram na minha educação e fizeram todo o possível para que eu encontrasse meu lugar no mundo. E às minhas irmãs Luciane e Fernanda, que sempre me apoiaram e serviram de exemplo.

Ao meu eterno namorado Willyam Stefanés, companheiro de vida, nas horas fáceis e difíceis, que esteve presente e me ajudou, desde o início, até os últimos ajustes da dissertação, pela compreensão, dedicação e motivação.

À minha professora e orientadora Sueli Fischer Beckert, que me acompanhou ao longo desta jornada, sempre com muita paciência e dedicação, pela confiança, apoio, experiência, e, sobretudo, pelo seu inestimável conhecimento.

À empresa Tupy S/A, toda a minha equipe de trabalho, principalmente ao Diogo Wiese, que incentivou a ideia e deu todo o apoio ao seu alcance.

Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos.
(Isaac Newton)

RESUMO

A medição on-line tem se tornado uma forma útil para controlar processos devido aos ganhos que pode trazer para processos de fabricação. Sua utilização em máquinas-ferramentas tem se tornado cada vez mais comum devido à redução de setups e medição em processo. No entanto, qual é a confiabilidade de uma medição realizada por uma máquina que, na prática, está se auto conferindo? Este trabalho sugere considerações que devem ser levadas em conta para implementar a medição on-line em centros de usinagem de três eixos ao utilizar apalpadores comutadores. O efeito da temperatura, os erros do apalpador, erros de posicionamento característicos de máquinas-ferramenta estão incluídos nos dados de medição, e são considerados para o desenvolvimento dos experimentos. Inicialmente, o experimento utiliza uma peça padrão para analisar estabilidade e tendência do Centro de Usinagem. Em um segundo momento, com uma peça produzida pela própria máquina-ferramenta, compara-se os resultados de medição do Centro de Usinagem com a medição realizada em uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC). A metodologia utilizada para avaliar os resultados da utilização do centro de usinagem como sistema de medição se baseia principalmente no manual MSA 4ª Edição, CEP 2ª Edição e VDA5. Por meio das análises, foi possível observar a instabilidade que a temperatura imprime ao sistema. Gráficos estáveis foram encontrados somente quando a medição foi realizada durante vários dias em um mesmo horário e com um delta de temperatura de aproximadamente 1°C. As diferenças entre as medições realizadas no Centro de Usinagem e na MMC, apesar de estáveis, podem apresentar amplos limites de controle. Assim, verifica-se que a medição on-line pode ser realizada para reduzir a frequência de medição em MMCs, no entanto, é necessário comparar a variação devido ao sistema com as tolerâncias da característica medida.

Palavras-chave: Medição On-line, Centro de Usinagem, Apalpadores, Controle de processos.

ABSTRACT

Online measurement has become a useful way to process control due to all gains it can bring to manufacturing processes. Its use in machine tools has become common due to the reduction of time lost during setups and in process measurement. However, what is the reliability of a measurement performed by a machine that is actually self-checking? This work suggests considerations that should be taken into account to implement the online measurement in three axes machining centers when using touch trigger probes. The effect of temperature, probe errors, positioning errors typical of machine tools are included in the measurement data, and are considered for the development of the experiments. Initially, the experiment uses a standard to analyze the stability and bias of the Machining Center. In a second moment, with a part produced by the machine tool, the measurement results of the Machining Center are compared to the ones performed on a Coordinate Measuring Machine (CMM). The methodology used to evaluate the results of the use of the machining center as a measuring system is based mainly on the manual MSA 4th Edition, CEP 2nd Edition and VDA5. Through the analyzes, it was possible to observe the instability that the temperature generate on the system. Stable graphs were found only when the measurement was performed for several days at the same time and with a delta for temperature of approximately 1° C. The differences between the measurements from the Machining Center and the CMM, although stable, may present wide limits of control. Thus, it is found that online measurement can be performed to reduce the measurement frequency in CMMs, however, it is necessary to compare the variation due to the system with the tolerances of the measured characteristic.

Keywords: On-line Measurement, Machining Centers, Touch Trigger Probes, Process control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de Centros de Usinagem	34
Figura 2: Principais Elementos de uma Máquina-Ferramenta	35
Figura 3: Fontes de erro em Centros de Usinagem.....	37
Figura 4: Exemplo de Utilização dos Apalpadores.....	39
Figura 5: Ilustração dos detalhes do apalpador comutador.....	40
Figura 6: Double Ball Bar	42
Figura 7: Trajetória Percorrida pelo Ballbar ao Longo do Teste .	43
Figura 8: Diagrama de Erros de um Centro de Usinagem Vertical	44
Figura 9: Resultado de Medição	45
Figura 10: Diagrama de Blocos – Metodologia Experimental	57
Figura 11: Cabeçote de Motor.....	58
Figura 12: Centro de Usinagem Mazak	59
Figura 13: Apalpador Renishaw OMP60	59
Figura 14: Teste de Ballbar.....	60
Figura 15: Projeto da Peça Padrão	61
Figura 16: Dispositivo de Fixação	62
Figura 17: Características de Medição	62
Figura 18: Fixação da Peça Padrão – Vista Superior.....	63
Figura 19: Definição dos Planos de Referência	64
Figura 20: Definição da Referência	65
Figura 21: Simulação de Medição com Apalpador Deslocado do Centro.....	66
Figura 22: Sensores de Temperatura do Cabeçote e Coluna.....	67
Figura 23: Sensores de Temperatura da Base.....	67
Figura 24: Tela do Programa Mazak Thermal Deformation Compensation	68
Figura 25: Distâncias dos Diâmetros à Origem	69
Figura 26: Diâmetros Medidos	69
Figura 27: Diagrama de Blocos – Análise de Resultados.....	73
Figura 28: Gráfico de Cilindricidade do Diâmetro de Referência	74
Figura 29: Gráfico de Circularidade do Diâmetro de Referência	74
Figura 30: Inclinação da Peça Padrão em Relação ao Eixo Z....	76
Figura 31: Carta I-MR para Diâmetro de 20 mm e z -30 mm	79
Figura 32: Carta I-MR para Distância de 498 mm.....	79
Figura 33: Temperatura vs. Cabeçote Medida	80
Figura 34: Carta I-MR para Distância de 498 mm.....	81

Figura 35; Carta I-MR para Diâmetro de 19,9987 mm.....	82
Figura 36: Histograma e Gráfico de Normalidade.....	83
Figura 37: Estudo Tipo I – Diâmetro de 20 mm Altura -30 mm ..	87
Figura 38: Estudo Tipo I – Distância de 498 mm	87
Figura 39: Valores Individuais e AM para Diâmetros	89
Figura 40: Valores Individuais e AM para Distâncias	91
Figura 41: Análise da Amostra Independente – Diâmetros.....	94
Figura 42: Análise da Amostra Independente – Distâncias.....	97
Figura 43: Amplitude da Repetibilidade – Diâmetros	102
Figura 44: Amplitude da Repetibilidade – Distâncias.....	103
Figura 45: Análise de Repetibilidade – Diâmetro B2306	105
Figura 46: Rotina de Apalpação	125
Figura 47: Rotação da Peça Padrão em Relação ao Eixo Y	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens Versus Desvantagens da Medição On-line	28
Tabela 2: Erros Potenciais das Máquinas-ferramenta.....	44
Tabela 3: Dimensões e Características a Serem Medidas do Cabeçote	70
Tabela 4: Dimensões da Peça Padrão	75
Tabela 5: Resultado de Medição para Pontos 1 e 2 da Figura 30	76
Tabela 6: Resultados de Medição Ballbar	77
Tabela 7: Desvio Padrão das Amostras de Diâmetro.....	91
Tabela 8: Desvio Padrão das Amostras de Distância	93
Tabela 9: Resultados Método da Amostra Independente – Diâmetros	97
Tabela 10: Resultados Método da Amostra Independente – Distâncias	100
Tabela 11: Resultados Análise de Variância – Diâmetros	101
Tabela 12: Resultados da Análise de Variância – Distâncias ..	103
Tabela 13: Comparação de Resultados de VE para Diâmetros	105
Tabela 14: Valor de E2, D3 e D4 para Gráficos em R.....	121
Tabela 15: Valor de E2, D3 e D4 para Gráficos em S.....	121
Tabela 16: Valores tabelados para t-Student	123
Tabela 17: Resultado de Medição para Pontos 1 e 2 da Figura 47	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIAG – Automotive Industry Action Group
 α – Alfa
 β – Beta
CMM – Coordinate Measuring Machine
CNC – Comando Numérico Computadorizado
CEP – Controle Estatístico de Processo
 C_g – Índice de Dispersão
 C_{gk} – Índice de Centralização
DIN – Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização)
gl (v)– Número de graus de liberdade
 H_0 – Hipótese Nula
 H_1 – Hipótese Alternativa
ISO – Organização Internacional de Normalização
LC – Linhas de centro
LCL – Limite inferior de controle
MF – Máquina-ferramenta
MI – Média das Indicações
MMC – Máquina de Medição por Coordenadas
MR – Amplitude Móvel
MRbarra – Amplitude Móvel Média
MSA – Measuring System Analysis
 n – Número de medições realizadas
NC – Numerical Control (Controle Numérico)
 R_{medio} – Amplitude Média
RM – Resultado de Medição
 s_{medio} – Desvio padrão
 σ – Sigma (Estimativa do desvio padrão)
 T_d – Tendência
Tol – Tolerância
 uc – Incerteza Combinada
UCL – Limite superior de controle
VT – Variação Total
VE – Variação da repetibilidade
VA – Variação peça a peça
VR – Valor de Referência
VDA 5 – Verband der Automobilindustrie 5 (Capacidade dos Processos de Medição)
 X_{barra} – Média das Indicações

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVO GERAL.....	30
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	33
2.1	APLICAÇÕES E DEFINIÇÕES DE MÁQUINAS-FERRAMENTA.....	33
2.1.1	Apalpadores em Centros de Usinagem	39
2.2	AVALIAÇÃO DO CENTRO DE USINAGEM	41
2.2.1	Teste Double Ball Bar	42
2.2.2	A Peça Padrão.....	46
2.3	SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	47
2.3.1	Métodos Estatísticos para Análise de Sistemas de Medição	48
2.3.2	Centro de Usinagem como Sistema de Medição	50
2.3.2.1	Análise de Estabilidade	50
2.3.2.2	Análise de Tendência pelo Método da Amostra Independente.....	52
2.3.2.3	Análise de Tendência por Meio do Método da Carta de Controle	53
2.3.2.4	Análise de Tendência e Capacidade do Sistema de Medição por Meio da Avaliação do Estudo Tipo 1	54
2.3.2.5	Repetibilidade por Meio da Análise de Variância (Anova)	55
3	METODOLOGIA.....	57
3.1	TESTE DE BALLBAR.....	59
3.2	A PEÇA PADRÃO	60
3.3	A PEÇA PADRÃO NO CENTRO DE USINAGEM.....	63
3.3.1	Definição do Ponto Zero	64
3.4	MEDIÇÃO DA PEÇA DE PRODUÇÃO.....	68

4	RESULTDAOS E DISCUSSÕES	73
4.1	RESULTADOS DIMENSIONAIS DA PEÇA PADRÃO	73
4.2	ANÁLISE DA INCLINAÇÃO DA PEÇA NO CENTRO DE USINAGEM	75
4.3	RESULTADOS DO BALLBAR	77
4.4	ANÁLISE DA PEÇA PADRÃO NO CENTRO DE USINAGEM	78
4.4.1	Análise de Estabilidade	78
4.4.2	Análise de Tendência – Método da Carta de Controle	82
4.4.3	Estudo Tipo I – VDA 5	85
4.5	ANALISE DA PEÇA DE PRODUÇÃO	88
4.5.1	Análise de Estabilidade	88
4.5.2	análise de Tendência - Método da Amostra Independente	94
4.5.3	Análise de Repetibilidade.....	100
4.5.4	Impacto do Processo de Usinagem na Medição On-Line	104
4.5.5	Considerações para Medição On-line em Centro de Usinagem	105
5	CONCLUSÕES	109
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
	REFERÊNCIAS	113
	ANEXO A – FATORES PARA CÁLCULO DE LIMITES	121
	ANEXO B – TABELA T STUDENT	123
	ANEXO C – CÁLCULO DO DIÂMETRO DA ESFERA CONFORME O PROGRAMA DO CENTRO DE USINAGEM	125
	ANEXO D – VERIFICAÇÃO DA INCLINAÇÃO DA PEÇA PADRÃO	129

1 INTRODUÇÃO

No setor manufatureiro as máquinas-ferramentas são peças-chave nos processos de fabricação. Acontece que, em alguns casos, a falta de robustez dos processos de fabricação exige a utilização em excesso de equipamentos de controle dimensional como as Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC). Esta prática pode resultar em longos períodos com o processo parado uma vez que, sem os resultados de medição, não é possível decidir pela liberação da produção ou a necessidade de ajuste do processo de fabricação.

Outros problemas podem ser citados no controle do processo por intermédio das MMCs. Além das “filas” nos postos de medição, há de se considerar o tempo necessário para climatização das peças a serem medidas. Segundo Arenhart et al (2012), a climatização é essencial para a redução dos erros existentes no processo de medição em MMCs, principalmente quando se trata de produtos com grandes massas.

Para reduzir o uso de MMCs (remote measurement), uma alternativa é o trabalho conjunto de sistemas de medição dedicados, como ogivas, calibradores do tipo Passa/Não Passa ou dispositivos de controle. Nestes casos, para realizar a medição, a peça é retirada da máquina, mas medida próxima ao local da fabricação.

Na busca por outra solução, pode-se considerar o uso da medição em linha (in-process measurement ou in-suto), pois, com ela, evita-se a retirada da peça da máquina para realizar o controle do processo. Segundo Zhan-Qiang, Venuvinod, Ostafiev (1998), em máquinas-ferramenta, a medição pode ocorrer durante o processo sem qualquer interrupção na usinagem. A informação produzida pela medição é fornecida continuamente e, dessa forma, a medição in-process oferece uma solução prática para que seja feita em tempo real, com controle de qualidade.

Lin e Tsai (1996) discorrem sobre este tipo de processo e definem como medição on-line "método pelo qual a medição é efetuada em uma máquina-ferramenta, como parte do ciclo total de usinagem, mas não ao mesmo tempo em que a retirada de material estiver sendo realizada".

As técnicas on-line não só reduzem o tempo de obtenção de resultados, mas, também, aumentam a velocidade de

decisão, pois fornecem resultados em curtos intervalos de tempo se comparados aos tempos de medição tradicionais off-line. A tabela 1 resume algumas das vantagens e desvantagens do processo em questão.

Tabela 1: Vantagens Versus Desvantagens da Medição On-line

Controle de Processos On-line	
Ganhos	Limita�es
Mant�m a etapa de setup dentro das máquinas	Inspe�o de peças depois do valor agregado
Máquina-ferramenta � usada como uma esta�o de medi�o	Pode ser afetado pelos erros da máquina
Possibilidade de adicionar no ciclo de usinagem um passo para corrigir a peça enquanto está na máquina	Aumenta o tempo de ciclo da máquina

Fonte: Smith (2016)

Para realizar a medi o on-line, a Renishaw (2011) desenvolveu seu primeiro apalpador dedicado   máquina-ferramenta na década de 70. Utilizados em centros de usinagem, estes apaladores são inseridos diretamente no magazine das máquinas e, posteriormente, acoplados ao eixo árvore, da mesma forma como uma ferramenta.

A utiliza o de apaladores tem se tornado foco de pesquisas como a de Ibaraki et al (2013), que propõe um esquema para a calibra o de centros de usinagem por meio da cria o de um mapa de erros. Esta proposta   executada com o mapeamento de pontos feitos com base na medi o on-line de peças. Também tentando corrigir erros, Jiang et al (2015) utiliza um apalpador e uma peça padrão para identifica o e mapeamento de erros em uma máquina de cinco eixos.

Além destes, Qingzhen Bi et al (2015), Huang et al (2015) e Chen et al (2013) realizaram o estudo da compensa o de erros em centros de usinagem por meio da utiliza o de um apalpador. Em seus trabalhos, eles fazem uso dos resultados gerados por esta ferramenta para corrigir o trajeto da usinagem, reduzindo assim os erros da peça final.

Entretanto, por mais que os fabricantes de apaladores ofereçam solu es para medir características diversas com repetibilidade considerável, há muita incerteza acerca do resultado gerado por uma máquina que, na prática, está se

autoconferindo. Em suma, o problema da pesquisa reside na confiabilidade de uma medida feita por uma máquina-ferramenta quando não se conhece suas as condições de desgaste, ou, então, as respostas das variações de temperatura que a máquina é diariamente exposta.

Dessa forma, para realizar medição on-line, é imperativo testar a viabilidade da utilização de apalpadores em centros de usinagem. Segundo afirmação de Imkamp et al (2016), quando se trata de metrologia ligada à fabricação, deve-se abordar cinco principais desafios: velocidade, precisão, confiabilidade e flexibilidade.

Para suprir a necessidade de um controle ágil das peças de produção, propõe-se a fabricação de uma peça padrão com medidas materializadas, que serão verificadas por meio do apalpador OMP60 da Renishaw. A Peça padrão dentro do centro de usinagem servirá para verificação do desempenho do apalpador.

Para testar a estabilidade da medição on-line foi utilizado um Centro de Usinagem Vertical Mazak. A análise da confiabilidade deve ser aplicada durante um período de tempo, adotando-se, no presente trabalho, o período de seis meses. Neste prazo, espera-se que as medições sejam realizadas em diferentes temperaturas, para que se possam avaliar os resultados quando expostos a esta variação.

Em se tratando de flexibilidade, a proposta do trabalho apresenta uma limitação neste ponto. Visando executar os testes sem auxílio de softwares, o controle de erros de forma não é possível devido à sua complexidade de cálculo. Mutilba et al (2017) confirma que os softwares empregados na máquina ainda são insuficientes para fins de metrologia.

Além disso, há de se considerar que o tempo máquina-ferramenta é mais caro do que o tempo MMC. Dessa forma, as medições feitas em uma máquina-ferramenta devem, claramente, agregar valor ao processo de fabricação por meio da redução no tempo de máquinas parada.

Dessa forma, para analisar as questões expostas, utiliza-se da pesquisa exploratória, bibliográfica e estudo de caso como cerne para a execução do trabalho, uma vez que o mesmo envolve diferentes áreas de conhecimento nas quais ainda há certa restrição de ciência acumulada e sistematizada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho do processo de medição em centros de usinagem por meio da utilização de apalpadores, e, com os resultados, verificar a possibilidade de redução do uso de Máquinas de Medição por Coordenadas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Por intermédio da fabricação de uma peça padrão, buscase, em um Centro de Usinagem CNC, inspecionar pontos específicos pré-definidos de acordo a sua importância. Para comparar os resultados, utiliza-se uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC). Com isso, tem-se por objetivos específicos os que seguem:

- a) Verificar as diferenças entre as medições realizadas no Centro de Usinagem e na Máquina de Medição por Coordenadas;
- b) Acompanhar a estabilidade das medições realizadas no Centro de Usinagem;
- c) Comparar resultados obtidos no Centro de Usinagem e os da MMC definidos de acordo com o desenho 2D;
- d) Verificar o funcionamento do sistema de medição on-line em dias com maiores amplitudes térmicas e, com isso, estudar a influência da temperatura na obtenção de medidas;
- e) Elaborar recomendações para o controle de peças de produção por meio do uso de apalpadores em Centros de Usinagem.

Espera-se, com a realização deste estudo, que seja possível determinar se o sistema é confiável o suficiente para reduzir a quantidade de peças que são retiradas da linha de produção para o controle do processo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 traz a introdução e contextualização do trabalho, mostrando a motivação para o seu desenvolvimento.

Além disso, neste capítulo é descrita a problemática do estudo e a proposta para a respectiva solução.

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica utilizada como auxílio para o desenvolvimento dos experimentos. Em sua extensão, é possível verificar a interdisciplinaridade dos conteúdos e suas referências mais relevantes.

No Capítulo 3 descrevem-se os métodos utilizados para a análise do Centro de Usinagem e sua comparação com a Máquina de Medição por Coordenadas.

O Capítulo 4 apresenta as discussões e os resultados obtidos com base nos ensaios experimentais.

No Capítulo 5 são descritas as considerações finais do trabalho.

O Capítulo 6 versa sobre sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema discutido.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas que serviram de base para o desenvolvimento do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresentam-se os conceitos que servirão de apoio para o entendimento do tema em estudo. Para tanto, aborda-se as definições envolvendo usinagem, a máquina-ferramenta, entendimento e análise do sistema de medição, bem como as respectivas ferramentas utilizadas para testar o controle on-line.

2.1 APLICAÇÕES E DEFINIÇÕES DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

Segundo Izaro (2011), a usinagem é um processo de acabamento realizado em peças fabricadas em metais e em outros materiais. Trata-se de uma tecnologia que funciona a partir da remoção de material e é considerada fundamental para o setor de máquinas-ferramenta e todos seus clientes: automotivos, aeronáuticos, mecânica de precisão, aeroespacial, naval, etc. Ainda para o autor, pode-se resumir o entendimento de usinagem com a simples definição: “processo de fabricação com remoção de cavaco”.

Este processo é feito por meio de uma máquina-ferramenta, a qual, segundo Chryssolouris (2005), causa o movimento da ferramenta e da peça de trabalho com o intuito de produzir uma forma ou superfície geométrica determinada.

No decorrer dos anos, muitas melhorias com respeito à automação do processo de usinagem foram desenvolvidas. De acordo com Youssef e El-Hofy (2008), em 1953, a introdução da tecnologia de controle numérico (NC – numerical control) abriu as portas para controle numérico computadorizado (CNC) em centros de usinagem, o que aumentou a precisão e a uniformidade do produto.

Para Lopez e Lamikiz (2009), os avanços nos últimos anos definem mais apropriadamente a máquina-ferramenta como um mecanismo espacial servo-controlado, que orienta e dirige uma ferramenta de corte ao longo de uma trajetória complexa, para a criação de uma nova forma na matéria-prima.

No que concerne à produtividade desta máquina, Correa e Correa (2006) explicam que esta característica pode ser entendida como uma medida da eficiência, por intermédio da qual recursos de entrada do sistema de agregação de valor são

transformados em saídas (principalmente de peças sem defeitos). Para Youssef e El-Hofy (2008), a produtividade pode ser medida pelo número de peças produzidas em uma unidade de tempo, pela taxa de remoção volumétrica ou pela taxa de remoção de material por unidade de energia consumida.

Dentre as máquinas-ferramenta existentes, Kalpakjian e Schmid (2009) descrevem o Centro de Usinagem (figura 1) como um equipamento que é controlado por computador, capaz de executar uma variedade de operações em diferentes superfícies e orientações de uma peça de trabalho. Normalmente, neste equipamento a peça de trabalho é estacionária e as ferramentas de corte giram.

Figura 1: Exemplos de Centros de Usinagem



Centro de Usinagem Vertical



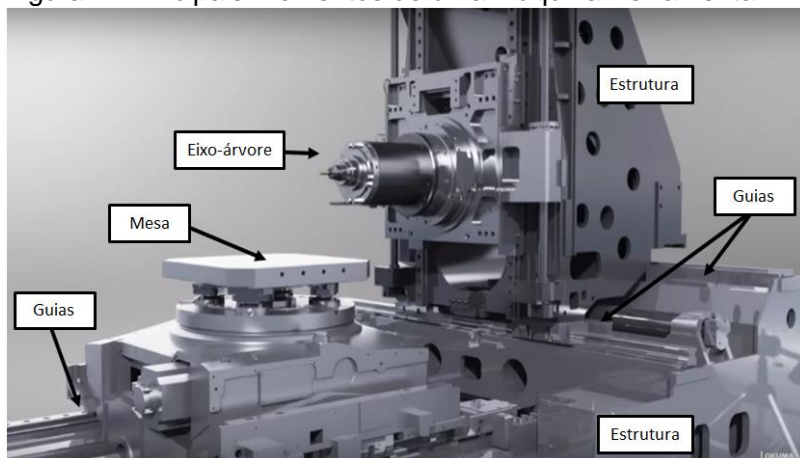
Centro de Usinagem Horizontal

Fonte: Okuma (2016)

Os elementos que constituem a máquina-ferramenta, segundo Youssef e El-Hofy (2008), incluem os mostrados na figura 2 e também os listados a seguir:

- a) A Estrutura;
- b) Guias de deslocamento;
- c) Eixo árvore e seus rolamentos;
- d) Mecanismos de acionamento (motores);
- e) Elementos de fixação da peça.

Figura 2: Principais Elementos de uma Máquina-Ferramenta



Fonte: Okuma (2017)

Youssef e El-Hofy (2008) afirmam que as principais funções da estrutura da máquina-ferramenta são resistir às torções causadas por cargas estáticas e dinâmicas, dar estabilidade e precisão às partes móveis, liberar as tensões residuais e amortecer a vibração.

Em se tratando das guias, Lopez e Lamikiz (2009) esclarecem que estes componentes são diretamente responsáveis pela precisão e suavidade dos movimentos dos eixos da máquina. As guias são sistemas deslizantes onde duas superfícies estão em contato. A parte fixa é conhecida como guia onde é inserido o componente deslizante chamado de contra guia ou carruagem. Os parâmetros funcionais necessários para as guias longitudinais são a exatidão geométrica, rigidez, resistência ao desgaste e ao atrito.

Segundo Stoeterau (2004), a estrutura responsável pelo movimento rotativo da ferramenta em um Centro de Usinagem é o eixo-árvore. Para sua fabricação, deve-se estudar cuidadosamente sua estrutura e dimensionamento, pois grande parte dos esforços gerados pelo processo de usinagem (velocidade angular, torque e potência) é absorvida pelos seus mancais.

Para Brecher (2005), os componentes do acionamento de avanço mecânico incluem todos os elementos estruturais que se

encontram no fluxo de energia entre o servomotor e a ferramenta ou peça de trabalho. Além de um componente para converter rotação em movimento de translação, como um fuso de esferas, é necessário o mecanismo de avanço, os componentes para transmissão de potência (sistemas de fixação da peça e ferramenta, guias lineares e rolamentos) e o acoplamento.

Ocorre que os componentes de máquina acima descritos podem ocasionar erros de posicionamento da ferramenta em relação à peça. Segundo Nascimento (2015), os principais fatores que exercem tal influência são os erros geométricos e os efeitos térmicos sobre os eixos.

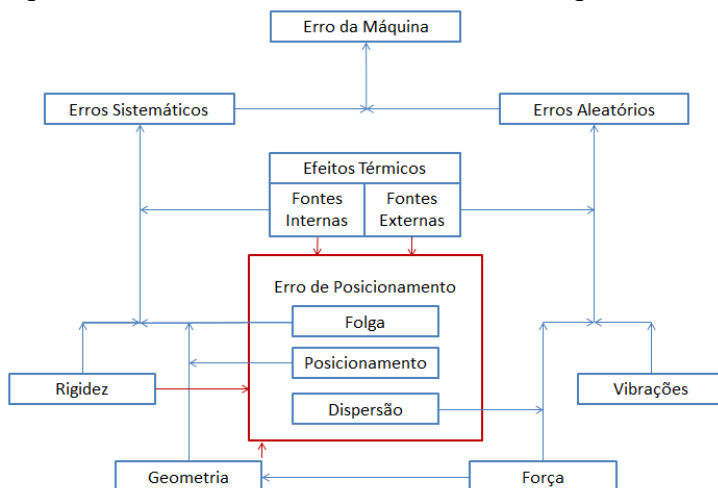
Para reduzir o efeito do aquecimento, os fabricantes de máquinas desenvolveram formas de compensar a variação no comprimento dos componentes do Centro de Usinagem. Como exemplo, Lopez e Lamikiz (2009) citam a empresa Mazak, que desenvolveu um sistema para controlar e compensar a variação de comprimento em pontos estratégicos da máquina. Este sistema é comercializado em máquinas CNC que são equipadas com o sistema Mazatrol Matrix.

De acordo com Weck, M. (1984), esforços mecânicos estáticos e dinâmicos são causados pelo próprio peso da máquina, pelo peso da peça e pelos esforços do processo de usinagem. Essas influências podem afetar o comportamento geométrico das máquinas-ferramenta, pois causam deformações elásticas que podem modificar a posição correta entre a peça e a ferramenta.

Segundo De Souza (2001), um dos fatores que influencia os erros geométricos da peça usinada é a velocidade de processamento do CNC. Esta deve ser alta para que não haja sobrecarga do cálculo que retarde ou cause oscilações no avanço da ferramenta.

Nascimento (2015) agrupa as principais fontes de erro de centros de usinagem e os divide em sistemáticos e aleatórios (figura 3). Dentre elas, a precisão do sistema de medição linear, deformação elástica dos componentes de acionamentos, forças de gravidade, sistemas de controle, forças de corte e vibrações.

Figura 3: Fontes de erro em Centros de Usinagem



Fonte: Anderson, P. (1992)

Na sequência, Nascimento (2015) descreve parte da dinâmica do funcionamento do encoder que controla a movimentação dos eixos. Segundo ele, ao se movimentar, o dispositivo interrompe o feixe de luz que ilumina o foto sensor. Dessa forma, uma sequência de pulsos é gerada. Novamente, são usados dois conjuntos de foto sensores para gerar sinais defasados entre si que permitam distinguir o sentido do movimento. Assim, o erro de posicionamento é identificado e enviado ao comando numérico da máquina para que a devida compensação possa ser realizada.

O autor define o erro de posicionamento como o desvio entre a posição real e teórica de um determinado elemento e cita fatores que os geram, quais sejam: rugosidade, dureza superficiais das peças responsáveis pelas movimentações dos eixos e pré-cargas em rolamentos entre outros.

Os resultados do trabalho de Okafor e Ertekin (2000) mostram que motores de acionamento dos eixos são as principais fontes de calor. A precisão da posição linear é melhor quando a máquina está fria e se deteriora com o aumento do tempo de operação nos seus três eixos.

Segundo Ramesh et al (2000), os erros dinâmicos ocorrem devido a vibrações na máquina-ferramenta. Algumas das fontes

de vibrações são: compressores de ar, equipamentos de ventilação, vibração transmitida pelo chão da fábrica e rotação mecânica dos componentes da máquina-ferramenta, tais como motores e transmissores. Estes fazem parte do conjunto de erros aleatórios, ou seja, imprevisíveis.

Ainda para os autores, os erros térmicos são aqueles que causam um deslocamento relativo entre a peça e a ferramenta, por conta da deformação ou expansão dos elementos da máquina, devido ao aumento da sua temperatura. O movimento relativo entre vários componentes da máquina gera calor nas zonas de contato, levando à deformação destes elementos.

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009), um fator importante a ser analisado é a distorção térmica dos componentes da máquina-ferramenta, pois contribuem de forma significativa para a sua falta de precisão. Ainda segundo os autores, as fontes de calor podem ser divididas em duas categorias:

- a) Fontes internas: rolamentos, ballscrews, guias das máquinas, motores, fuso, e servomotores, além da energia gerada na zona de corte durante a usinagem e do resfriamento provocado pelos sistemas de arrefecimento;
- b) Fontes externas: fluidos de corte, fornos que podem estar próximos, aquecedores, outras máquinas próximas, luz solar, flutuações na temperatura ambiente devido à presença de aparelhos de ar-condicionado ou até mesmo alguém abrir ou fechar uma porta ou uma janela.

Segundo Lopez e Lamikiz (2009), para que o Centro de Usinagem alcance o equilíbrio térmico, muitos operadores utilizam o método conhecido como aquecimento, no qual a máquina é ligada para funcionar durante um período de tempo, sem processamento de corte, até que a variação de temperatura se estabilize. Este método pode durar algumas horas, o que prejudica a eficiência de produção devido ao elevado gasto de tempo.

Pesquisadores têm estudado ao longo das décadas maneiras para reduzir os erros supracitados. Dentre eles, há as seguintes propostas: para Donaldson e Thompson (1986), deve haver redução e realocação das fontes de calor; já para Spur et

al (1988), é necessário reorganizar a estrutura da máquina; e, por fim, Suh e Lee (2000) abordam o uso de materiais que tenham maior rigidez.

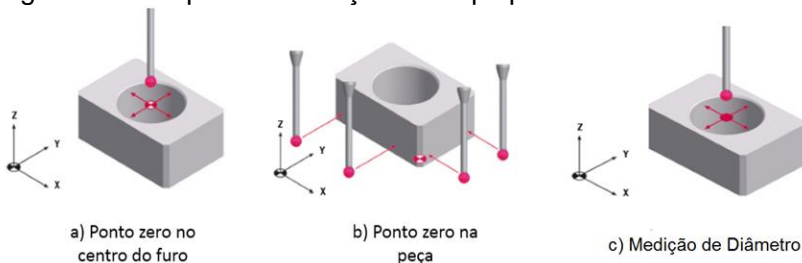
2.1.1 Apalpadores em Centros de Usinagem

Segundo Wozniak, Byszewski, Jankowski (2013), durante muitos anos, os apalpadores eram comumente utilizados em Máquinas de Medição por Coordenadas. Porém, nos últimos anos, a possibilidade de uma medição de um objeto diretamente em uma máquina-ferramenta CNC tornou-se mais difundida.

De acordo com a Norma ISO 10360–1:2011, os sensores de medição podem ser definidos como dispositivos que geram os sinais durante o apalpamento de uma peça. Segundo Sousa (2000), quando usados em conjunto com a máquina-ferramenta, os sensores podem auxiliar nos seguintes quesitos:

- Localização da peça ou definição do ponto zero (figura 4.a e 5.b);
- Ajuste de ferramentas;
- Medições da peça usinada na própria máquina (figura 4.c);
- Digitalização de superfícies.

Figura 4: Exemplo de Utilização dos Apalpadores



Fonte: Hexagon (2016)

O sistema de aquisição por contato (sistema de apalpamento) é subdividido em duas categorias principais: os comutadores (touch triggers) e os medidores. O primeiro tipo adquire os pontos de forma individual, perdendo contato com a superfície após a definição de cada ponto. Já o segundo adquire

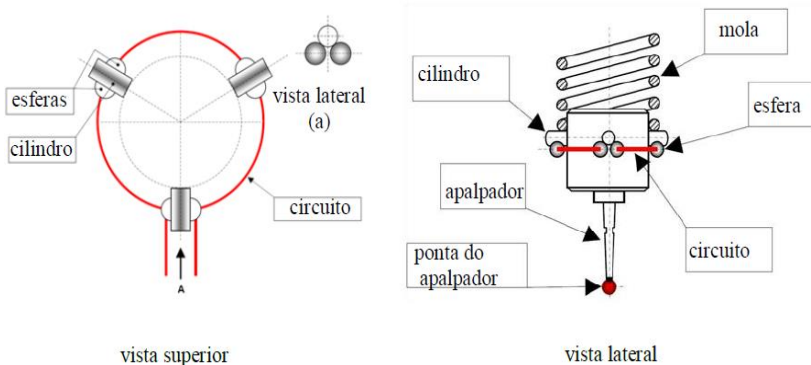
os pontos sem perder contato com a superfície (modo scanning) e pode fazê-lo, também, de forma individual.

Conforme Shen e Moon (1996), o sinal que dispara o funcionamento do apalpador comutador não é gerado imediatamente quando a haste entra em contato com a peça. O apalpador irá continuar seu movimento e haverá uma deflexão da haste até que atinja um valor mínimo necessário para ativar o seu sistema sensorial. A distância percorrida entre o instante do toque e a geração efetiva do sinal é chamada de folga de percurso ou pretravel.

São basicamente quatro os princípios físicos utilizados para gerar o sinal que indica o contato com a peça: 1) o contato elétrico ou a falta dele (cinemático ou kinematic contact); 2) luz (interferometria a laser); 3) deformação (strain-gauges); 4) o efeito Piezo Elétrico. Neste trabalho, será empregado apenas o tipo cinemático.

Para Mayer et al (1994), os apalpadores de contato (ou cinemáticos), mostrados na figura 5, tem seu funcionamento por meio do mecanismo cinemático, formado por três pequenas peças cilíndricas que permanecem assentadas sobre seis rolos ou esferas devido à pressão exercida pela mola sobre elas.

Figura 5: Ilustração dos detalhes do apalpador comutador



Fonte: Renishaw (2011)

Uma corrente elétrica normalmente passa pelos seis rolos e as três peças cilíndricas, em série. Quando a pressão de contato com a peça a ser medida ultrapassa a resistência da mola em manter o mecanismo na posição estável, ele entrará em

movimento. Com isso, o movimento faz com que a resistência de um ou mais contatos sejam alteradas, cortando a corrente elétrica que passava por eles, gerando, assim, o sinal de "trigger". Depois de realizada a medição, afastado o apalpador da peça, a mola novamente força o mecanismo à posição inicial de estabilidade e restabelece a corrente elétrica entre eles.

2.2 AVALIAÇÃO DO CENTRO DE USINAGEM

Segundo o fabricante Renishaw (2016), as modernas máquinas-ferramenta possuem especificações excelentes quando novas, mas o seu desempenho pode ser comprometido por fundações inadequadas, má localização e instalação incorreta. Assim, conforme Muelaner (2014), a avaliação destes equipamentos é imprescindível pois com eles é possível determinar se a máquina-ferramenta é capaz de produzir peças dentro dos limites especificados.

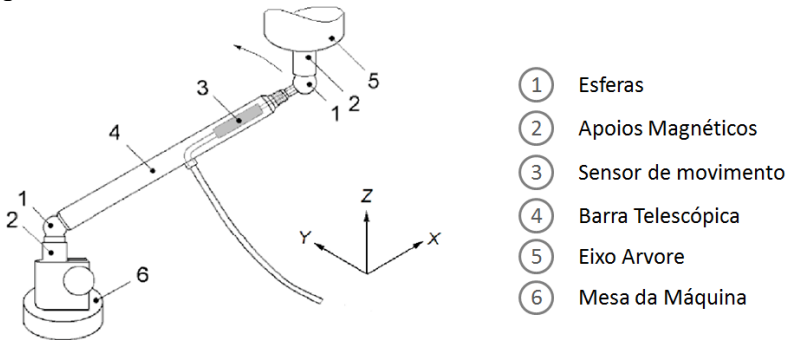
Sousa (2000) cita que os métodos atuais são classificados da seguinte forma:

- a) Métodos de qualificação: permitem obter resultados bastante confiáveis e completos sobre o estado da máquina, mas são de difícil aplicação, pois exigem pessoal altamente qualificado para a tarefa, envolvem longos períodos de tempo, e, dependendo do caso, são de elevado custo. Os resultados destes ensaios permitem atualizar os fatores de compensação de erros no CNC da máquina. O laser interferométrico e as réguas/esquadros são exemplos de métodos de qualificação.
- b) Métodos de avaliação: são de aplicação fácil e rápida e envolvem equipamentos de baixo custo, mas fornecem apenas uma visão geral sobre o estado da máquina. Os erros da máquina normalmente se apresentam sobrepostos, sendo difícil ou duvidável a separação de cada fonte de erro. Destinam-se a uma avaliação mais rápida e frequente da máquina. Como exemplos de métodos de avaliação, citam-se o double ball bar e a peça padrão.

2.2.1 Teste Double Ball Bar

De acordo com a norma ISO 230-1 (2012), um sistema de teste ball bar tem quatro componentes principais: a barra telescópica, duas esferas, apoios magnético de precisão e um sensor de movimento. A figura 6 mostra os itens mencionados.

Figura 6: Double Ball Bar



Fonte: ISO 230-1 (2012)

Segundo Albert (2014), o double ball bar é, como o próprio nome indica, uma barra telescópica com duas esferas de precisão localizadas uma em cada extremidade. Dentro da barra, encontram-se transdutores que detectam o movimento dos componentes telescópicos.

Ainda para o autor, depois de fixar os componentes magnéticos à mesa e ao fuso, as esferas da barra são ligadas aos alojamentos magnéticos. Este arranjo permite que o ball bar meça variações mínimas no raio, enquanto a máquina percorre um caminho circular programado em torno da mesa da máquina.

A Renishaw, um dos fabricantes deste instrumento, descreve os testes programados no software do Ballbar QS-20 W em seus manuais e artigos disponíveis on-line. Em um deles (“Laser measurement and Ballbar diagnosis for motion systems”, 2013), é possível verificar informações sobre o Ballbar deste fabricante, assim como as rotinas que são executadas pelo equipamento. O fabricante alega ainda que os testes descritos em seus materiais são realizados de acordo com a norma ISO 230.

De acordo com Albert (2014), o teste básico do ball bar exige que a máquina execute dois círculos consecutivos: um no sentido horário e o outro no sentido anti-horário. No passo seguinte, o programa testa planos perpendiculares ao padrão X-Y. Para isso, o software percorre um arco de 220° nos dois planos (figura 7).

Figura 7: Trajetória Percorrida pelo Ballbar ao Longo do Teste

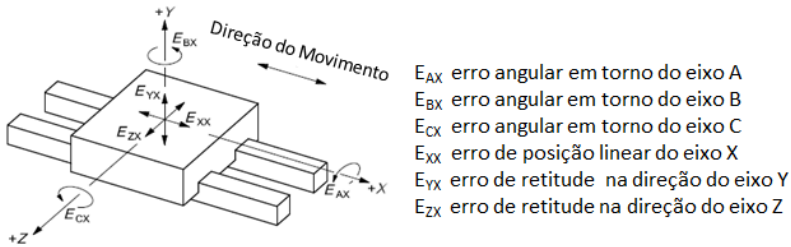


Fonte: Renishaw (2016)

Ainda para Albert (2014), em teoria, uma máquina com desempenho de posicionamento perfeito se moveria em um caminho circular correspondente ao círculo do programa. Na realidade, muitos fatores na geometria da estrutura da máquina, a capacidade do sistema de controle, o desgaste nos componentes móveis dos eixos da máquina, além de outros, causam variações no raio do círculo de teste. Essas variações resultam em um caminho que se desvia do círculo perfeito e programado.

Conforme Cummings e Mariani (2009), existem seis erros que podem ser atribuídos a cada eixo da máquina: três de translação e três de rotação. Além destes, também devem ser levados em consideração os erros de perpendicularidade entre os eixos (XY, YZ, ZX). Para um Centro de Usinagem de três eixos, tem-se 21 possíveis fontes de erro. Esta é a visão mais amplamente aceita da precisão volumétrica da máquina. A figura 8 ilustra os erros mencionados.

Figura 8: Diagrama de Erros de um Centro de Usinagem Vertical



Fonte: ISO 230-1 (2012)

O efeito somado de todos esses erros aparece nos resultados após a usinagem, pois, o material retirado ao longo do processo não é removido na posição exata desejada. Em alguns casos, a diferença entre o programado e a dimensão real é tão pequena que pode ser considerada insignificante. Entretanto, quando o projeto da peça usinada exige tolerâncias menores, esses erros podem fazer a diferença entre lucrar com usinagem ou gerar refugos que irão reduzir a margem final de faturamento.

Para a Renishaw (2013), os principais erros das máquinas-ferramenta são os ilustrados na tabela 2.

Tabela 2: Erros Potenciais das Máquinas-ferramenta

Erros Potenciais nos Eixos	
Folgas	Erro Cíclico
Picos de reversão	Retitude
Folga Lateral	Perpendicularidade

Erros Potenciais entre Eixos	
Falta de Sincronismo entre Servos	Esquadro

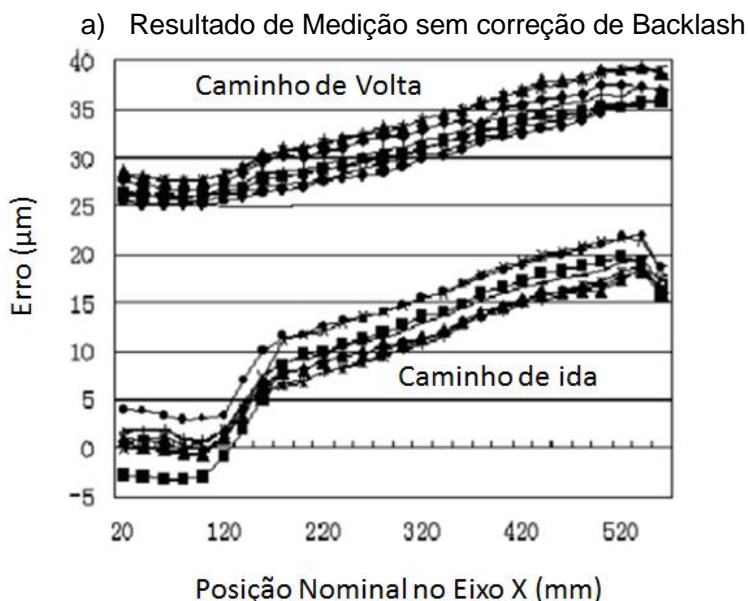
Fonte: Renishaw (2013)

Bagad (2009) define backlash como folga ou movimento perdido em um mecanismo devido a brechas entre as partes que compõem um equipamento. O autor define como "a máxima distância ou o ângulo através do qual qualquer parte de um sistema mecânico pode ser movido em uma direção, sem

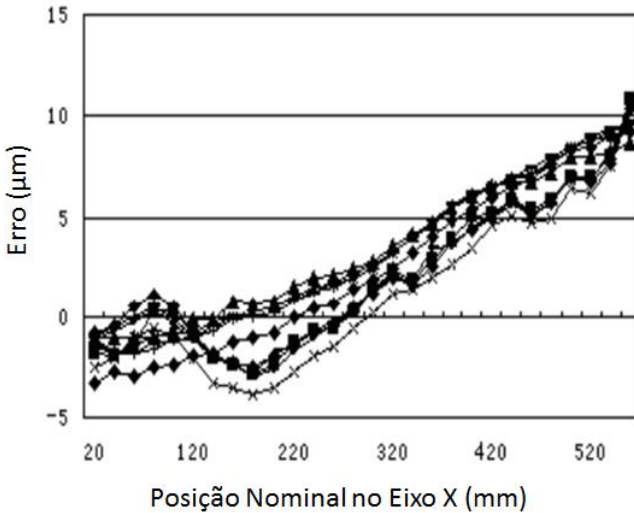
aplicação de força ou de movimento para a próxima parte em sequência mecânica".

Em seu estudo, Liu, Xue e Tan (2010) avaliam o efeito do erro de backlash ao longo dos eixos de um Centro de Usinagem Vertical. Ao analisar o eixo X, por exemplo, os autores verificam que os erros de posição aumentam linearmente em relação à posição nominal do eixo e são mais altos próximo ao fim de curso, mesmo quando o backlash é compensado. A figura 9.a) mostra os resultados para os eixos sem correção do parâmetro. Nela, é possível notar que a diferença entre o percurso de ida e o de volta pode chegar a 30 μm . Com a correção do backlash, os erros são reduzidos significativamente (figura 9.b) onde a histerese não está mais evidente.

Figura 9: Resultado de Medição



b) Resultado de Medição com correção de Backlash



Fonte: Liu, Xue e Tan (2010)

Com seu experimento, Liu, Xue e Tan (2010) observam que a precisão da máquina aumenta após a compensação do backlash. Portanto, deve-se atentar para a correção deste parâmetro para se obter mais precisão durante a utilização da máquina-ferramenta.

2.2.2 A Peça Padrão

As peças padrão podem ser aplicadas a diferentes finalidades, seja na produção ou nos laboratórios de medição. Hamburg-Piekar (2006) define quatro principais formas de se usar este recurso, que são: verificação e zeragem de dispositivos, monitoramento contínuo e avaliação de incertezas em MMC.

Atualmente, as indústrias utilizam uma grande quantidade de dispositivos de medição para controlar características geométricas e dimensionais no chão de fábrica. Seu objetivo fundamental é controlar o processo de produção, fornecendo

informação quantitativa sobre características pré-estabelecidas das peças fabricadas.

Neste cenário, Hamburg-Piekar (2006) descreve dois diferentes tipos de artefatos de referência: padrões corporificados e peças de produção. Padrões corporificados referem-se aqueles dispositivos especialmente fabricados para servirem como objetos de referência, apresentando boas características de dureza, baixo erro de forma e geometria simples (geralmente elementos planos e cilindros). Em razão das características de rigidez e estabilidade térmica, seus preços são geralmente elevados.

Entre os padrões corporificados, ainda segundo Hamburg-Piekar (2006), encontram-se blocos padrão, padrões escalonados, placas de furos ou esferas, tetraedros de esferas padrão e cubos padrão, dentre outros. Em algumas situações, é conveniente criar um padrão corporificado similar à peça de produção, mas com um acabamento superficial melhorado, estável térmica e mecanicamente, e construído a partir de elementos geométricos simples, como cilindros, planos e esferas.

Segundo Sousa (2000), a peça padrão, por sua vez, é capaz de avaliar máquinas-ferramenta em sua função e, por este motivo, é considerada a condição mais objetiva para realizar ensaios nos equipamentos. Para tal, o autor recomenda a utilização de peças padrão ou a própria peça fabricada em série, que são usinadas em condição de acabamento e medidas normalmente em Máquinas de Medição por Coordenadas. A partir dos desvios observados na peça em relação às dimensões programadas, pode-se também avaliar a exatidão do trabalho da máquina-ferramenta.

2.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO

De acordo com a definição do manual de Análise dos Sistemas de Medição (MSA) 4^a edição editado pelo AIAG (2010), um sistema de medição é o conjunto de instrumentos ou dispositivos de obtenção de medidas, padrões, operações, métodos, dispositivos de produção, software, pessoal, ambiente e premissas usadas para quantificar uma unidade de medição ou corrigir avaliação da característica sendo apurada. Em suma, corresponde ao processo completo utilizado para obtenção de medidas.

Conforme o referido MSA, este sistema de medição pode ser considerado como ideal quando produzir somente medidas exatas. Sendo assim, cada uma destas medições sempre estará de acordo com um padrão. Um sistema de medição que produz resultados como este, tem as seguintes propriedades estatísticas: variância zero, tendência zero, e probabilidade nula de classificar erroneamente qualquer produto medido. Infelizmente, sistemas de medição com tais propriedades estatísticas tão desejáveis raramente existem, e, portanto, os gerentes do processo são forçados a usar outros com propriedades estatísticas menos desejáveis.

Dessa forma, ainda conforme o Manual, existem certas propriedades fundamentais que definem um "bom" sistema de medição, que incluem:

- a) Discriminação adequada e sensibilidade. Os incrementos da medição devem ser pequenos em relação à variação do processo ou os limites de especificação para o respectivo propósito. A tradicionalmente conhecida Regra dos Dez, ou Regra 10 para 1, estabelece que a discriminação do instrumento deva ser a divisão da tolerância (ou variação do processo) em dez partes ou mais;
- b) O sistema de medição deve estar sob controle estatístico. Isto significa que, sob condições reproduzíveis, a variação no sistema deve somente a causas comuns e não a circunstâncias especiais. Isso pode ser descrito como estabilidade estatística e é melhor avaliada por métodos gráficos;
- c) Para o controle do produto, a variabilidade do sistema de medição deve ser pequena quando comparada com os limites de especificação.

2.3.1 Métodos Estatísticos para Análise de Sistemas de Medição

Segundo Silva (2002), a análise dos resultados das medições é importante para acompanhar os indicadores de localização das medidas ao longo do tempo e as implicações de suas variações.

Para realizar o acompanhamento, as propriedades estatísticas podem ser avaliadas com base no descrito pela metodologia do MSA 4ª Edição (AIAG, 2010).

- a) Estabilidade: Quantidade de variação total na tendência do sistema ao longo do tempo em uma peça determinada ou no padrão. Para isto, avalia-se a capacidade do sistema de manter suas propriedades ao longo do tempo.
- b) Tendência: Diferença entre a média das medidas de uma grandeza e o valor de referência (VR) para a grandeza medida. Segundo o MSA 4ª Edição, a tendência pode ser avaliada pelos métodos da amostra independente ou da carta de controle.
- c) Linearidade: Mede a variação da tendência para diferentes valores de referência na faixa de interesse. A linearidade deve ser avaliada por meio da inclinação da reta formada pelos diferentes valores de referência em relação às respectivas tendências;
- d) Repetibilidade: Variação das medidas obtidas por um único operador, utilizando o mesmo equipamento e método, ao medir repetidas vezes uma mesma grandeza de uma única peça;
- e) Reprodutibilidade: Apura a variação das médias obtidas por diferentes operadores utilizando o mesmo equipamento de medição para medir repetidamente uma mesma grandeza de uma única peça.

Para a variação de um sistema de medição, o Manual (AIAG-2010) estabelece um critério de aceitação de 10% da tolerância ou variação do processo de produção. Dependendo da aplicação ou dos custos envolvidos, valores de até 30% para %R&R podem ser aceitáveis dependendo da aplicação.

A gestão dessas aprovações é complexa, por diferentes razões: número de clientes envolvidos para o mesmo tipo de produto, número de sistemas de medição controlados pela organização e necessidade de maior conhecimento técnico sobre métodos de análise de sistemas de medição pelo cliente. A falta de conhecimento pode gerar demandas desnecessárias sobre as propriedades estatísticas dos sistemas.

2.3.2 Centro de Usinagem como Sistema de Medição

De acordo com Jankowski, Wozniak, Byszewski (2014), é crescente a popularidade da utilização de apalpadores em máquinas-ferramenta CNC. Estes equipamentos são montados diretamente no eixo árvore do Centro de Usinagem da mesma forma como uma ferramenta de corte. A utilização deste tipo de apalpador permite a realização da medição de forma similar a uma MMC.

A proposta deste trabalho envolve justamente a similaridade entre as medidas realizadas por uma MMC com as realizadas na máquina-ferramenta. Desta forma, o Centro de Usinagem será avaliado similarmente como um sistema de medição. Para tal, é necessário que a metodologia do MSA seja aplicada à máquina-ferramenta.

Para realizar a utilização do Centro de Usinagem como sistema de medição as propriedades estatísticas são avaliadas com base no descrito pela metodologia do MSA 4ª Edição, Manual de Controle Estatístico de Processo (CEP) 2ª Edição e na norma alemã Capacidade de Processos de Medição (Verband der Automobilindustrie 5 ou VDA 5). Os itens 2.3.2.1 a 2.3.1.5 são resultado das normas citadas.

2.3.2.1 Análise de Estabilidade

Para se conduzir o estudo conforme a recomendação do MSA deve-se:

- a) Obter uma amostra e estabelecer seu valor de referência em relação a um padrão rastreável;
- b) Em uma base periódica, medir a amostra padrão de três a cinco vezes.
- c) Plotar os dados em uma carta de controle de desvio padrão ou amplitude em uma ordem cronológica.

Às vezes, pela dificuldade em realizar uma série de medições, a variação dentro da amostra será desprezível quando comparada com a variação entre as amostras. Uma das cartas de controle que podem ser utilizadas para a análise é a carta de valores individuais (\bar{x}) e amplitudes móveis (carta I-MR). Esta carta considera valores individuais sem repetição para a

construção do gráfico da posição. As amplitudes representam a diferença de valores entre duas amostras consecutivas.

Os parâmetros de cálculo para este método são: média das indicações, X_{barra} , amplitude móvel MR, amplitude móvel média MR_{barra} , estimativa do desvio padrão σ .

$$X_{barra} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}|, i = 2 \dots n \quad (2)$$

$$MR_{barra} = \frac{MR_1 + MR_2 + \dots + MR_n}{n-1} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{MR_{barra}}{d_2} \quad (4)$$

Para elaborar a carta de controle, é necessário que se tenha os valores das linhas de centro (LC) e dos limites superior e inferior de controle, UCL e LCL respectivamente.

$$LC_X = X_{barra} \quad (5)$$

$$UCL_X = X_{barra} + E_2 \cdot MR_{barra} \quad (6)$$

$$LCL_X = X_{barra} - E_2 \cdot MR_{barra} \quad (7)$$

$$LC_{MR} = MR_{barra} \quad (8)$$

$$UCL_X = D_4 X_{barra} \quad (9)$$

$$LCL_X = D_3 X_{barra} \quad (10)$$

Valores tabelados de E_2 , D_3 e D_4 podem ser encontrados no Anexo A.

O gráfico elaborado monitora a variabilidade entre os valores individuais ao longo do tempo e o gráfico de amplitude móvel monitora a variabilidade dentro da amostra.

O monitoramento das cartas de controle representa um teste de hipótese a cada nova amostra coletada. A hipótese que

está sendo testada a cada amostra coletada é de que a variabilidade do processo continua as mesmas (processo estável), tendo como hipótese alternativa de que elas mudaram devido à presença de uma causa especial (processo instável).

2.3.2.2 Análise de Tendência pelo Método da Amostra Independente

O método de amostra independente para determinar se a tendência é aceitável utiliza o Teste de Hipóteses:

$$H_0: \text{Tendência} = 0$$

$$H_1: \text{Tendência} \neq 0$$

A tendência calculada é utilizada para avaliar se é significativamente igual a zero. A análise segue os seguintes passos:

- a) Obter uma amostra e estabelecer seu valor de referência em relação a um padrão rastreável;
- b) Ter um único avaliador medindo a amostra $n \geq 10$ vezes de maneira convencional;
- c) Determinar o erro de medição para cada leitura;
- d) Plotar os erros de medição em gráfico apropriado;
- e) Calcular a média sobre as medidas obtidas (X_{barra});
- f) Calcular a tendência;

$$\text{tendência} = X_{barra} - VR \quad (11)$$

- g) Calcular o desvio padrão da repetibilidade;

$$\sigma_{repetibilidade} = \sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{barra})^2}{n-1}} \quad (12)$$

- h) Determinar o valor da estatística t para tendência;

$$\sigma_b = \sigma_r / \sqrt{n} \quad (13)$$

$$t = \text{tendência} / \sigma_b \quad (14)$$

- i) Tendência é aceitável no nível α se zero cair dentro do intervalo de confiança conforme a equação 16) onde α representa o nível de significância do método. Considerando $\alpha = 0,05$, os graus de liberdade podem ser calculados pela equação 15 e o valor da estatística t de Student deve ser obtido por meio da tabela apresentada no Anexo B.

$$v = n - 1 \quad (15)$$

$$Tend\hat{e}ncia - [\sigma_b(t_{v,1-\alpha/2})] \leq erro \leq Tend\hat{e}ncia + [\sigma_b(t_{v,1-\alpha/2})] \quad (16)$$

2.3.2.3 Análise de Tendência por Meio do Método da Carta de Controle

Se uma carta de controle for usada para medir estabilidade, os dados também podem ser usados para avaliar a tendência. A análise do gráfico de controle deve indicar que o sistema de medição é estável antes da avaliação por meio da carta de controle. Para aplicação do método, devem-se seguir os seguintes passos:

- Obter uma amostra e estabelecer seu valor de referência em relação a um padrão rastreável;
- Conduza o estudo de estabilidade com g (número de medidas) ≥ 20 subgrupos de tamanho m (número de repetições);
- Considerando que $m \geq 2$, plotar os dados como um histograma em relação ao valor de referência. Analisar o gráfico e determinar a existência ou não de causas especiais.
- Obter X_{barra} do gráfico de controle;
- Calcular a tendência (Td), subtraindo o valor de referência (VR) de X_{barra} :

$$Td = X_{barra} - VR \quad (17)$$

- f) Calcular o desvio padrão de repetibilidade por meio dos valores de amplitude média ou desvio padrão, dependendo do gráfico utilizado. Valores de d_2 e c podem ser encontrados no Anexo A conforme indica o manual do CEP 2ª Edição.

$$\sigma_{\text{repetibilidade}} = \sigma_r = \frac{S_{\text{medio}}}{c_4} \quad (18)$$

$$\sigma_{\text{repetibilidade}} = \sigma_r = \frac{R_{\text{medio}}}{d_2} \quad (19)$$

- g) Determine a estatística t para a tendência;

$$\sigma_b = \sigma_r / \sqrt{gm} \quad (20)$$

$$t_{\text{tendência}} = \text{tendência} / \sigma_b \quad (21)$$

- h) A tendência é aceitável o valor zero estiver dentro dos limites de confiança.

$$\text{Tendência} - [\sigma_b(t_{v,1-\alpha/2})] \leq \text{erro} \leq \text{Tendência} + [\sigma_b(t_{v,1-\alpha/2})] \quad (16)$$

2.3.2.4 Análise de Tendência e Capacidade do Sistema de Medição por Meio da Avaliação do Estudo Tipo 1

A norma alemã Capacidade dos Processos de Medição (2011), 2ª Edição, o VDA5, descreve que alguns erros sistemáticos residuais ou pequenos vão permanecer. Este erro pode ser estimado por uma investigação em um padrão de medição.

Para determinar o desvio padrão da repetibilidade recomenda-se a aplicação do “estudo Tipo 1” para a determinação da capacidade do sistema de medição. A determinação de sg é feita por meio das medidas obtidas na peça padrão. Deve ser baseado na dispersão de no mínimo 25 medições repetidas para estimar o efeito combinado da tendência e da repetibilidade.

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_i - X_{\text{barra}})^2} \quad (22)$$

Onde k é o número de medições repetidas, y_i é o valor único da i -ésima medição e X_{barra} é a média aritmética de todos os valores da amostra.

Para avaliar a capacidade do processo, utilizam-se os índices C_g e C_{gk} . O primeiro, índice de dispersão C_g , representa o quanto os valores medidos estão dispersos em relação à média das medições. O segundo, C_{gk} , corresponde ao quanto esta dispersão se afasta do valor de referência, chamado de índice de centralização.

Para encontrar os índices de capacidade do processo C_g e C_{gk} , ainda segundo o VDA5, deve-se fazer uso das seguintes expressões:

$$Td = |x_{\text{barra}} - x_m| \quad (23)$$

$$C_g = \frac{0,2.Tol}{4.s_g} \quad (24)$$

$$C_{gk} = \frac{0,1.Tol - Td}{2.s_g} \quad (25)$$

Onde x_m é o valor da grandeza de referência do padrão de medição dentro da tolerância da característica do deste e tendência Td .

2.3.2.5 Repetibilidade por Meio da Análise de Variância (Anova)

Para a variação de um sistema de medição, o MSA estabelece um critério de aceitação de 10% da tolerância ou variação do processo de produção. Dependendo da aplicação ou dos custos envolvidos, valores de até 30% para %R&R podem ser aceitáveis dependendo da aplicação.

Para casos onde o efeito do operador não é considerado, a reprodutibilidade é nula. Dessa forma a variação do sistema de medição é impactada pela repetibilidade (VE). Por meio da

análise de variância (Anova), o desvio padrão da repetibilidade é expresso com a equação 26.

$$VE = \sqrt{\frac{1}{n(k-1)} [\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k (y_i - X_{\text{barra}})^2]} \quad (26)$$

onde k é o número de medições repetidas, n o número de medições realizadas, y_i é o valor único da i-ésima medição e X_{barra} é a média aritmética de todos os valores da amostra.

O percentual consumido da tolerância (T) pela repetibilidade é obtido por meio da equação 27, considerando um nível de confiança de 99,7%.

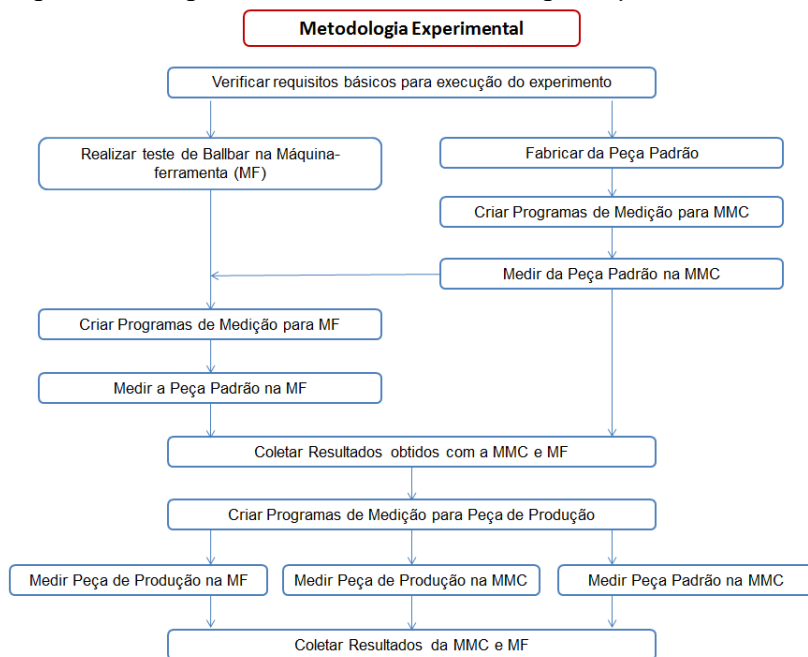
$$\%VE = \frac{6VE}{T} \cdot 100\% \quad (27)$$

Assim, com os valores de VE e %VE, é possível determinar a variação das medidas obtidas por um único operador ao utilizar o mesmo equipamento de medição e método, ao medir repetidas vezes uma mesma grandeza de uma peça.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia empregada no presente trabalho a fim de avaliar o desempenho de centros de usinagem ao serem usados como sistemas de medição. A metodologia será apresentada conforme descrito na figura 10.

Figura 10: Diagrama de Blocos – Metodologia Experimental



Fonte: A Autora (2017)

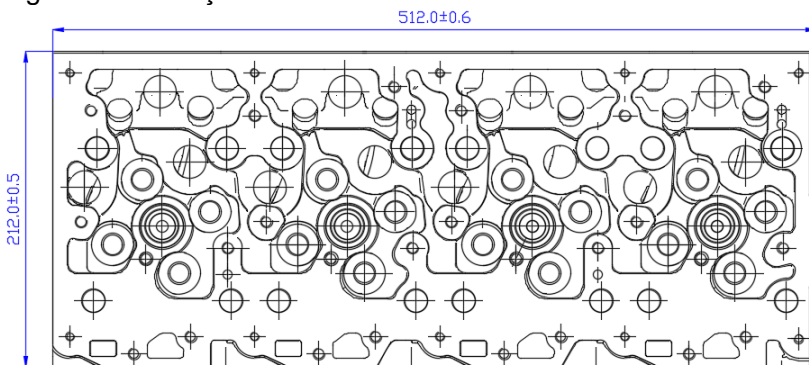
Após a verificação dos requisitos para a execução do experimento utiliza-se de algumas premissas para a escolha do Centro de Usinagem. Dentre elas a primeira levada em conta foi o tipo de peça que seria medido. Considerando as peças da família automotiva, os itens que mais chamaram atenção foram os cabeçotes de motor, devido à sua distribuição de massa relativamente homogênea se comparado com um bloco de motor por exemplo.

Em seguida, dentre os cabeçotes de motor disponíveis, seleciona-se aquele que apresentar maior tempo de linha parada, devido às medições remotas.

Após a seleção da peça de produção a ser medida, ainda é necessário considerar a disponibilidade dos recursos como apalpadores e o tempo para medição nos centros de usinagem. Por fim, leva-se em conta o tipo de processo para o qual a máquina foi utilizada ao longo da sua vida útil e o espaço interno disponível para inserção de uma peça padrão.

Para a realização do teste, utiliza-se um cabeçote de motor, quatro cilindros, com 45 kg, produzido em ferro fundido cinzento, nos termos da norma DIN 1691 GG15, e com limite de resistência de 250MPa (figura 11).

Figura 11: Cabeçote de Motor



Fonte: A Autora (2017)

De acordo com a disponibilidade da empresa detentora dos recursos, utiliza-se o Centro de Usinagem Mazak Vertical Nexus 510C-II com comando numérico Mazatrol Matrix Nexus. A máquina foi equipada com um apalpador Renishaw OMP60 de transmissão óptica e range de operação 6 metros. Ambos podem ser observados na figura 12 e 13.

Figura 12: Centro de Usinagem Mazak



Fonte: Mazak (2016)

Figura 13: Apalpador Renishaw OMP60



Fonte: Renishaw (2017)

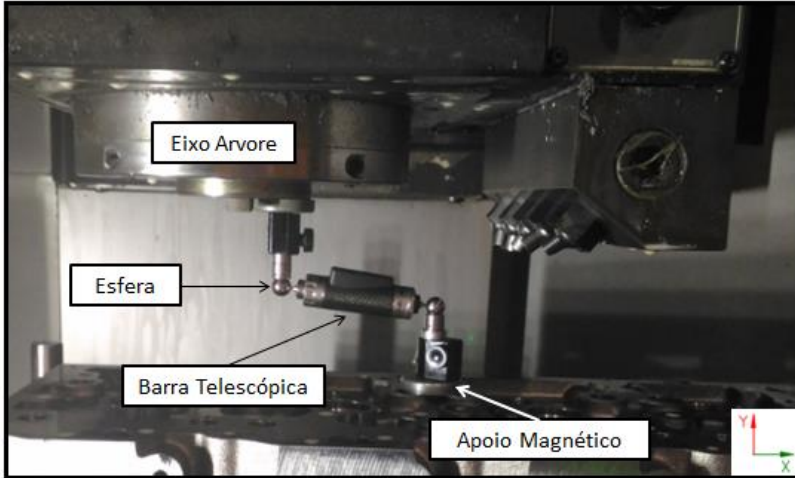
Ainda com relação ao apalpador, equipar-se o mesmo com uma haste de cerâmica de 50 mm e esfera de 5 mm. De acordo com o manual do apalpador (Renishaw, 2005), a repetibilidade unidirecional é de 1 μm (testes realizados consideraram a velocidade de 480 mm/min com uma haste de 50 mm).

3.1 TESTE DE BALLBAR

O teste de Ballbar é então realizado a fim de corrigir os erros de backlash e verificar as condições do Centro de Usinagem antes de se iniciar o experimento.

Para tanto, utiliza-se o Ballbar Renishaw, modelo QC 10, e uma haste de 100 mm conforme figura 14.

Figura 14: Teste de Ballbar



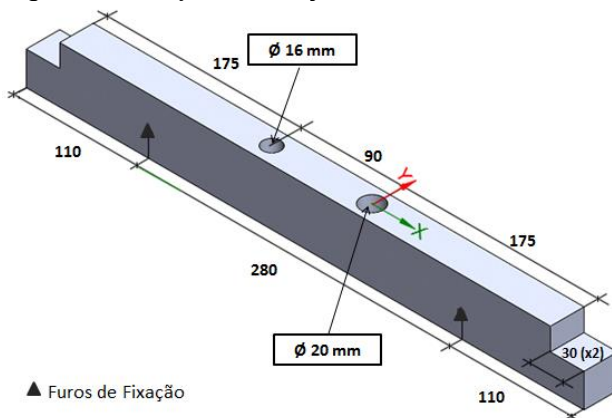
Fonte: A Autora (2017)

Apesar da recomendação do fabricante, devido à falta de disponibilidade para retirar o dispositivo de fixação do Centro de Usinagem, foi necessário executar o teste apoiando a base do Ballbar sobre o cabeçote.

3.2 A PEÇA PADRÃO

Para o desenvolvimento do projeto da peça padrão, toma-se como referência inicial as características da peça escolhida já usinada, como, por exemplo, o comprimento do cabeçote apresentado na figura 11. Com isso, fabrica-se um padrão com o comprimento semelhante ao do cabeçote. O material escolhido para o padrão foi o aço 1020 e o comprimento foi de 500 mm. Os diâmetros foram posicionados ao longo do comprimento, especificando-se suas dimensões de forma que ficassem próximas aos valores apresentados no desenho técnico do cabeçote. O resultado do projeto pode ser visto na figura 15.

Figura 15: Projeto da Peça Padrão



Fonte: A Autora (2017)

Além dessas características, a peça padrão é fixada o mais próximo possível de seus pontos nodais aproximados, para reduzir os possíveis efeitos de deformação devido ao seu peso.

A medição do padrão e do cabeçote é realizada em uma região comum do eixo X, a fim de reduzir a possibilidade de que o desgaste das guias pudesse ter influência desigual no resultado da medição de ambos. Assim, a posição da peça no dispositivo é definida de modo que fique paralela ao cabeçote, com base no eixo X. A posição final, com a peça padrão já fixada no dispositivo, pode ser visualizada na figura 16.

Para reduzir o desgaste no uso da peça padrão, opta-se pela realização de tratamento térmico do material utilizado. Após a usinagem, houve redução do seu comprimento, de 500 mm para em torno de 498 mm. O diâmetro de 16 mm ficou com um diâmetro maior, sendo impactado em torno de 0,2 mm. Registra-se que o diâmetro de 20 mm não sofreu alteração.

A peça padrão é submetida à medição em duas MMC's – ambas do fabricante Zeiss – sendo uma delas do modelo Prismo Navigator, operando com o cabeçote Zeiss Vast Gold, enquanto a outra era do modelo Accura, equipada com o cabeçote Zeiss Vast XT Gold.

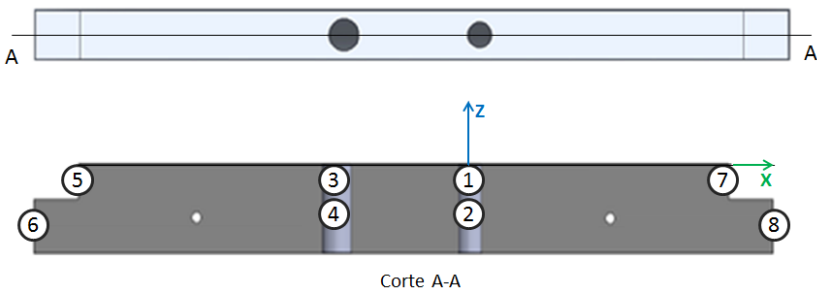
Figura 16: Dispositivo de Fixação



Fonte: A Autora (2017)

A primeira máquina utilizada, a de modelo Prismo, serve de referência na medição de todas as características especificadas no projeto. Além dos relatórios de medição para os diâmetros e distâncias, obtém-se resultados de planeza, paralelismo, gráficos de circularidade e cilindricidade. Os pontos escolhidos para a medição estão apresentados na figura 17.

Figura 17: Características de Medição



Fonte: A Autora (2017)

Em seguida, realiza-se o estudo de estabilidade na peça padrão. A coleta de resultados é feita antes do início do experimento e também 6 meses depois para comparação de resultados.

3.3 A PEÇA PADRÃO NO CENTRO DE USINAGEM

Para possibilitar a fixação da peça padrão na máquina, é necessária a alteração do dispositivo de usinagem.

Esta melhoria deve ser executada no próprio Centro de Usinagem, com a utilização de uma fresa de topo. Com isso, cria-se uma superfície plana, furada e roscada para possibilitar a fixação da peça padrão. A inclinação da peça em relação ao eixo Z é controlada por intermédio de um nível de bolha. A figura 18 mostra a peça devidamente fixada.

Na sequência do processo, realiza-se a medição de um furo usinado para determinação do diâmetro efetivo do mesmo. O procedimento é executado por meio da utilização da peça padrão fixada ao dispositivo.

Assim, programa-se manualmente o apalpador para que se deslocasse até o centro do furo de 20 mm da peça padrão, na altura de -40 mm. Nesta posição, o apalpador realiza a medição do diâmetro. Comparando o resultado obtido com aquele previamente medido pela Zeiss, modelo Prismo, apura-se a diferença de valores, obtendo-se o resultado de 0,075 mm, que foi adotado como base para correção de todos os diâmetros analisados ao longo do experimento.

Figura 18: Fixação da Peça Padrão – Vista Superior



Fonte: A Autora (2017)

Para conferência desse resultado de 0,075 mm, realiza-se a medição com um anel padrão, garantindo, assim, que a peça padrão apresentasse valores confiáveis.

Após a fixação da peça deve-se ainda considerar a possibilidade de a mesma estar desalinhada em relação aos eixos do centro de usinagem, o que poderia gerar erros no resultado de medição devido ao toque do apalpador não ser ideal.

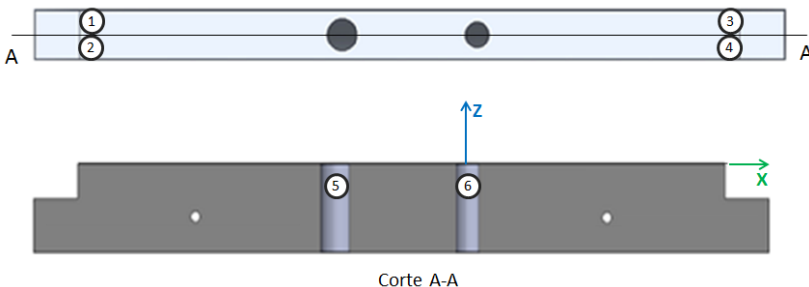
Para que se tenha um resultado correto, é necessário que o apalpador toque a peça, fazendo um ângulo de 90° com a superfície. Caso isso não ocorra, o erro encontrado deve ser compensado.

3.3.1 Definição do Ponto Zero

Realizada a verificação da inclinação, torna-se necessária a criação do ponto zero do programa. Para possibilitar as comparações dos resultados entre o Centro de Usinagem e a MMC, mantém-se a mesma referência entre os dois programas. No entanto, uma vez que o Centro de Usinagem não rotaciona seus eixos de coordenadas, este ponto não é definido da mesma forma nos dois equipamentos.

No programa da MMC, a criação da referência adota um plano, uma reta e um ponto. O plano é formado a partir dos pontos 1, 2, 3 e 4, ilustrados na figura 19. A distância é definida na altura de -10 mm, com os pontos 5 e 6. Por fim, o ponto escolhido é o centro do diâmetro de 16 mm, representado pelo número 6 da mesma figura.

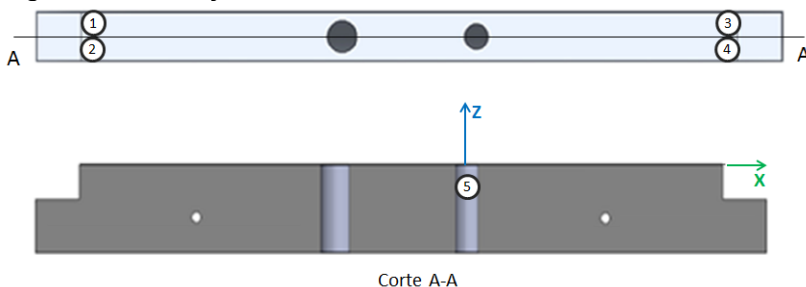
Figura 19: Definição dos Planos de Referência



Fonte: A Autora (2017)

Para o Centro de Usinagem, utiliza-se pontos muito similares na face de topo para definir a altura do ponto zero. As coordenadas X e Y são estabelecidas com a medição do diâmetro de 16 mm, na altura de -10 mm. A figura 20 ilustra os pontos deste procedimento.

Figura 20: Definição da Referência



Fonte: A Autora (2017)

Com o ponto zero criado, é possível dar seguimento com a elaboração do programa, tendo como referência aquele previamente desenvolvido para a MMC, de modo que fosse alcançada a maior similaridade possível.

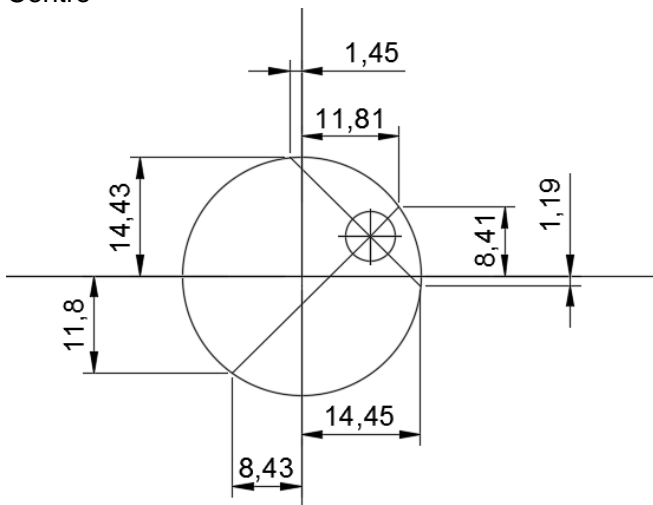
No entanto, ainda que os comandos do programa tenham seguido as mesmas coordenadas, o Centro de Usinagem utiliza uma lógica diferente daquela adotada pela MMC para o cálculo de diâmetros. O método da MMC segue os princípios do máximo inscrito.

A sub-rotina que executa o cálculo de diâmetros no Centro de Usinagem faz parte dos programas standard disponibilizados pela Mazak. Esta rotina tem como input o ângulo de apalpação do primeiro ponto, a velocidade de medição e o diâmetro aproximado. Mais detalhes sobre o programa podem ser verificados no Anexo C.

Ao utilizar o cálculo descrito no Anexo C, há de se considerar um impacto no resultado caso o apalpador esteja deslocado do centro ao capturar dados. Para a verificação, opta-se por realizar o teste no maior diâmetro medido ao longo do experimento. Como parâmetros, são definidos o ângulo inicial de

45° e o diâmetro aproximado 29 mm. A figura 21 ilustra o descrito.

Figura 21: Simulação de Medição com Apalpador Deslocado do Centro



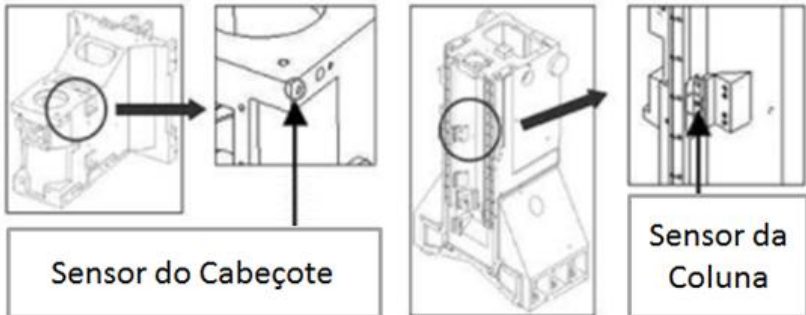
Fonte: A Autora (2017)

Seguindo os passos de cálculo da sub-rotina em questão, observa-se uma diferença de 3 μm no resultado de medição.

As primeiras medições executadas na peça padrão são repetidas três vezes a cada meia hora. O programa inicia sua rotina às sextas-feiras e roda em modo automático até segunda-feira, às 5 horas da manhã.

Para acompanhar a temperatura ao longo da medição da peça padrão, utiliza-se um recurso disponível o centro de usinagem para registrar a temperatura. Em contato com a assistência técnica da Mazak, obteve-se a instrução para usar duas variáveis da máquina, que imprimem resultados de temperatura de dois dos quatro sensores posicionados no seu interior. A figura 22 mostra os sensores que possibilitam a impressão das temperaturas pelo programa.

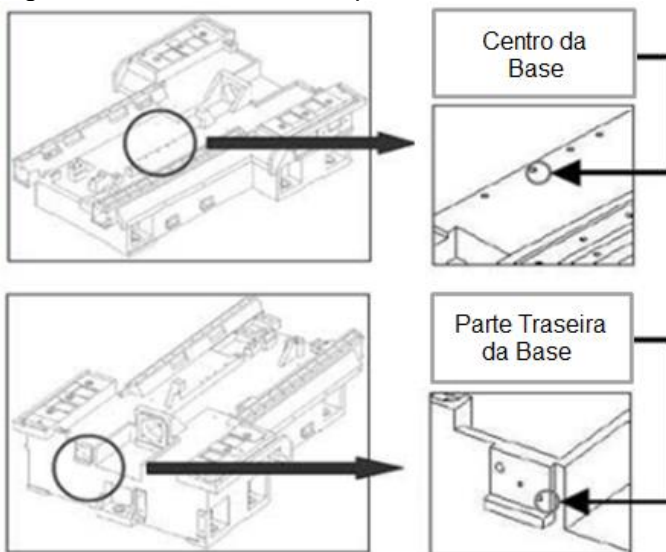
Figura 22: Sensores de Temperatura do Cabeçote e Coluna



Fonte: Adaptado de e-mail do representante da Mazak, Ronaldo Barbosa (2017)

Embora não possam ser impressos, os outros dois sensores restantes também permitem os registros de suas temperaturas. Estes são os sensores do centro e da parte traseira da base, conforme mostra a figura 23.

Figura 23: Sensores de Temperatura da Base



Fonte: Adaptado de e-mail do representante da Mazak, Ronaldo Barbosa (2017)

No entanto, mesmo que a temperatura não possa ser impressa, é possível visualizá-la por meio do programa “Mazak Thermal Deformation Compensation” (figura 24). As colunas do programa mostram, da esquerda para a direita, as seguintes informações: data, horário, canal A, canal B, canal C e canal D.

Figura 24: Tela do Programa Mazak Thermal Deformation Compensation

Data	Hora	Canal A	Canal B	Canal C	Canal D		
17/06/13	07:57:04;	19.24	19.83	20.05	18.42	0	0
17/06/13	07:57:14;	19.24	19.83	20.05	18.42	0	0
17/06/13	07:57:24;	19.24	19.83	20.05	18.42	0	0
17/06/13	07:57:34;	19.24	19.83	20.05	18.42	0	0
17/06/13	07:57:44;	19.24	19.83	20.05	18.42	0	0
17/06/13	07:57:54;	19.24	19.83	20.05	18.42	0	0
17/06/13	07:58:04;	19.24	19.78	20.05	18.42	0	0
17/06/13	07:58:14;	19.30	19.78	20.00	18.42	0	0

Fonte: A Autora (2017)

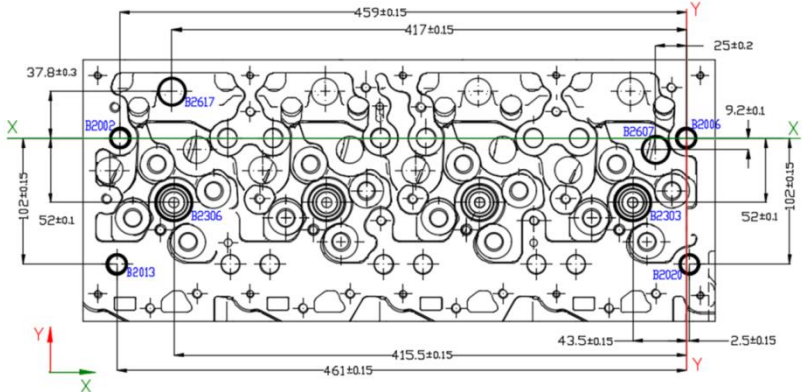
As colunas compostas pelas informações “0” gravam valores quando o Centro de Usinagem possui cinco sensores, ao invés de quatro, como é o caso da máquina utilizada.

3.4 MEDIÇÃO DA PEÇA DE PRODUÇÃO

O programa de medição do cabeçote de produção leva em conta diferentes diâmetros usinados na máquina utilizada. Esta operação finaliza todas as furações da face da tampa do cabeçote e, dessa forma, possui vários furos controlados com diferentes classes e tipos de tolerância. A figura 25 ilustra as

distâncias de cada diâmetro até a origem que, na imagem, é identificada como “B2006”.

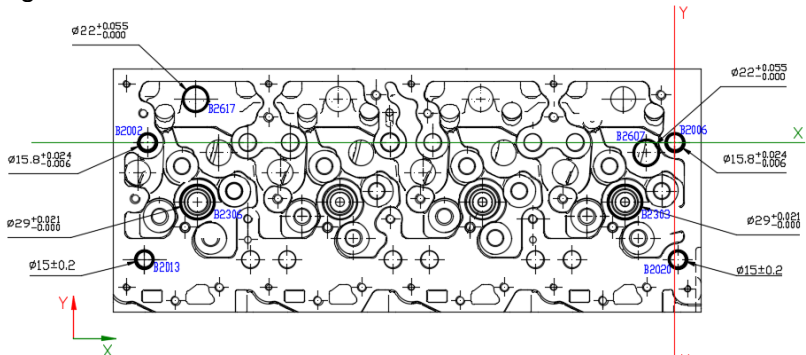
Figura 25: Distâncias dos Diâmetros à Origem



Fonte: A Autora (2017)

Na figura 26, é possível visualizar a dimensão dos diâmetros e suas respectivas tolerâncias. Tanto as distâncias quanto os valores dos diâmetros são idênticos aos do desenho 2D do produto.

Figura 26: Diâmetros Medidos



Fonte: A Autora (2017)

Os furos escolhidos para serem medidos pelo programa estão próximos das extremidades da peça para que seja possível cobrir o maior campo no eixo X da máquina.

Embora não tenha sido definido da mesma forma, o ponto zero do programa é o mesmo para o Centro de Usinagem e para a MMC. No Centro de Usinagem, utiliza-se três pontos na face da tampa para definir a altura do ponto zero. Outra característica utilizada foi o diâmetro B2006 onde os eixos x e y se cruzam. Assim, com o ponto zero definido, as características medidas no cabeçote foram estabelecidas, conforme se pode observar na tabela 3.

Tabela 3: Dimensões e Características a Serem Medidas do Cabeçote

Valores Conforme Desenho 2D				
Identificação	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	D(mm)
B2020	2,5	-102,2	-10	15,0
B2006	0,0	0,0	-5	15,8
B2607	-25,0	-9,2	-17	22,0
B2303	-43,5	-52,2	-22	29,0
B2306	-415,5	-52,2	-22	29,0
B2617	-417,0	37,8	-17	22,0
B2002	-459,0	0,0	-5	15,8
B2013	-461,5	-102,2	-10	15,0

Fonte: A Autora (2017)

Com os programas de medição prontos, inicia-se a fase de testes para verificar se a coleta de dados estava ocorrendo de acordo com o esperado. Algumas alturas definidas inicialmente foram alteradas para garantir que as medições fossem feitas afastadas dos chanfros da peça.

Logo que finalizados os testes, inicia-se a coleta de dados a partir da execução da medição no Centro de Usinagem. Os programas são executados uma vez ao dia, ao longo um mês. Em cada ciclo de medição, todos os resultados foram exportados para um arquivo no formato “.txt”, que grava, além dos resultados, a data, hora e temperatura dos sensores da máquina.

Uma vez concluído o ciclo de medição no centro, faz-se necessária a retirada da peça da linha de usinagem, que segue para a limpeza e, em seguida, levada ao setor de metrologia para que seja medida. Seguindo esses passos, lá o cabeçote fica

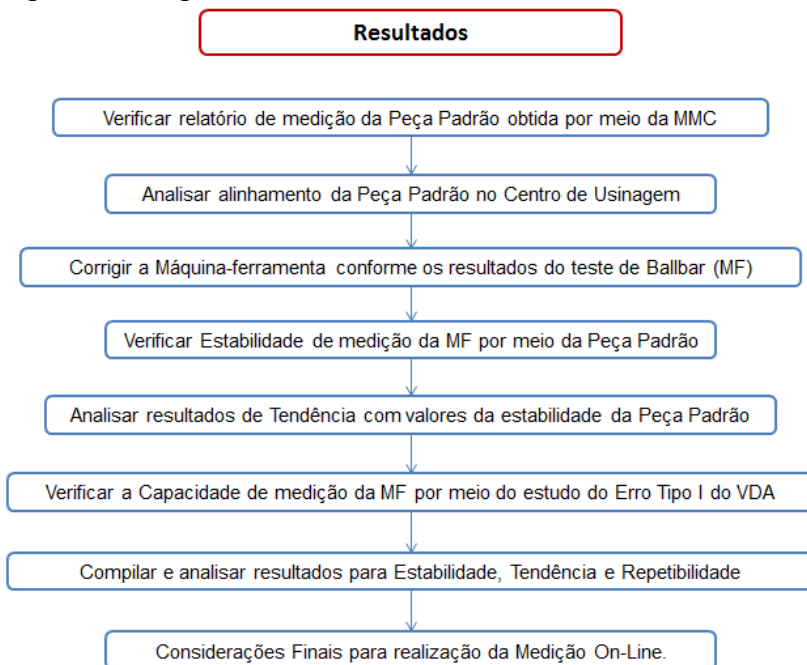
entre duas e três horas, até que a medição na MMC seja iniciada.

Com o cabeçote medido em ambos os equipamentos, a peça retorna para a linha de usinagem para seguir o processo normal de fabricação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados e análises de cada etapa das medições realizadas no Centro de Usinagem. O diagrama de blocos da figura 27 ilustra a forma como fluxo de resultados foi obtido e tratado.

Figura 27: Diagrama de Blocos – Análise de Resultados



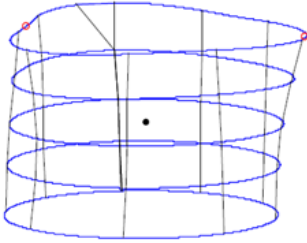
Fonte: A Autora (2017)

4.1 RESULTADOS DIMENSIONAIS DA PEÇA PADRÃO

Os relatórios de medição para análise direcionaram as características medidas como sendo as utilizadas no experimento. Os resultados de paralelismo entre os planos da distância de 498 foram de 0,01mm. A planeza foi de 0,002 mm para uma face e 0,005 mm para a outra. Os gráficos de cilindricidade e circularidade que mostram o resultado do

diâmetro de 20 mm podem ser vistos na figura 28 e 29 respectivamente. Estas informações foram essenciais para definir as regiões escolhidas para controle.

Figura 28: Gráfico de Cilindricidade do Diâmetro de Referência

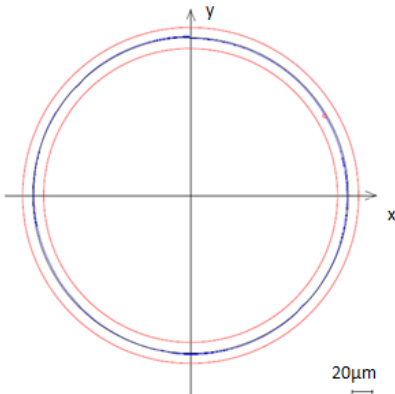


Diametro	20,0078	mm
Rotação:	0,0000	Grad
Inclinação:	-10,0000	Grad
Grade:	30,0000	Grad

Cilindricidade = 0,0297 μm

Fonte: A Autora (2017)

Figura 29: Gráfico de Circularidade do Diâmetro de Referência



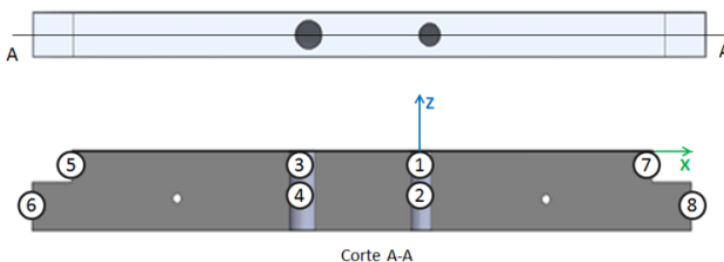
Circularidade altura 40 mm = 0,0026 μm

Fonte: A Autora (2016)

A tabela 4 mostra os resultados das dimensões das características da peça padrão. As dimensões foram obtidas por meio da medição da peça utilizando-se da MMC Prismo. Os resultados da tabela mostram a média de 3 medições.

Tabela 4: Dimensões da Peça Padrão

Número	Caract. (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ø (mm)
1	ø16	0,000	0,000	-10	16,182
2	ø16	0,000	0,001	-30	16,191
3	ø20	-90,445	0,000	-10	20,005
4	ø20	-90,423	0,005	-30	19,999
5-7	Dist. 439	439,501	0,000	-10	-
6-8	Dist. 498	498,871	0,000	-35	-



Fonte: A Autora (2017)

O estudo da estabilidade foi executado durante o período de seis meses, realizadas três vezes por semana, cada qual com três repetições. Para a análise de estabilidade, optou-se pelos diâmetros de 20 mm na altura de -30 mm e o comprimento de 498 mm na altura de -35 mm. Os estudos apresentaram valores estáveis para a peça.

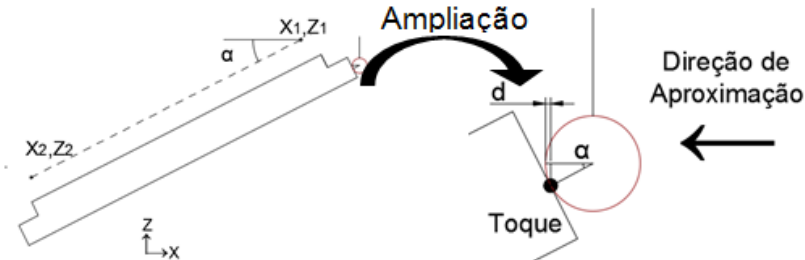
4.2 ANÁLISE DA INCLINAÇÃO DA PEÇA NO CENTRO DE USINAGEM

Após a fixação da peça na máquina-ferramenta, verificou-se a inclinação da peça padrão por meio da utilização do

apalpador na peça, que deve fazer um ângulo de 90° com a superfície. Caso isso não ocorra, a distância “d” da figura 28 deve ser compensada.

A figura 30 apresenta um esboço da peça padrão com uma inclinação teórica do problema.

Figura 30: Inclinação da Peça Padrão em Relação ao Eixo Z



Fonte: A Autora (2017)

Fazendo uso de trigonometria, é possível calcular o ângulo α e, com o raio do apalpador de 3 mm, a distância d.

A partir dos valores obtidos com o apalpador, têm-se os seguintes valores conforme tabela 5.

Tabela 5: Resultado de Medição para Pontos 1 e 2 da Figura

X1 (mm)	165	Z1 (mm)	0,111
X2 (mm)	-245	Z2 (mm)	-0,096
X1-X2 (mm)	410	Z1-Z2 (mm)	0,207

Fonte: A Autora (2017)

Com os resultados da tabela 5 calcularam-se as variáveis conforme segue:

$$tg \alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{X_1 - X_2} \quad (28)$$

$$tg \alpha = 0,000504$$

$$\alpha = arctg 0,000504$$

$$\alpha = 0,031$$

$$\cos \alpha = \frac{(3-d)}{3} \quad (29)$$

$$d = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$$

Com o valor d na magnitude encontrada observa-se que a peça padrão não está inclinada o suficiente para impactar o resultado de medição.

Da mesma forma como para o eixo Z, a peça pode ainda estar inclinada em relação ao eixo Y do centro de usinagem. Assim, a mesma análise foi realizada para este eixo chegando às mesmas conclusões. O desenvolvimento se encontra no Anexo D.

4.3 RESULTADOS DO BALLBAR

Conforme discutido na referência bibliográfica, o erro de posição é afetado pelo backlash. Dessa forma, o Ballbar foi utilizado para garantir que os erros da máquina estivessem mais próximos de zero. A tabela 6 mostra os resultados do teste com o equipamento para os eixos XY apenas.

Tabela 6: Resultados de Medição Ballbar

Backlash (μm)					
	Com Correção		Sem Correção		
x	→ 0,2	← -0,3	→ 0,1	← -0,4	
y	↑ 0,2	↓ -0,6	↑ 0,2	↓ -0,7	
→	Folga ao movimentar para a direita				
←	Folga ao movimentar para a esquerda				
↑	Folga ao movimentar para cima				
↓	Folga ao movimentar para baixo				

Fonte: A Autora (2017)

O teste mostrou que o centro de usinagem já operava com valores baixos de backlash mesmo antes do teste de Ballbar. Após a correção do teste, percebe-se que os erros ficaram mais bem distribuídos em torno do “zero” de cada eixo do teste.

4.4 ANÁLISE DA PEÇA PADRÃO NO CENTRO DE USINAGEM

O estudo da peça padrão foi realizado ao longo de oito meses. Este acompanhamento foi feito no Centro de Usinagem e na MMC para verificar seu comportamento ao longo do tempo nos dois equipamentos. Para tanto, metodologias do MSA e do VDA 5 foram aplicadas. Estas podem ser verificadas ao longo dos itens 4.3.1 à 4.3.5.

4.4.1 Análise de Estabilidade

Devido ao número de amostras coletadas, o método de análise escolhido para a estabilidade foi o da carta de controle para valores individuais e amplitudes móveis (I-MR). Inicialmente, avaliou-se a estabilidade das medidas no gráfico de controle, em um intervalo de 24h.

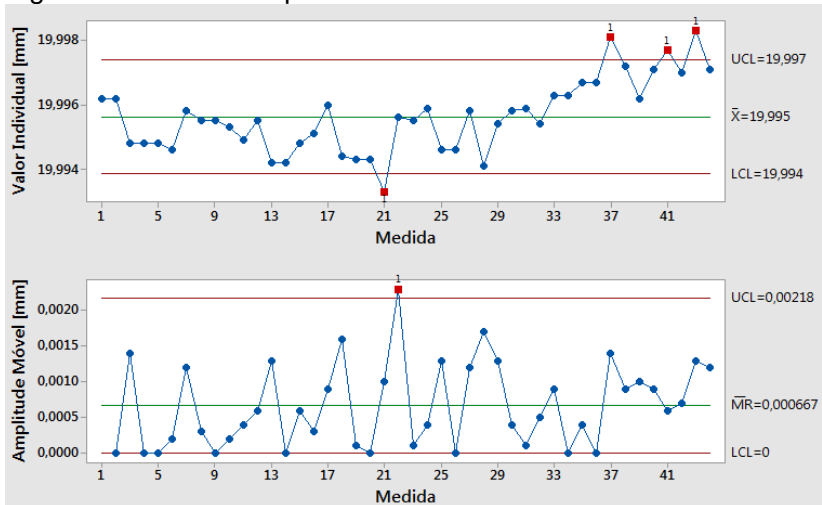
Para tal, mediu-se a peça 44 vezes, com 3 repetições por característica. Cada amostra foi realizada 30 minutos após a terceira repetição executada. Inicialmente, para análise da estabilidade, retirou-se o efeito da repetibilidade para que somente o efeito do valor individual fosse analisado.

A figura 31 apresenta os resultados obtidos para o diâmetro de 20 mm na profundidade de -30 mm sem repetição.

O desvio padrão pode ser calculado conforme recomendação do CEP 2ª Edição. Para um tamanho de amostra 2, $d_2 = 1,128$:

$$\sigma = \frac{MR_{barra}}{d_2} \quad (4)$$

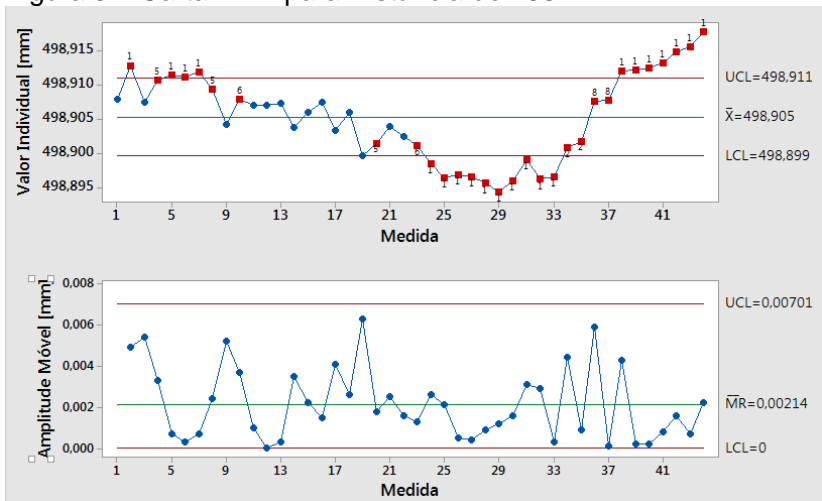
Figura 31: Carta I-MR para Diâmetro de 20 mm e z -30 mm



Fonte: A Autora (2017)

A figura 32 ilustra os resultados para o maior comprimento do padrão, 498,8971 mm.

Figura 32: Carta I-MR para Distância de 498 mm

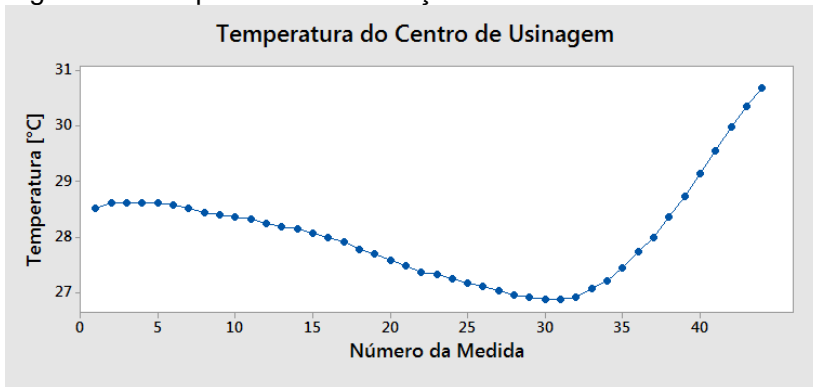


Fonte: A Autora (2017)

Ao analisar os gráficos, observa-se que o sistema de medição apresenta sinais de instabilidade, uma vez que tanto para o gráfico de diâmetro, quanto para o de comprimento é possível encontrar diversos pontos fora dos limites de controle no gráfico da média.

Além das observações citadas, há de se considerar a semelhança entre o comportamento observado para as médias do diâmetro e do comprimento. Com o objetivo de verificar a influência da temperatura nestes resultados, a figura 33 foi plotada. Nela, é possível observar a variação da temperatura ao longo das 44 medidas apresentadas nas figuras 31 e 32. Os valores mostrados na figura 33 são resultados do sensor localizado no cabeçote do Centro de Usinagem enquanto registrou uma variação de temperatura de aproximadamente 4°C.

Figura 33: Temperatura vs. Cabeçote Medida



Fonte: A Autora (2017)

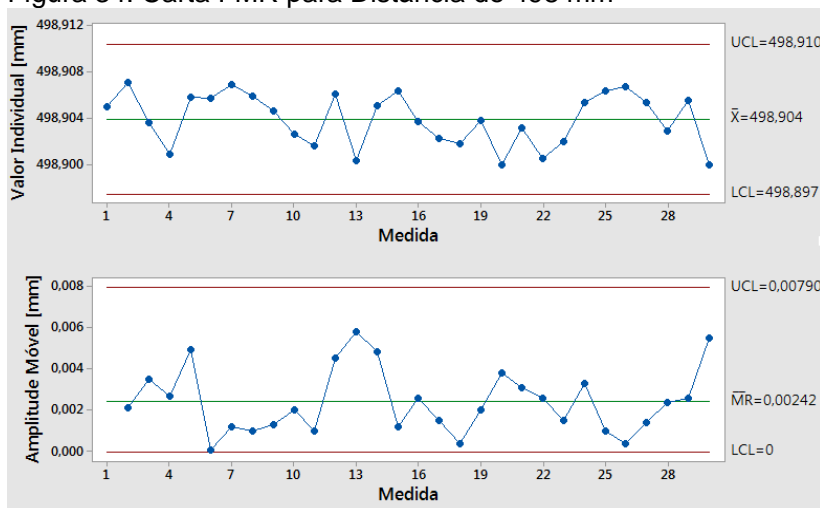
Comparando os resultados de medição do apalpador com os do sensor de temperatura, observa-se que ao mesmo tempo em que a variação da temperatura foi de aproximadamente 4°C, o comprimento de 498 mm variou em torno de 0,02 mm e o diâmetro de 20 variou aproximadamente 4 μm .

Para minimizar o impacto da temperatura nos resultados, uma amostra de 30 medidas foi selecionada, de modo que todas tivessem a temperatura muito próxima. A coleta de dados foi realizada em uma mesma faixa de horários, ao longo de uma

semana, nos períodos da madrugada, quando a máquina não estava em funcionamento.

Neste caso, a diferença entre a maior e a menor temperatura foi de 1 °C. A figura 34 mostra os valores obtidos sem repetição para a distância de 498,8971 mm.

Figura 34: Carta I-MR para Distância de 498 mm



*A variação da temperatura registrada foi de 1°C

Fonte: A Autora (2017)

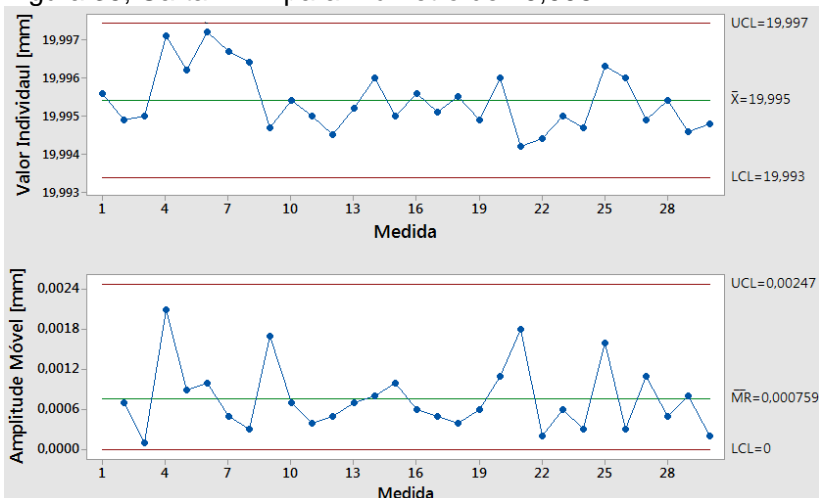
Com a figura 34 é possível verificar que com medições obtidas em temperaturas aproximadas, o resultado no gráfico muda consideravelmente se comparado com a figura 32. Ao avaliar a figura 32, observa-se que há aleatoriedade das medidas sem uma curva de tendência.

Da mesma forma como para a distância, a figura 35 mostra os valores obtidos para o diâmetro de 19,9987 mm.

Assim como nas figuras 31 e 32, em 34 e 35 observa-se que os desvios padrão são maiores nas medidas de distância se comparadas às medições de diâmetro.

Com as figuras 34 e 35 é possível observar que todos os pontos ficaram dentro dos limites de controle. Nota-se ainda que a média dos valores individuais para diâmetro tem limites com amplitude de 4 μ m.

Figura 35; Carta I-MR para Diâmetro de 19,9987 mm



Fonte: A Autora (2017)

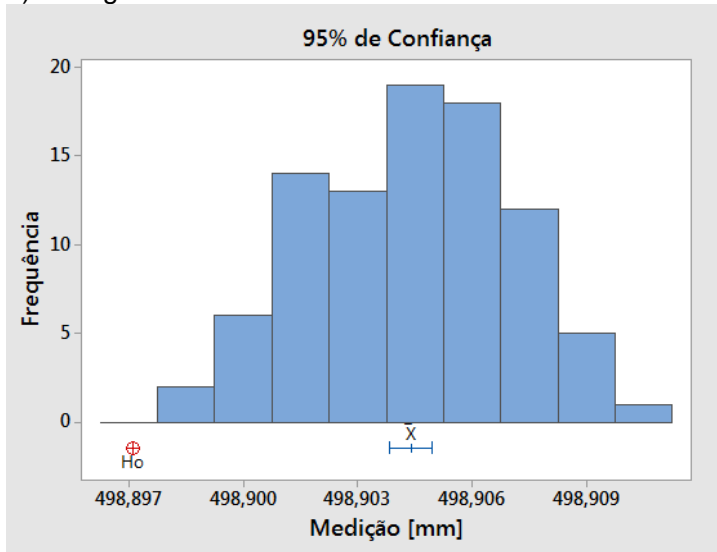
No entanto, a amplitude dos limites de controle para a distância é de 0,013 mm. Dessa forma, a decisão sobre a aceitabilidade deste sistema de medição não deve depender apenas dos resultados estatísticos obtidos, mas também da aplicação do sistema de medição.

4.4.2 Análise de Tendência – Método da Carta de Controle

Para melhor avaliar a tendência do sistema de medição, o método da Carta de Controle foi aplicado utilizando os mesmos dados da estabilidade. Antes dele, no entanto, avaliava-se a distribuição dos valores com o objetivo de verificar a existência de possíveis causas especiais. Ao todo, 30 dados foram plotados para a distância de 498,8971 mm. O resultado pode ser visto na figura 36 (a) e (b).

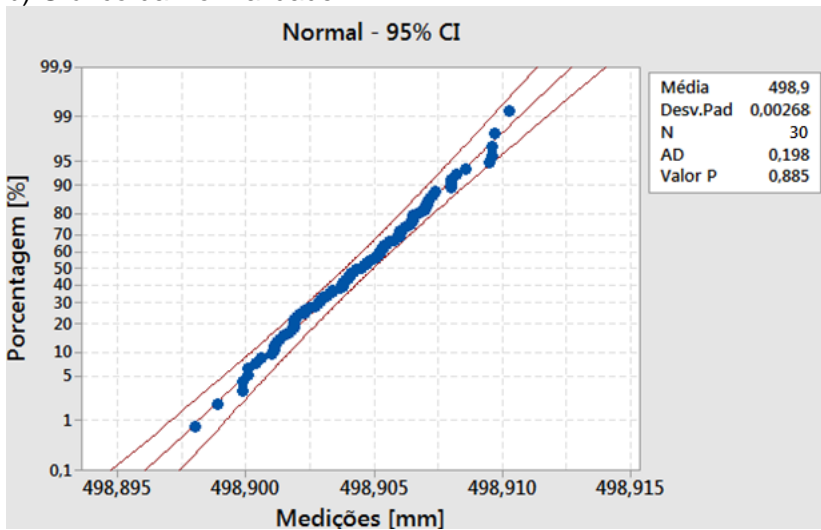
Figura 36: Histograma e Gráfico de Normalidade

a) Histograma



Fonte: A Autora (2017)

b) Gráfico da Normalidade



Fonte: A Autora (2017)

Ao observar o histograma, verifica-se a distribuição dos valores medidos. Já no gráfico da normalidade, nota-se que os pontos seguem o comportamento da distribuição normal.

Dando seqüência ao método da carta de controle, com os mesmos dados utilizados na análise de estabilidade, testou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \text{Tendência} = 0$$

$$H_1: \text{Tendência} \neq 0$$

Para a determinação do valor de referência (VR), foi utilizada a média de 3 repetições realizadas pela MMC de modelo Prismo. Para a análise de diâmetro, a média das medidas é de 19,9953 mm e o VR é de 19,9987 mm. Assim, fazendo uso da metodologia descrita pelo MSA para carta de controle, obtiveram-se os seguintes resultados:

$$\text{Tendência} = -0,0034 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{repetibilidade}} = \sigma_r = 0,00067 \quad (18)$$

$$\sigma_b = 0,0001 \text{ mm}$$

$$t_{\text{tendência}} = -47,33$$

$$\nu = n - 1 = 29$$

$$t = 2,0452$$

Por fim, o intervalo de confiança é o seguinte:

$$-0,004 \text{ mm} \leq \text{erro} \leq -0,003 \text{ mm}$$

Na análise da distância, o VR é de 498,8971 mm e, conforme o gráfico 5, a média das medidas é de 498,9040 mm. Assim, obteve-se:

$$\text{Tendência} = 0,0069 \text{ mm}$$

$$\sigma_r = 0,0021 \text{ mm}$$

$$\sigma_b = 0,0002 \text{ mm}$$

$$t_{\text{tendência}} = 30,45$$

$$0,006 \leq \text{erro} \leq 0,007$$

Observa-se que a tendência apresentou-se significativamente diferente de zero tanto para o diâmetro, quanto para a distância. Com os dados, notou-se que o equipamento possui tendência diferente para as duas características, uma vez que o diâmetro apresentou erro entre -3 e -4 μm e a distância variou entre 6 e 7 μm .

No entanto, mesmo com o cenário desfavorável de acordo com o MSA 4ª Edição, é possível verificar o quão representativo este valor de tendência é para as tolerâncias aplicadas na medição. Neste sentido, fez-se uso do estudo tipo I abordado no manual VDA5. Com ele, foi possível avaliar as condições de uso e analisar o sistema de medição, considerando o efeito das tolerâncias do mensurando.

4.4.3 Estudo Tipo I – VDA 5

A análise da capacidade do sistema é realizada com o estudo tipo I, segundo a metodologia do VDA 5. Para utilizá-la, faz-se uso de repetidas medições com objetivo de avaliar a variação do instrumento de medição e seu erro sistemático.

O estudo em questão leva em conta os valores utilizados no método da carta de controle e no estudo da estabilidade. No entanto, foram considerados apenas valores individuais com o objetivo de eliminar o efeito da variação entre as medidas.

Para o método, a determinação do desvio padrão da repetibilidade s_g pode ser estimada com as medições para o padrão. Deve ser baseado na dispersão de, no mínimo, 25 medições repetidas para estimar o efeito combinado da tendência e da repetibilidade. Conforme o VDA 5, o parâmetro s_g pode ser calculado da seguinte forma:

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_i - X_{\text{barra}})^2} \quad (22)$$

Onde k é o número de medições repetidas, y_i é o valor único da i -ésima medição e X_{barra} é a média aritmética de todos os valores da amostra.

$$s_{g_diâmetro} = 0,00079 \text{ mm}$$

$$s_{g_distância} = 0,0022 \text{ mm}$$

Seguindo as indicações do VDA5, deve-se calcular ainda os índices C_g e C_{gk} . O valor para Tol foi escolhido de acordo com as características usinadas do cabeçote. Assim, para o diâmetro, testa-se a tolerância de $\pm 0,025$ mm e para a distância a tolerância de $\pm 0,05$ mm. Assim:

$$Td_{diâmetro} = -0,0033 \text{ mm} \text{ e } Td_{distância} = 0,007 \text{ mm}$$

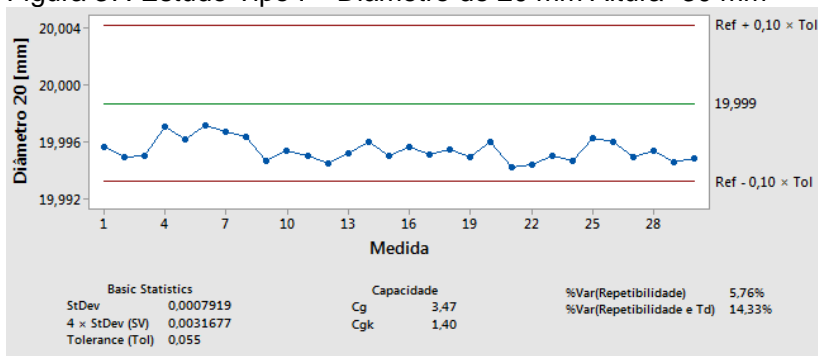
$$C_{g_diâmetro} = 3,16 \text{ e } C_{gk_diâmetro} = 1,40$$

$$C_{g_distância} = 4,43 \text{ e } C_{gk_distância} = 2,91$$

A figura 37 foi compilada por meio da utilização do valor de referência de 19,9987 mm. Nele, é possível visualizar os resultados obtidos com o estudo tipo I, aplicado aos valores medidos para este diâmetro. Os limites superior e inferior para este gráfico são proporcionais à tolerância da característica sob teste. Foi aplicada à tolerância de 0,55 mm para a característica do diâmetro.

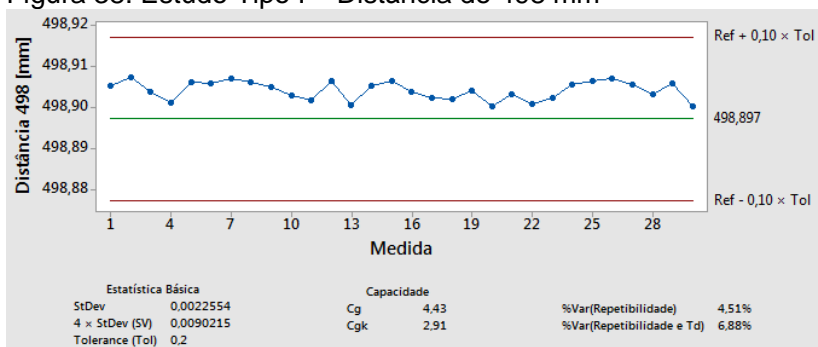
A figura 38, que mantém o valor de referência de -498,8971 mm, ilustra o estudo tipo I, aplicado aos resultados obtidos para a análise do comprimento de 498,8971 mm. Para a característica de comprimento, é aplicada uma tolerância de 0,1 mm.

Figura 37: Estudo Tipo I – Diâmetro de 20 mm Altura -30 mm



Fonte: A Autora (2017)

Figura 38: Estudo Tipo I – Distância de 498 mm



Fonte: A Autora (2017)

Ao analisar os gráficos, é possível observar que o sistema de medição foi capaz de manter os resultados dentro dos limites de controle. Os valores de C_g e C_{gk} ficaram acima de 1,33 em ambos os casos.

Os valores apresentados %Var (Repetibilidade) e %Var (Repetibilidade e Td) ficaram abaixo de 15% assim, constata-se que a variação devido ao sistema é pequena.

4.5 ANÁLISE DA PEÇA DE PRODUÇÃO

Assim como no caso da peça padrão, o estudo do processo de medição de cabeçotes de produção foi realizado em diversas condições.

Ao longo de seis meses, foram feitas medições em diferentes períodos do dia, ao longo do turno de trabalho enquanto a máquina operava normalmente. Foram tomadas, também, medidas em períodos de máquina parada.

Cada cabeçote foi medido, posteriormente, na MMC e os valores dos resultados comparados com as medições realizadas no Centro de Usinagem.

Mantendo a metodologia aplicada na peça padrão, os cabeçotes foram avaliados conforme àquela descrita pelo manual do MSA. Os itens 4.5.1 ao 4.5.5 mostram os resultados desta análise.

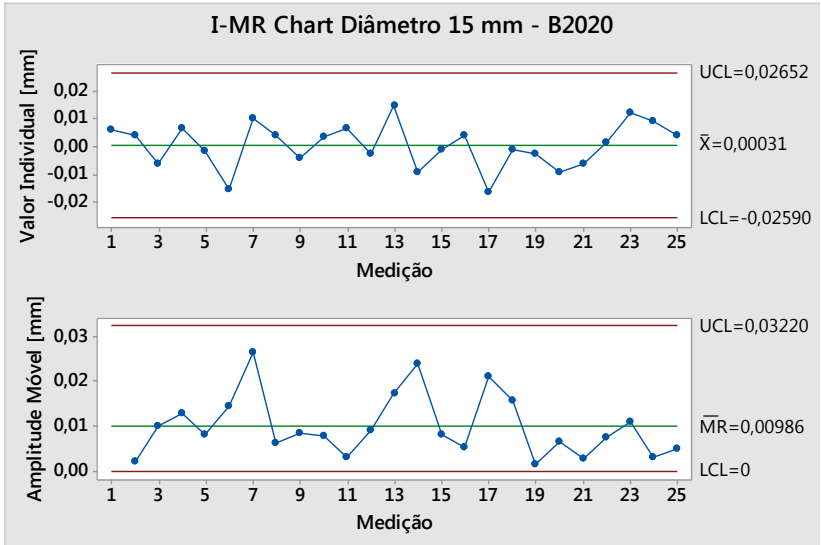
4.5.1 Análise de Estabilidade

Para o estudo em questão, foram selecionados resultados obtidos através do processo de medição realizado entre 8 e 10 horas da manhã. Neste período, o Centro de Usinagem já se encontrava aquecido, pois o respectivo turno inicia diariamente às 5 horas da manhã.

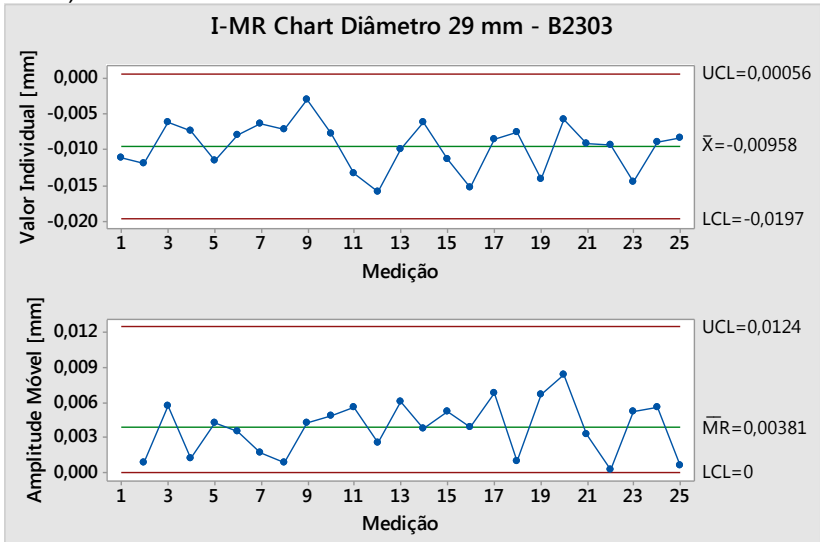
Uma vez que o objetivo é avaliar a estabilidade, os resultados avaliados correspondem à diferença entre os valores provenientes do Centro de Usinagem e os obtidos na Máquina de Medição por Coordenadas, do modelo Accura.

Da mesma forma como para os gráficos da peça padrão, na análise de estabilidade foram desconsideradas as repetições das medidas, de forma que o efeito da repetibilidade não interfira nos resultados. As figuras 39 a, b, c e d mostram os resultados para os diâmetros de quatro diferentes furos do cabeçote. Cada um dos valores representa a diferença dos resultados obtidos no centro de usinagem e na MMC ao medir os mesmos pontos. Para o estudo de estabilidade, Utilizou-se os gráficos de valor individual e amplitude móvel (AM) para que o efeito da repetibilidade não interferisse nos resultados.

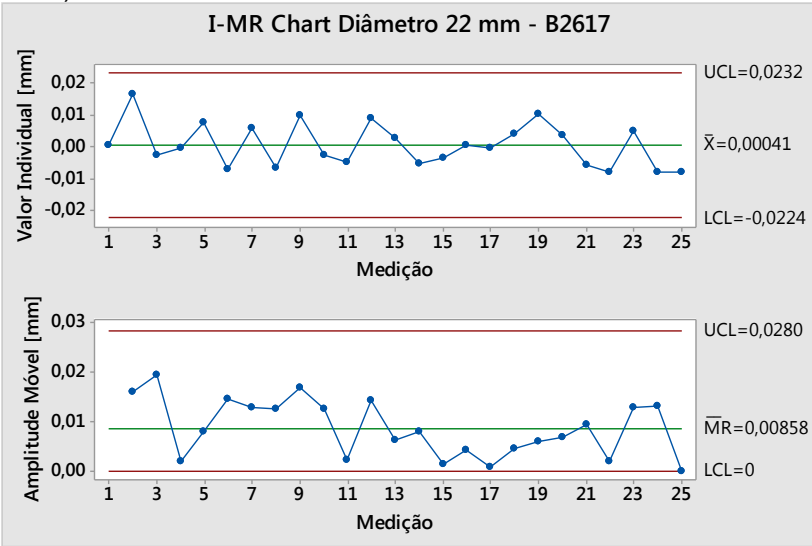
Figura 39: Valores Individuais e AM para Diâmetros
 a) Furo B2020



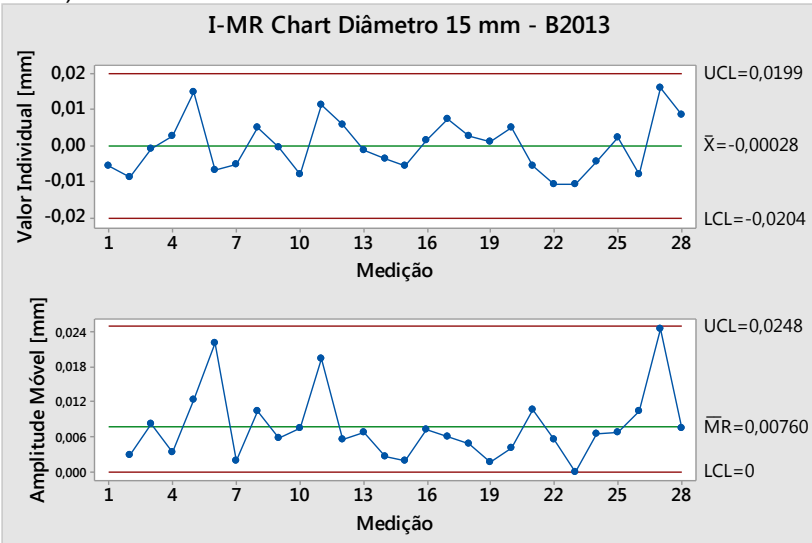
b) Furo B2303



c) Furo B2617



d) Furo B2013



Fonte: A Autora (2017)

Em adição, calculam-se os desvios padrão para cada uma das figuras 39 a, b, c e d conforme a equação 4. Para um tamanho de amostra 2, $d_2 = 1,128$. Assim, a tabela 7 traz os resultados para os desvios padrão das figuras 39 a, b, c e d.

Tabela 7: Desvio Padrão das Amostras de Diâmetro

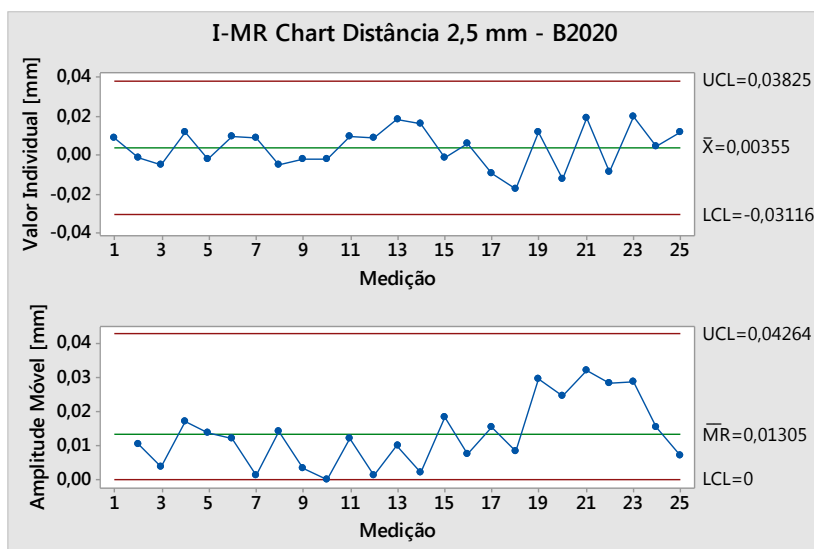
Característica	Furo B2020	Furo B2303	Furo B2617	Furo B2013
MR (mm)*	0,00986	0,00381	0,00858	0,0076
σ (mm)	0,00874	0,00338	0,00761	0,00674

Fonte: A Autora (2017)

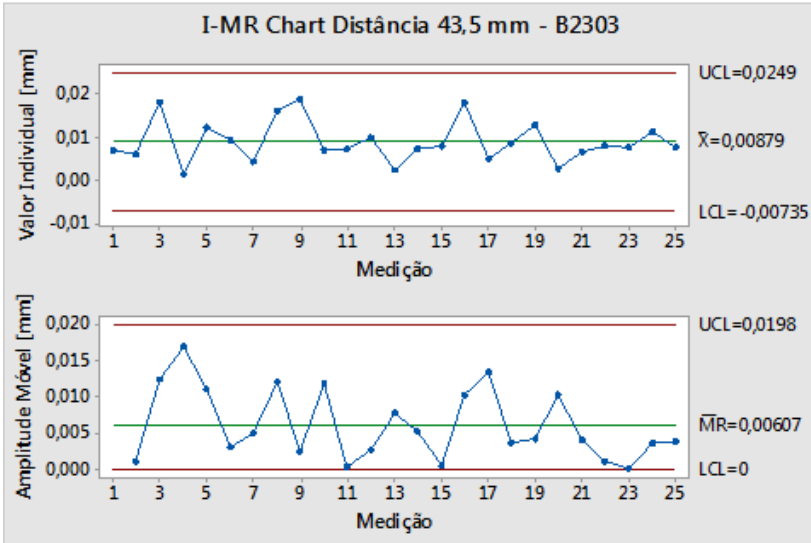
Da mesma forma como mostrado nas figuras 39, as figuras 40 a, b, c, d mostram as diferenças entre os resultados obtidos no Centro de Usinagem e na MMC para as distâncias dos mesmos furos, por meio das cartas I-MR.

Figura 40: Valores Individuais e AM para Distâncias

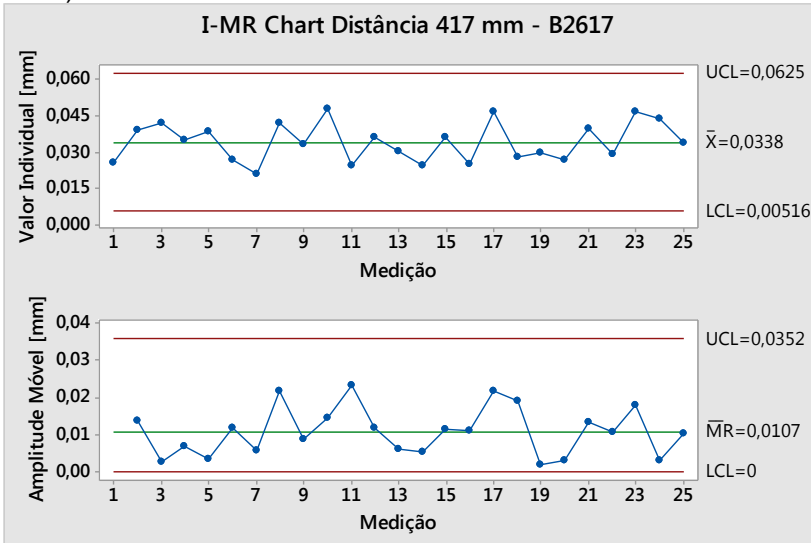
a) Furo B2020



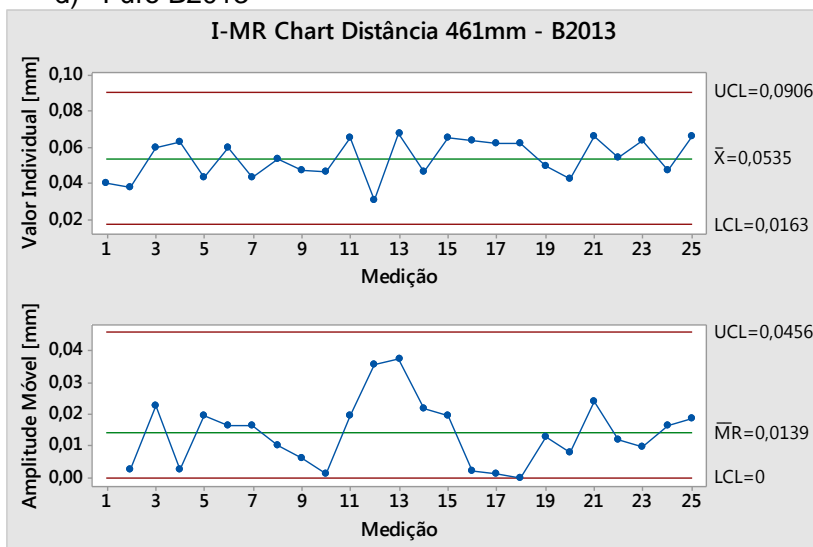
b) Furo B2303



c) Furo B2617



d) Furo B2013



Fonte: A Autora (2017)

Os desvios padrão para cada uma das figuras 40 a, b, c e d podem ser vistos na tabela 8.

Tabela 8: Desvio Padrão das Amostras de Distância

Característica	Furo B2020	Furo B2303	Furo B2617	Furo B2013
MR (mm)	0,013	0,00607	0,0107	0,0139
σ (mm)	0,0115	0,00538	0,00949	0,0123

Fonte: A Autora (2017)

Com as figuras 39 e 40, observou-se que o Centro de Usinagem apresenta medidas estáveis e dentro dos limites de controle. Não se verificam excessos de pontos consecutivos acima ou abaixo da linha central no gráfico da amplitude ou no do valor individual.

Apesar da estabilidade, deve-se considerar que a amplitude dos limites de controle aumentou. Para o diâmetro, no furo B2020 o valor ULC – LLC resultou em 0,052 mm. O menor valor registrado foi do furo B2303 de 0,021. Comparando os valores com o desenho 2D, temos para o diâmetro 2020 uma tolerância de $\pm 0,2$ mm e para B2303 uma tolerância de $+0,021$

mm, o que sugere a existência de influência do processo de usinagem no resultado da medição on-line.

4.5.2 análise de Tendência - Método da Amostra Independente

Para verificar o comportamento da tendência com medidas sem repetição, aplicou-se o método da Amostra Independente. O Valor de Referência (VR) utilizado foi o da medida obtida por meio da MMC.

De início, testou-se a seguinte hipótese para determinar se a tendência é aceitável:

$$H_0: \text{Tendência} = 0$$

$$H_1: \text{Tendência} \neq 0$$

Na análise dos resultados de tendência do cabeçote, selecionaram-se os diâmetros de acordo com a tolerância de desenho. Além disso, consideraram-se, também, as distâncias destes diâmetros ao ponto zero para que fosse possível verificar os resultados com maiores e menores comprimentos.

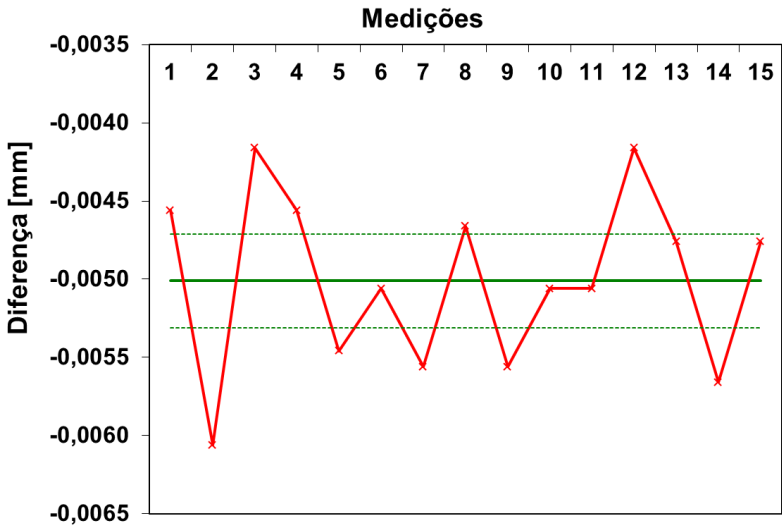
Assim, os diâmetros B2020, B2303, B2617 e B2013 foram escolhidos e medidos 15 vezes. Os resultados dos diâmetros contidos na tabela 9 foram demonstrados graficamente na figura 41 a, b, c e d. Com a tabela, nota-se que todos os valores apresentaram tendência diferente de zero.

Figura 41: Análise da Amostra Independente – Diâmetros

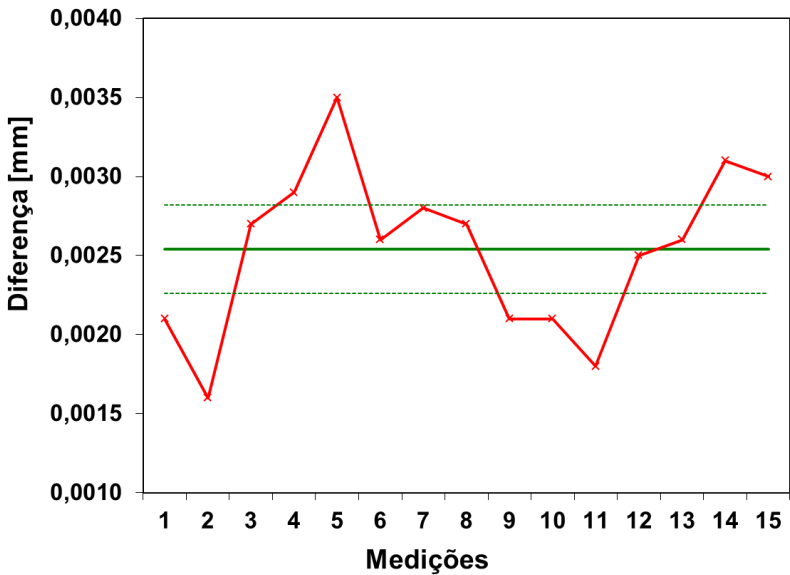
Legenda:



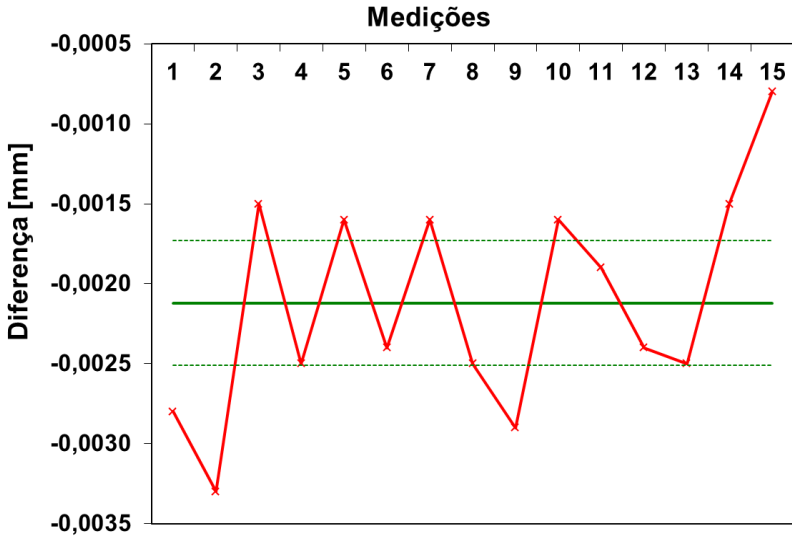
a) Furo B2020



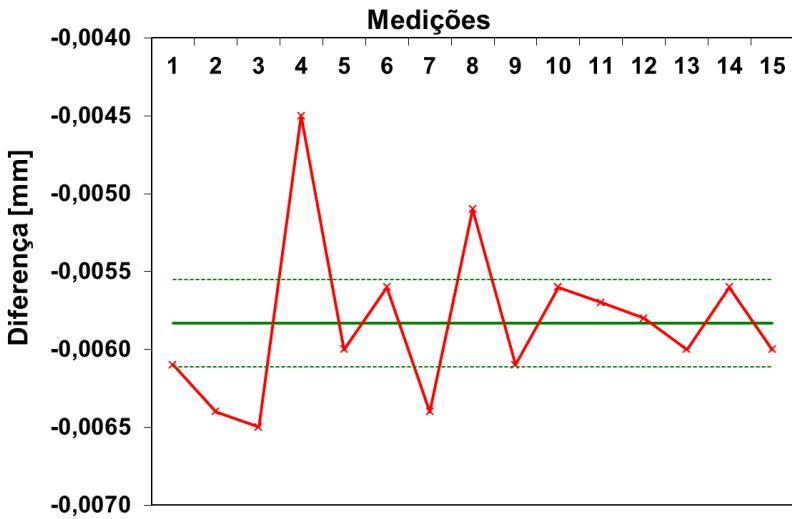
b) Furo B2303



c) Furo B2617



d) Furo B2013



Fonte: A Autora (2017)

Tabela 9: Resultados Método da Amostra Independente – Diâmetros

Característica	B2020	B2303	B2617	B2013
Valor de Referência (mm)	15,05	28,999	22,044	15,041
Média (mm)	15,045	29,002	22,041	15,035
Tendência (mm)	-0,005	0,003	-0,002	-0,006
σ_r (mm)	0,0006	0,0006	0,0007	0,0005
σ_b (mm)	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001
$t_{\text{tendência}}$	-34,44	17,897	-12,12	-43,26
$t(v,95\%)$	2,145	2,145	2,145	2,145
Graus de Liberdade v	14	14	14	14
Intervalo de Confiança (mm)	-0,005	0,0023	-0,003	-0,006
	-0,005	0,0029	-0,002	-0,006

Fonte: A Autora (2017)

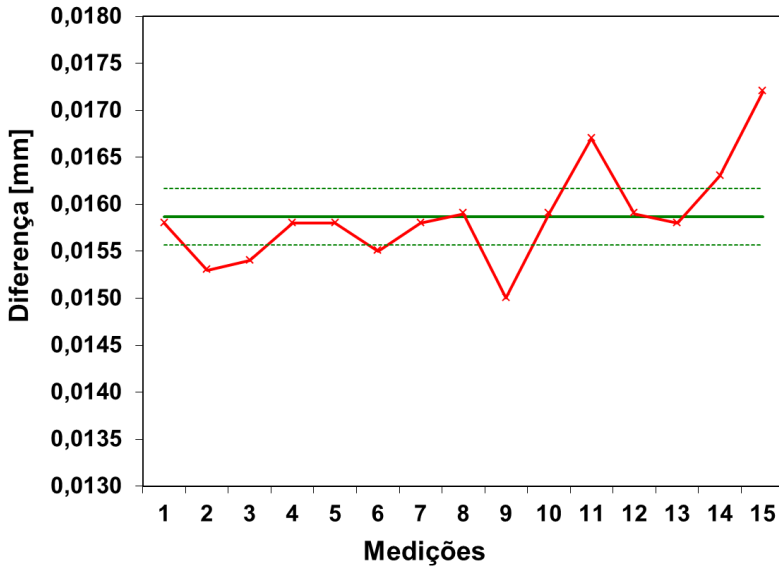
Nota-se que, embora a diferença entre os valores medidos no Centro de Usinagem e os medidos na MMC seja pequena, a tendência apresentou valores diferentes de zero em todos os casos. No entanto, há de se considerar que a diferença entre o maior e o menor valor encontrado não ultrapassou 6 μm .

Da mesma forma como para os diâmetros, os valores da tendência para cada distância foi colocada em gráficos para melhor visualização dos resultados. A figura 42 a, b, c e d representa estes valores. A tabela 10 mostra os resultados obtidos ao aplicar o método às distâncias.

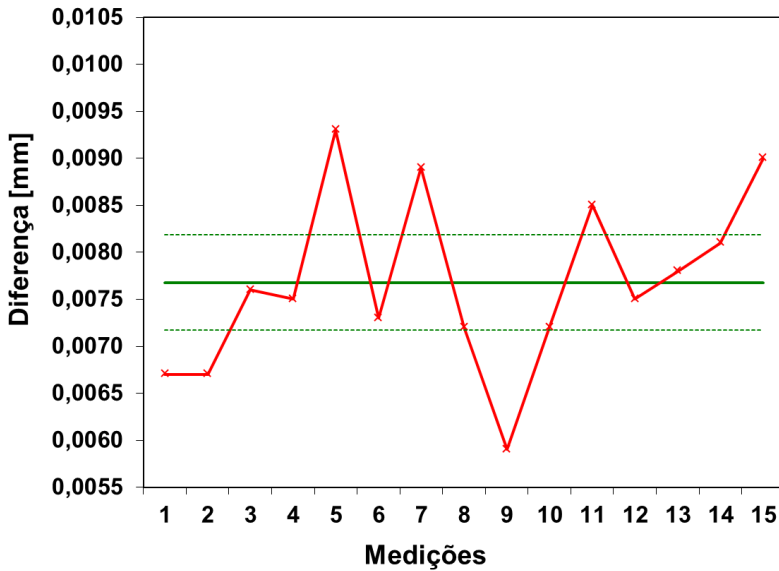
Figura 42: Análise da Amostra Independente – Distâncias
Legenda:

 Tendência	 Obtido	 Inferior	 Superior
---	--	--	--

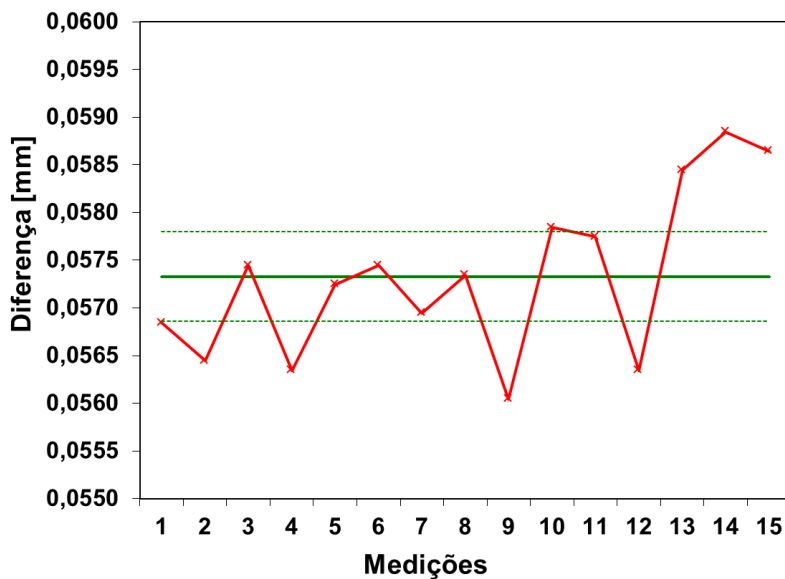
a) Furo B2020



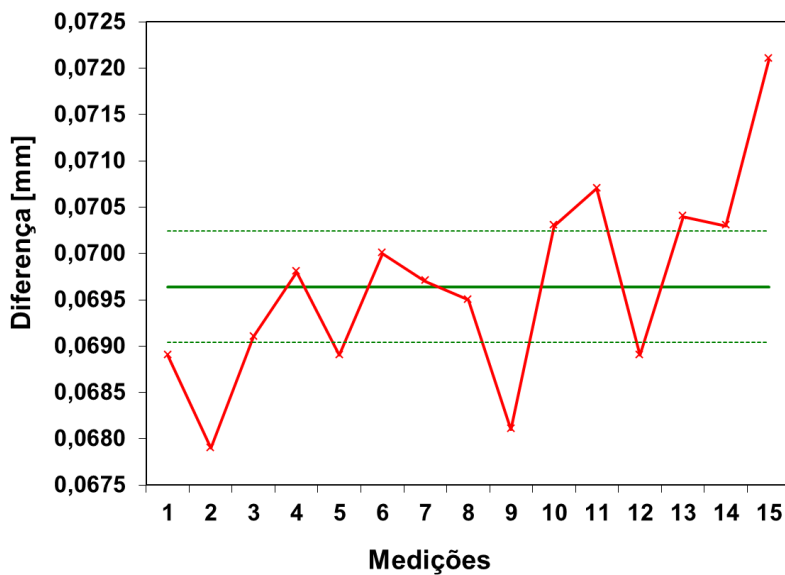
b) Furo B2303



c) Furo B2617



d) Furo B2013



Fonte: A Autora (2017)

Tabela 10: Resultados Método da Amostra Independente – Distâncias

Característica	B2020	B2303	B2617	B2013
Valor de Referência (mm)	2,529	-43,504	-416,981	-461,464
Média (mm)	2,545	-43,497	-416,923	-461,394
Média corrigida (mm)	2,543	-43,505	-416,989	-461,467
Tendência (mm)	0,016	0,008	0,057	0,070
σ_r (mm)	0,0005	0,0009	0,0009	0,0011
σ_b (mm)	0,0001	0,0002	0,0002	0,0003
$t_{\text{tendência}}$	115,88	31,499	256,425	251,229
$t(v,95\%)$	2,145	2,145	2,145	2,145
Graus de Liberdade v	14	14	14	14
Intervalo de Confiança (mm)	0,016	0,007	0,057	0,069
	0,016	0,008	0,058	0,070

Fonte: A Autora (2017)

Portanto, assim como no caso dos diâmetros, nota-se que a tendência apresentou valores diferentes de zero em todos os casos. No entanto, ao observar os dados da medição de distâncias, nota-se um comportamento diferente do resultante da apuração dos diâmetros, pois, ao contrário dos diâmetros, as maiores divergências foram encontradas nos maiores comprimentos.

4.5.3 Análise de Repetibilidade

Com o objetivo de avaliar o efeito da oscilação das medidas ao serem repetidas para uma mesma peça, realizou-se a análise da variância. No entanto, há de se considerar que não foi possível prosseguir com o estudo da reprodutibilidade, uma vez que, os cabeçotes são, obrigatoriamente, inseridos no Centro de Usinagem por meio de um robô. Dessa forma, a presente análise não conta com os efeitos da reprodutibilidade.

Para a análise, utilizaram-se os mesmos diâmetros e distâncias já apresentados anteriormente, quais sejam: B2020,

B2303, B2617 e B2013. Cada uma das características foi repetida 3 vezes. Assim:

$$k = 3, n = 27 \text{ e } gl = 54$$

Onde k é o número de repetições, n é o número de medições realizadas e gl o número de graus de liberdade. Considerando apenas o efeito da Repetibilidade VE, aplica-se o seguinte conforme MSA 4ª Edição:

$$\sigma_{VT} = VT = \sqrt{VP^2 + VE^2}$$

$$VT = VE$$

Sem o efeito da reprodutibilidade, VE pode ser descrito por meio da equação 26:

$$VE = \sqrt{\frac{1}{n(k-1)} \left[\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k (y_i - X_{\text{barra}})^2 \right]} \quad (26)$$

Onde k é o número de medições repetidas, no número de medições, y_i é o valor único da i -ésima medição e X_{barra} é a média aritmética de todos os valores da amostra

A tabela 11 mostra os resultados da aplicação da equação 30 para os diâmetros medidos com base na aplicação dos referidos parâmetros. Os valores percentuais de VE foram obtidos em relação à tolerância de 0,055 mm.

Tabela 11: Resultados Análise de Variância – Diâmetros

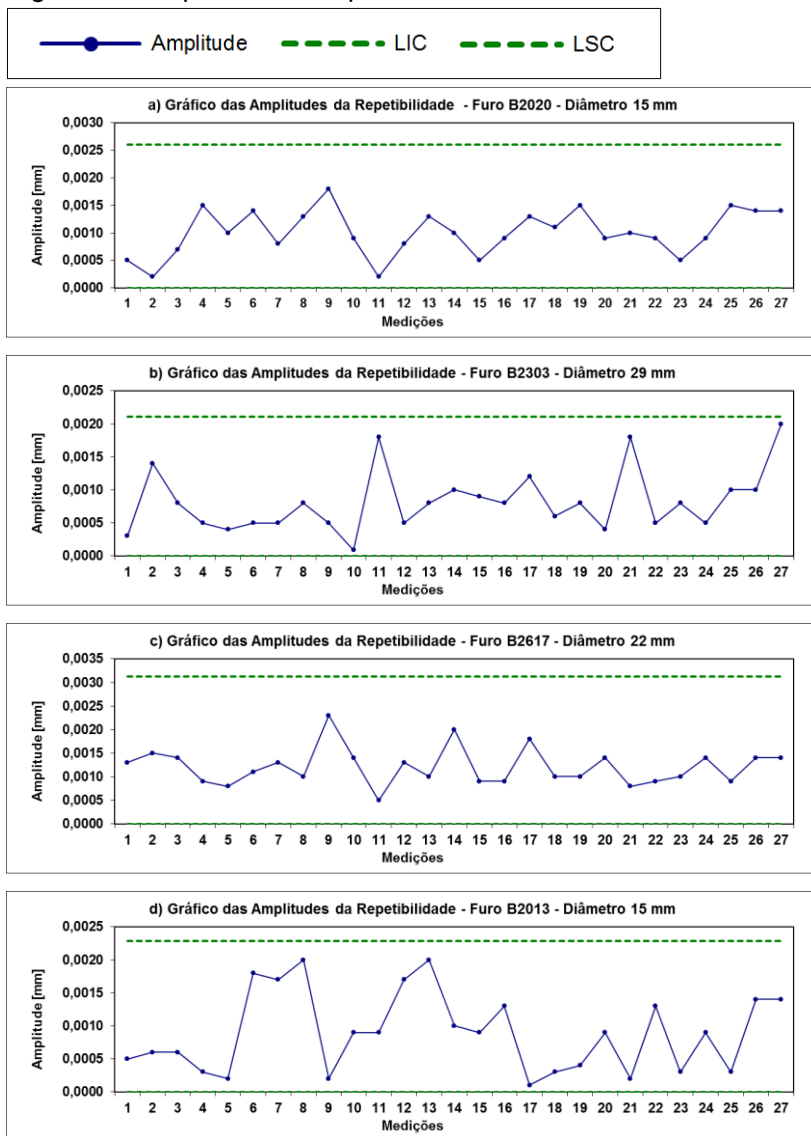
Característica	B2020	B2303	B2617	B2013
VE	0,00057	0,00041	0,00067	0,00056
6*VE	0,00342	0,00246	0,00402	0,00336
%VE	6,22%	4,47%	7,31%	6,11%

Fonte: A Autora (2017)

Com a tabela 11, pode-se observar que, para esta propriedade, a medição atende os requisitos do método com %VE abaixo de 10%.

A ilustração dos resultados dos diâmetros contidos na tabela 11 pode ser vista por meio da figura 43 a, b, c e d.

Figura 43: Amplitude da Repetibilidade – Diâmetros



Fonte: A Autora (2017)

Com a figura 43 nota-se que em nenhum gráfico o limite de controle ultrapassa o valor de 3,5 μ m de amplitude. Além disso, não foram encontrados excesso de pontos consecutivos na mesma direção.

A tabela 12 representa os resultados para as distâncias medidas. Nela, nota-se a repetição do resultado da tabela 11, em que os valores tiveram resultados de %VE abaixo de 10%. Os valores percentuais de VE foram obtidos em relação à tolerância de 0,2 mm.

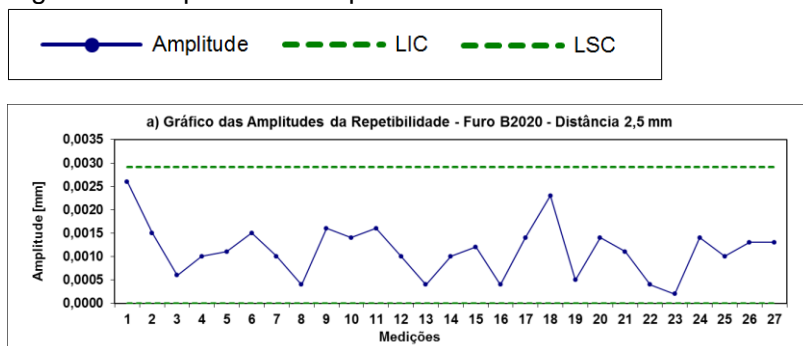
Tabela 12: Resultados da Análise de Variância – Distâncias

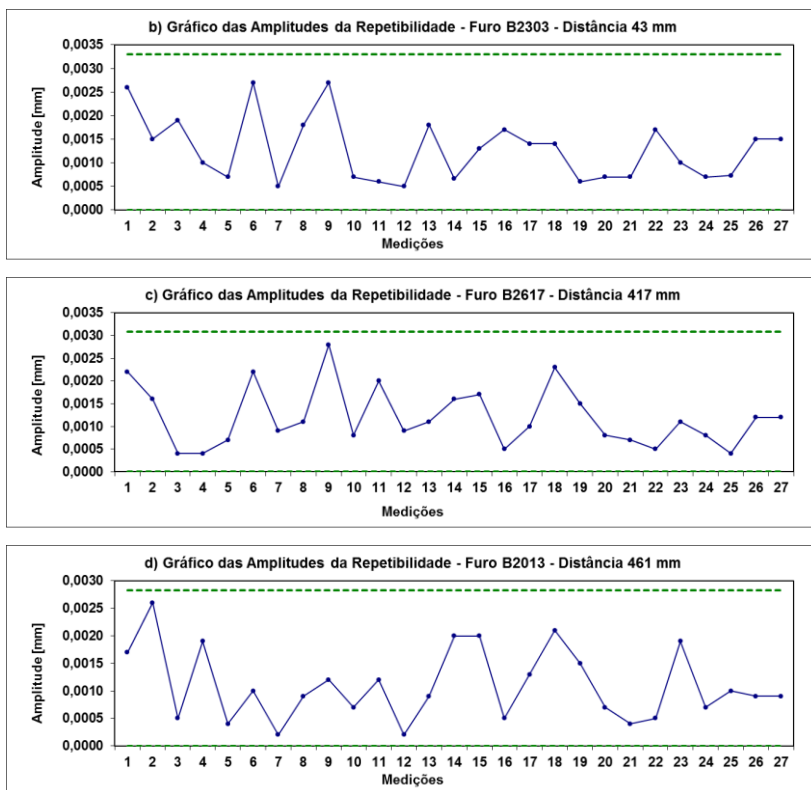
Característica	B2020	B2303	B2617	B2013
VE	0,00065	0,00078	0,00071	0,00067
6*VE	0,0039	0,00468	0,00426	0,00402
%VE	1,95%	2,34%	2,13%	2,01%

Fonte: A Autora (2017)

As figuras 44 a, b, c e d mostram o comportamento da amplitude das repetibilidades para os cabeçotes medidos.

Figura 44: Amplitude da Repetibilidade – Distâncias





Fonte: A Autora (2017)

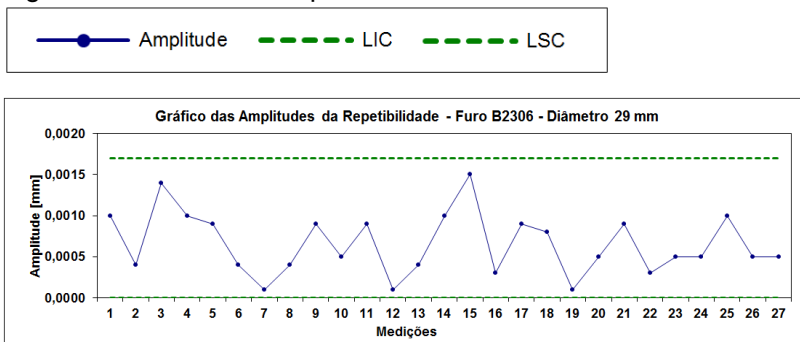
Da mesma forma como observado na figura 43, a figura 44 mostra todos os gráficos abaixo de um limite de controle que, no pior dos casos, tinha o valor de 3.5 μm de amplitude. A figura 44 mantém o observado com relação à distribuição pontos.

4.5.4 Impacto do Processo de Usinagem na Medição On-Line

Para verificar a influência da usinagem nos resultados de medição, foram comparados os dados para diferentes diâmetros. A avaliar os resultados de todos os diâmetros do cabeçote, notou-se que os dois furos que apresentaram os melhores resultados para VE são fabricados com a mesma ferramenta, os furos B2303 e B2306. O primeiro foi abordado nas análises deste

capítulo. O segundo tem seus resultados de repetibilidade mostrados na figura 45.

Figura 45: Análise de Repetibilidade – Diâmetro B2306



Fonte: A Autora (2017)

Da mesma forma como para o furo B2303, o furo B2306 apresentou amplitudes menores que $2\mu\text{m}$. A tabela 13 compara os resultados de todos os diâmetros.

Tabela 13: Comparação de Resultados de VE para Diâmetros

Ferramenta	Número 1		Número 2		Número 3		Número 4	
Característica	B2020	B2013	B2617	B2607	B2002	B2006	B2306	B2303
Diâmetro (mm)	15	15	22	22	15,8	15,8	29	29
%VE	6,22%	6,11%	7,31%	7,09%	7,76%	7,96%	4,47%	4,47%

Fonte: A Autora (2017)

Com a tabela 13 nota-se que os diâmetros de 29 tiveram os melhores resultados para análise de VE.

4.5.5 Considerações para Medição On-line em Centro de Usinagem

A dissertação sugere uma forma de testar e verificar a capacidade do Centro de Usinagem medir o que for proposto. Sendo assim, se a possibilidade existir, as correções com double ball bar e laser interferométrico devem ser realizadas para melhorar a performance da máquina-ferramenta.

Para acompanhar a estabilidade da máquina, recomenda-se a fabricação de uma peça padrão que possa ser fixada dentro do Centro de Usinagem. O projeto da peça deve levar em conta o objetivo para qual ela será desenvolvida. Se a finalidade é controlar a distância entre duas faces, a peça deve representar esta característica preferencialmente com as mesmas dimensões.

A fixação da peça também requer cuidados uma vez que se deve considerar a possibilidade de que a mesma fique alinhada em relação aos eixos da máquina.

Com a peça padrão dentro da máquina é recomendável que se realize as medições todos os dias em um mesmo horário, com a máquina em regime de trabalho, já aquecida para reduzir o efeito da variação de temperatura. Os resultados coletados devem servir para a aplicação de métodos estatísticos e análise de capacidade da máquina como um sistema de medição.

Estes métodos devem, em suma, verificar a estabilidade, capacidade maior que 1,33, R&R menor que 30% (idealmente menor que 10%). Recomenda-se aplicação do erro tipo I para análise. Os valores de %Var (Repetibilidade) e %Td (Repetibilidade e Td) devem ficar abaixo de 15% para que a variação devido ao sistema seja pequena.

Considerando a medição em longo prazo, a aplicação diária de todas estas propriedades pode se tornar difícil de realizar. Dessa forma, recomenda-se que a frequência de controle seja reduzida a medida que se observar a estabilidade dos resultados. Sugere-se, no entanto, que a rotina de medição seja realizada pelo menos uma vez por turno, nos meados do turno de trabalho.

O monitoramento do equipamento deve levar em consideração a amplitude térmica que a máquina é exposta ao longo do dia ou do ano. A temperatura impacta o resultado de medição e, para evitar os problemas da dilatação térmica do conjunto, deve-se criar alarmes na máquina para quando as dimensões medidas estiverem próximas do limite especificado. Vale citar que os limites podem ser criados para controlar outros efeitos além da temperatura.

Por fim, após a realização das medições e, com a avaliação estatística dos resultados, é possível encontrar uma faixa em que será possível controlar características de usinagem

com a confiabilidade necessária para reduzir a frequência de controle em MMCs.

5 CONCLUSÕES

As diferenças entre as medições realizadas no Centro de Usinagem e na Máquina de Medição por Coordenadas, apesar de estáveis, mostram resultados melhores para os diâmetros se comparados com as distâncias no eixo X. Além disso, ao comparar os diâmetros entre si, observa-se que furos com menor tolerância apresentaram resultados melhores para repetibilidade.

O Centro de Usinagem apresentou-se estável somente quando a medição foi realizada durante vários dias em um mesmo horário e com um delta de temperatura de aproximadamente 1°C. O efeito da temperatura gera instabilidade no sistema. Para encontrar gráficos estáveis é necessário que a peça seja medida todos os dias em um mesmo horário com temperaturas semelhantes.

Embora a tendência tenha sido diferente de zero em todas as medições, a estabilidade e repetibilidade dos resultados dos cabeçotes sugerem que a medição on-line pode ser realizada para reduzir a frequência de medição em MMCs. No entanto, o tratamento estatístico de dados feitos de forma aleatória no Centro de Usinagem não deve dispensar a aplicação do erro tipo I para análise.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros propõe-se:

- a) Explorar outros eixos do Centro de Usinagem;
- b) Quantificar o efeito da fixação da peça de produção;
- c) Testar variáveis de correção de programa para os valores de tendência;
- d) Testar medição diferencial.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, André Roberto de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. Florianópolis: Manole, 2008.

ALBERT, Mark. **Raising the Bar with Ball bar Testing**. Modern Machine Shop Magazine. 2014. Disponível em: <<http://www.mmsonline.com/articles/raising-the-bar-with-ballbar-testing>>. Acesso em 06 de agosto de 2017.

ANDERSON, Peter. **Methodology for evaluating the production accuracy of the machine tools**. Tampere Technical University, 1992.

ARENHART, Francisco; DONATELLI, Gustavo D.; PORATH, Mauricio C.; **An experimental method for assessing the contribution of the production process variations to the task-specific uncertainty of coordinate measurements**. Measurement. Volume 45, Issue 3, April 2012, Pages 507-516

ASSOCIAÇÃO DE INDUSTRIA AUTOMOBILISTICA. Verband der Automobilindustrie – **VDA. 2. ed. 2011**.

AUTOMOTIVE, INDUSTRY ACTION GROUP – AIAG. Controle Estatístico de Processo – **CEP. 2. ed. 2005**.

AUTOMOTIVE, INDUSTRY ACTION GROUP – AIAG. Measurement Systems Analysis – **MSA. 4. ed. 2010**.

BAGAD, Vilas. Mechatronics: **ISBN 9788184314908**. 4. ed. rev. Technical Publications, 2008.

BARBOSA, Ronaldo. **Dúvida Mazak - temperatura inserida no programa de usinagem** (Tupy VCN510CII SN223194) [mensagem pessoal]. Email recebido por <caroline.moreto@tupy.com.br>, em 8 de março de 2017.

BRECHER, C.; ALTINTAS, Yusuf.; WECK, M.; WITT, S. **Virtual Machine Tool**. Annals of the CIRP, v. 54., 2005.

CHEN, Yueping; GAO, Jian; DENG, Haixiang; ZHENG, Detao; CHEN, Xin; KELLY, Robert. **Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces**. Precision Engineering. v. 37, p. 203– 212, 2013.

CHRYSSOLOURIS, George. **Manufacturing Systems: Theory and Practice**. 2. ed. Patras: Springer, 2005.

CORRÊA, Henrique Luiz; CORRÊA, Carlos Alberto. **Administração de Produção e Operações**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

CUMMINGS, Moise; MARIANI, Michael. **To make the first part correct, machine volumetric positioning accuracy is key**. Manufacturing Engineering, 2009.

DE SOUZA, Adriano Fagali. **Análise das interpolações de trajetórias de ferramenta na usinagem HSC (High Speed Cutting) em superfícies complexas**. Universidade Metodista de Piracicaba, 2001. Disponível em: <https://www.unimep.br/phpg/bibdig/pdfs/docs/23092011_142604_adriano_fagali_de_souza.pdf>. Acesso em 26 de novembro de 2017.

DONALDSON, R.; THOMPSON, D. **Design and performance of a small precision cnc turning machine**. Annals of the CIRP, v. 35, p. 373–376, 1986.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1995.

HAMBURG-PIEKAR, Daniel Samuel. **Calibração De Peças Padrão Em Máquinas De Medição Por Coordenadas**. Universidade Federal De Santa Catarina. Florianópolis, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88352>>. Acesso em 26 de novembro de 2017.

HEXAGON METROLOGY. Measuring on Machine Tools - **Tool and Workpiece Measurement**. Disponível em: <http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/hxmh/mh/general/brochures/mh_Tool_Workpiece_Measurement_en.pdf>. Acesso em 26 de junho de 2016.

HUANG, Nuodi; BI, Qingzhen; WANG, Yuhan; SUN, Chao. **5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 84(2014)1–8

IBARAKI, Soichi; TAKEYUKI, Iritani; TETSUYA, Matsushita. **Error map construction for rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Ed. 68 (2013) 21–29

IZARO. Iزارو **Manufacturing Technology**. 27 de Setembro de ; 2011. <http://www.izaro.com/contenidos/ver.php?id=es&se=2&su=22&co=1317125435> (acesso em 18 de Janeiro de 2018).

IMKAMP, Dietrich; BERTHOLD, Jürgen; HEIZMANN, Michael; KNIEL, Karin; MANSKE, Eberhard; PETEREK, Martin; SCHMITT, Robert; SEIDLER, Jochen; SOMMER, Klaus-Dieter. **Challenges and trends in manufacturing measurement technology – the “Industrie 4.0” concept**. Journal of Sensors and Sensor Systems, v. 5., p. 325-335, 2016.

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 230-1:2012**. Test code for machine tools -- Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions.

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10360-1:2000**: Geometrical Product Specifications (GPS) — Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM).

JANKOWSKI, Michael; WOZNIAK, Adam; BYSZEWSKI, Maciej. **Machine tool probes testing using a moving inner**

hemispherical master artefact. Precision Engineering, v. 38. p. 421-427, 2014.

JIANG, Zhouxiang; TANG, Xiaoqi; ZHOU, Xiangdong; ZHENG, Shiqi. **Machining tests for identification of location errors on five-axis machine tools with a tilting head.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, Vol.79(1), pp.245-254

KALJAPAKJIAN, Serope; SCHMID Steven R. **Manufacturing Engineering And Technology.** 6. ed. Pearson, 2009.

LIN, Psang Dain; TSAI, Ing Jyh. **The machining and on-line measurement of spatial cams on four-axis machine tools.** Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 36. p. 89-101, 1996.

LIU, Huanlao; XUE, Xiaoning; TAN, Guangyu. **Backlash Error Measurement and Compensation on the Vertical Machining Center** Engineering. Engineering, v. 2. p. 403-407, 2010.

LÓPEZ DE LACALLE, Norberto; LAMIKIZ MENTXALA, Aitzol. **Machine Tools for High Performance Machining.** Springer, 2009.

MAYER, J. R.; GHAZZAR, A.; ROSSY, O. **3D characterisation, modelling and compensation of the pre-travel of a kinematic touch trigger probe.** Measurement, v. 19. p.83-94, 1996.

MAZAK. **Especificações da máquina: Vertical Center Nexus 510c-II.** Disponível em: <<https://www.mazak.com.br/machines/vertical-center-nexus-510c-ii/>>. Acesso em 04 de novembro de 2016.

MUELNER, J. E.; MAROPOULOS, P. G. **Large volume metrology technologies for the light controlled factory.** Annals of the CIRP, v. 25. p. 169-176, 2014.

MUTILBA, Unai; GOMEZ-ACEDO, Eneko; KORTABERRIA, Gorka; OLARRA, Aitor; YAGÜE-FABRA, Jose A. **Traceability of**

On-Machine Tool Measurement: a Review. MDPI Journals, 2017.

NASCIMENTO, Claudia Hespanholo. **Estudo do erro de posicionamento do eixo X em função da temperatura de um Centro de Usinagem.** Escola de Engenharia de São Carlos, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-17112015-111242/pt-br.php>>. Acesso em 22 de outubro de 2017.

OKAFOR, Antony Chukwujekwu; ERTEKIN, Yalcin. M. **Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer: Part 1. linear positional errors.** Journal of Materials Processing Technology, v. 105. p. 394-406, 2000.

OKUMA. **Optimized Servo Control.** Disponível em: <<http://www.okuma.co.jp/english/onlyone/servo-navi/index.html>>. Acesso em 26 de junho de 2017.

QUINGZHEN, Bi; HUANG, Nuodi; SUN, Chao; WANG, Yuhan; ZHU, Limin; DING, Han. **Identification and compensation of geometric errors of rotary axes on five-axis machine by on-machine measurement.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 89. p. 182-191, 2015.

RAMESH, R, MANNAN, M.A. POO, A.N. **Error compensation in machine tools — a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture dependent errors.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 40. p. 1235–1256, 2000.

RENISHAW, **DATA SHEET: OMP60 OPTICAL MACHINE PROBE.** 2005. <<HTTP://RESOURCES.RENISHAW.COM/EN/DETAILS/DATA-SHEET-OMP60-OPTICAL-MACHINE-PROBE--53351>> ACESSO EM 18 DE JANEIRO DE 2018.

RENISHAW. **Innovations in touch-trigger probe sensor technology.** 2011. Disponível em: <<http://resources.renishaw.com/en/details/te411-technology-paper-innovations-in-touch-trigger-probe-sensor-technology--32422>>. Acesso em 20 de novembro de 2017.

RENISHAW. **Apalpador com transmissão óptica OMP60.** 2016. Disponível em: <<http://www.renishaw.com.br/pt/apalpador-com-transmissao-optica-omp60--6101>>. Acesso em 27 de novembro de 2017.

RENISHAW. **QC20-W wireless ballbar system description and specifications.** 2013. Disponível em: <<http://www.renishaw.com/en/qc20-w-ballbar-system--11075>>. Acesso em 20 de novembro de 2017.

RENISHAW. **Technical specifications: Probing systems for CNC machine tools.** 2011. Disponível em: <<http://www.renishaw.com/en/machine-tool-probes-and-software-6073>>. Acesso em 23 de julho de 2017.

SHEN, Y.; MOON, S. **Error compensation of coordinate measurements in computer integrated manufacturing using neural networks.** Journal of Materials Processing Technology, v. 61. p. 12-17, 2016.

SILVA, Welbert Luiz. **Experiência na implantação da rotina de análise de sistemas de medição em uma indústria de auto peças.** Centro Federal de Educação Tecnológica. Belo Horizonte, 2001. Disponível em: <https://seer.dppg.cefetmg.br/index.php/revista-et/article/view/40>>. Acesso em 22 de julho de 2017.

SMITH, Graham T.; Machine Tool Metrology: An Industrial Handbook; 1. ed. Berlin: Springer, 2016.

SOUSA, André Roberto de. **Padrões Corporificados e a Tecnologia de Medição por Coordenadas Inovando a Qualificação Geométrica De Centros De Usinagem.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/79326>>. Acesso em 20 de novembro de 2017.

SPUR, G.; HOFFMAN, E.; PALUNCIC, Z.; BENZINGER, K.; NYMOEN, H. **Thermal behavior optimization of machine tools**. Annals of the CIRP, v. 37. p. 401–405, 1988.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Introdução ao projeto de Máquina-Ferramentas Modernas**. Universidade Federal De Santa Catarina. Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://files.comunidades.net/mutcom/Projetos_de_maq_ferramentas.pdf>. Acesso em 26 de novembro de 2017.

SUH, S.; LEE, E. **Contouring performance measurement and evaluation of NC machine controller for virtual machining cam system**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 16. p. 271–276, 2000.

WECK, Manfred. **Handbook of Machine Tools**. Nova Iorque(EUA): John Willey & Sons, 1984.

WOZNIAK, Adam; BYSZEWSKI, Maciej; JANKOWSKI, Michael. **Setup for Triggering Force Testing of Touch Probes for CNC Machine Tools and CMMs**. Measurement Science Review, v. 13, 2013.

YOUSSEF, Helmi A.; EL-HOFY, Hasan. **Machining Technology: Machine Tools and Operations**. CRC Press, 2008.

ZHAN-QIANG, Liu; VENUVINOD, Patrik; OSTAFIEV, V. A. **On-Machine Measurement of Workpieces With the Cutting Tools**. MCB University Press: Integrated Manufacturing Systems. v. 9., 1998.

ANEXO A – FATORES PARA CÁLCULO DE LIMITES

Tabela 14: Valor de E2, D3 e D4 para Gráficos em R

GRÁFICOS BASEADOS EM R						
Tamanho da amostra	Gráfico R		Gráfico \bar{X}	Gráfico X	Gráfico \bar{X}	Estimativa de σ
	D ₃	D ₄	A ₂	E ₂	A ₄	d ₂
n						
2	-	3,267	1,88	2,66	1,88	1,128
3	-	2,574	1,023	1,772	1,188	1,693
4	-	2,282	0,729	1,457	0,795	2,059
5	-	2,114	0,577	1,29	0,691	2,326
6	-	2,004	0,483	1,184	0,549	2,534
7	0,076	1,924	0,419	1,109	0,508	2,704
8	0,136	1,864	0,373	1,054	0,432	2,847
9	0,184	1,816	0,337	1,01	0,412	2,97
10	0,223	1,777	0,308	0,975	0,362	3,078

Fonte: CEP 2ª Edição, 2005.

Tabela 15: Valor de E2, D3 e D4 para Gráficos em S

GRÁFICOS BASEADOS EM S					
Tamanho da amostra	Gráfico S		Gráfico \bar{X}	Gráfico X	Estimativa de σ
	B ₃	B ₄	A ₃	E ₃	c ₄
n					
2	-	3,267	2,659	3,76	0,7979
3	-	2,568	1,954	3,385	0,8862
4	-	2,266	1,628	3,256	0,9213
5	-	2,089	1,427	3,192	0,94
6	0,03	1,97	1,287	3,153	0,9515
7	0,118	1,882	1,182	3,127	0,9594
8	0,185	1,815	1,099	3,109	0,965
9	0,239	1,761	1,032	3,095	0,9693
10	0,284	1,716	0,975	3,084	0,9727

Fonte: CEP 2ª Edição, 2005.

ANEXO B – TABELA T STUDENT

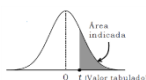


Tabela 16: Valores tabelados para t-Student

gl	Área da Cauda Superior								
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
z	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

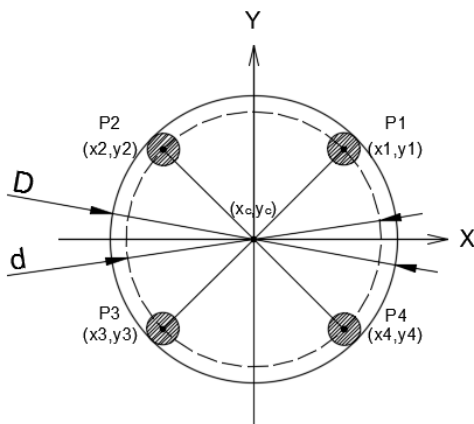
Fonte: CEP 2ª Edição, 2005.

ANEXO C – CÁLCULO DO DIÂMETRO DA ESFERA CONFORME O PROGRAMA DO CENTO DE USINAGEM

A sub-rotina de medição de diâmetros dá a opção para o programador informar o primeiro ângulo no plano XY, onde o ponto P1, figura 46, será tocado. Caso o ângulo não seja informado, o programa assume o valor zero. Para a medição dos próximos três pontos o programa soma automaticamente 90° ao primeiro ângulo informado.

Figura 46: Rotina de Apalpação

Figura 46: Rotina de Apalpação



Fonte: A Autora (2017)

O cálculo do diâmetro segue a lógica conforme os passos a seguir.

- a) Cálculo do ponto médio entre os pontos 1 e 2; 2 e 3; 3 e 4; 4 e 1.

$$x_5 = \frac{x_1 + x_2}{2}; x_6 = \frac{x_2 + x_3}{2}; x_7 = \frac{x_3 + x_4}{2}; x_8 = \frac{x_4 + x_1}{2}$$

$$y_5 = \frac{y_1+y_2}{2}; y_6 = \frac{y_2+y_3}{2}; y_7 = \frac{y_2+y_3}{2}; x_8 = \frac{y_4+y_1}{2}$$

- b) Cálculo do coeficiente angular de cada segmento de reta entre os pontos 1 e 2; 2 e 3; 3 e 4; 4 e 1.

$$m_{1,2} = \frac{x_1+x_2}{y_1+y_2}; m_{2,3} = \frac{x_2+x_3}{y_2+y_3}; m_{3,4} = \frac{x_3+x_4}{y_2+y_3}; m_{4,1} = \frac{x_4+x_1}{y_4+y_1}$$

- c) Transformação do coeficiente angular em seu correspondente perpendicular.

$$n_{1,2} = -\frac{1}{m_{1,2}}; n_{2,3} = -\frac{1}{m_{2,3}}$$

$$n_{3,4} = -\frac{1}{m_{3,4}}; n_{4,1} = -\frac{1}{m_{4,1}}$$

- d) Cálculo do centro em X para uma circunferência definida entre 3 pontos, 4 vezes cada (4 combinações possíveis)

Combinação entre P1P2 E P2P3:

$$J_1 = \frac{(y_5-y_6-n_{1,2}x_5+n_{2,3}x_6)}{(n_{2,3}-n_{1,2})}$$

Combinação entre P2P3 e P3P4:

$$J_3 = \frac{(y_6-y_7-n_{2,3}x_6+n_{3,4}x_7)}{(n_{3,4}-n_{2,3})}$$

Combinação entre P3P4 e P4P1:

$$J_5 = \frac{(y_7 - y_8 - n_{3,4}x_7 + n_{4,1}x_8)}{(n_{4,1} - n_{3,4})}$$

Combinação entre P4P1 e P1P2:

$$J_7 = \frac{(y_8 - y_5 - n_{4,1}x_8 + n_{1,2}x_5)}{(n_{1,2} - n_{4,1})}$$

- e) Cálculo do centro em Y para as combinações feitas em X.

Combinação entre P1P2 e P2P3:

$$J_2 = y_5 - n_{1,2}(x_5 - J_1)$$

Combinação entre P2P3 e P3P4:

$$J_4 = y_6 - n_{2,3}(x_6 - J_2)$$

Combinação entre P3P4 e P4P1:

$$J_6 = y_7 - n_{3,2}(x_7 - J_3)$$

Combinação entre P4P1 e P1P2:

$$J_8 = y_8 - n_{4,1}(x_8 - J_4)$$

- f) Cálculo do diâmetro entre as combinações.

Combinação entre P1P2 e P2P3:

$$K_1 = 2\sqrt{(J_1 - x_1)^2 + (J_2 - y_1)^2}$$

Combinação entre P2P3 e P3P4:

$$K_2 = 2\sqrt{(J_3 - x_2)^2 + (J_4 - y_2)^2}$$

Combinação entre P3P4 e P4P1:

$$K_3 = 2\sqrt{(J_5 - x_3)^2 + (J_6 - y_3)^2}$$

Combinação entre P4P1 e P1P2:

$$K_4 = 2\sqrt{(J_7 - x_4)^2 + (J_8 - y_4)^2}$$

Assim, o centro do diâmetro é localizado em:

$$x_c = \frac{(J_1 + J_3 + J_5 + J_7)}{4}; y_c = \frac{(J_2 + J_4 + J_6 + J_8)}{4}$$

O diâmetro d da figura 46 fica: $d = \frac{(K_1 + K_2 + K_3 + K_4)}{4}$

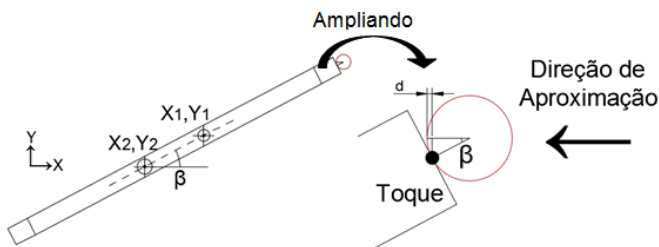
O Diâmetro D do furo medido fica: $D = d + 2r + T$

Onde r é o raio da esfera do apalpador e T é o valor da compensação do toque. O valor de T pode ser obtido por meio da medição de um anela padrão. A compensação T será diferença entre o valor obtido pelo apalpador ($d + 2r$) e o valor do diâmetro do anel padrão.

ANEXO D – VERIFICAÇÃO DA INCLINAÇÃO DA PEÇA PADRÃO

Da mesma forma como para o eixo Z, a peça pode ainda estar rotacionada em relação ao eixo Y. Assim, a mesma análise foi realizada para este eixo. A figura 47 mostra a rotação exagerada para facilitar entendimento.

Figura 47: Rotação da Peça Padrão em Relação ao Eixo Y



Fonte: A Autora (2017)

Também com auxílio de trigonometria, calculou-se o ângulo β e, com o raio do apalpador de 3 mm, a distância d .

A partir dos valores obtidos com o apalpador, têm-se os valores conforme a tabela 14.

Tabela 17: Resultado de Medição para Pontos 1 e 2 da Figura 47

X1 (mm)	-0,094	Y1 (mm)	-0,009
X2 (mm)	-91,359	Y2 (mm)	-0,274
X1-X2 (mm)	91,265	Y1-Y2 (mm)	0,264

Fonte: A Autora (2017)

Com os resultados da tabela 14, calcularam-se as variáveis conforme segue:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \quad (22)$$

$$\operatorname{tg}\beta = 0,0029$$

$$\beta = \operatorname{arctg} 0,0029$$

$$\beta = 0,166$$

$$\cos\beta = \frac{(3-d)}{3} \quad (23)$$

$$d = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

Da mesma forma como na análise anterior, é possível verificar que o valor de d é de baixa magnitude. Dessa forma, pode-se dizer que a peça não está inclinada o suficiente para impactar o resultado de medição.

