

METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DOS DESVIOS GEOMÉTRICOS EM MÁQUINAS-FERRAMENTA ATRAVÉS DO PRODUTO ACABADO

Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br¹
Breno Ferreira Lizardo, brenodiv@yahoo.com.br²
Bruno Lopes Pinheiro, lussivo@gmail.com¹
Juan Campos Rubio, juan@ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Usinagem e Automação, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

Resumo: As máquinas-ferramenta utilizadas nos processos de fabricação por usinagem são elementos-chave na obtenção de níveis elevados de precisão dimensional e acabamento superficial. O desempenho de uma máquina-ferramenta pode ser caracterizado através da proximidade entre o deslocamento relativo ferramenta-peça atingido e o movimento inicialmente planejado. Este trabalho apresenta os resultados obtidos na análise dos desvios geométricos de um centro de usinagem através da avaliação das superfícies por ele fresadas numa máquina de medir por coordenadas. Aspectos como precisão dimensional e geométrica, acabamento superficial e precisão cinemática serão avaliados. Desta forma pode-se afirmar que este tipo de metodologia apresenta uma visão clara e direta do limite de desempenho de uma máquina-ferramenta.

Palavras-chave: Máquina-ferramenta, desvios geométricos, produto acabado, metodologia experimental, fresamento

1. INTRODUÇÃO

Numa sociedade em que a qualidade dos produtos, o custo e o ciclo de vida são pré-requisitos para o sucesso, deve-se garantir que o produto final esteja de acordo com as geometrias especificadas e respectivas tolerâncias, com o menor tempo de fabricação possível e com o menor índice de re-trabalho.

Com a evolução das máquinas-ferramenta (MF) e com o desenvolvimento de novas ferramentas de corte, obteve-se um avanço significativo no processo de usinagem, porém, ainda assim, é impossível a obtenção de superfícies perfeitamente exatas. Logo, deve-se obedecer a um limite de tolerâncias. O aparecimento de peças fora destes limites de tolerâncias é proveniente de: falhas no processo de usinagem ou nos procedimentos/instrumentos de medição.

O erro de forma é definido como sendo a diferença entre uma superfície real e a sua forma geométrica teórica. Estes erros geralmente são, em sua grande maioria, provenientes de vibrações, defeitos em mancais/eixos árvores, desalinhamentos, desgastes de uniões/elementos estruturais, expansões térmicas, erros de posicionamento, deflexão de ferramenta e cargas estáticas e dinâmicas aplicadas durante o processo.

Geralmente, utiliza-se Sistema Laser Interferômetro como padrão para calibração de máquinas-ferramenta. Chen et al (2001) propõe inclusive um sistema auto-alinhante para um centro CNC, visando a redução do tempo gasto pelo método convencional, que pode levar dias. Knapp (1983) propõe um teste circular que consiste no alinhamento de um círculo em diferentes planos. Bryan (1982) desenvolveu uma barra telescópica em forma de bola para a obtenção dos erros de uma MF. Autores, como por exemplo, Ramesh et al., (2000), propõe sistemas para a compensação dos erros.

O atual trabalho propõe a utilização do produto acabado para uma determinação rápida dos erros geométricos e de posicionamento de uma MF. A metodologia, basicamente, trata da usinagem de um bloco nas direções X e Y para a avaliação da variação do eixo Z com os respectivos eixos X e Y. Posteriormente, são usinadas 06 cavidades circulares para a avaliação dos erros de posicionamento e da variação do eixo X com Y.

A máquina ferramenta, utilizada para o experimento, foi um centro de usinagem ROMI DISCOVERY 560 e para a medição do produto acabado utilizou-se uma máquina de medir por coordenada TESA MICRO-HITE-3D.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão dos fundamentos aplicados, propõe-se uma rápida revisão a respeito dos principais aspectos referentes aos desvios geométricos.

2.1. Erros no produto final

Um erro de forma corresponde à diferença entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica. Os erros podem ser divididos em erros de forma e em erros de posição, sendo que a forma de um elemento será correta quando cada um dos seus pontos for igual ou inferior ao valor da tolerância estipulada. A diferença de forma deve ser medida perpendicularmente à forma geométrica teórica, tomando-se cuidado para que a peça esteja apoiada corretamente no dispositivo de inspeção, evitando a obtenção de um falso valor.

Segundo Okafor et Etekin (2000), para uma máquina ferramenta, existem três fontes principais para os erros, sendo elas: (1) erros devido aos erros geométricos, (2) erros provenientes de efeitos térmicos e (3) erros devido a forças. Os erros geométricos são provenientes de imperfeições mecânicas nas estruturas das máquinas-ferramenta e de desalinhamentos dos componentes, sendo o desgaste um elemento crucial. Como resultado obtém-se falta de paralelismos e de perpendicularismos nos movimentos dos diversos componentes, ocasionando erros de posição e forma. A Figura (1) apresenta um exemplo de desvios geométricos observados em MF (Porto et al, 2004).

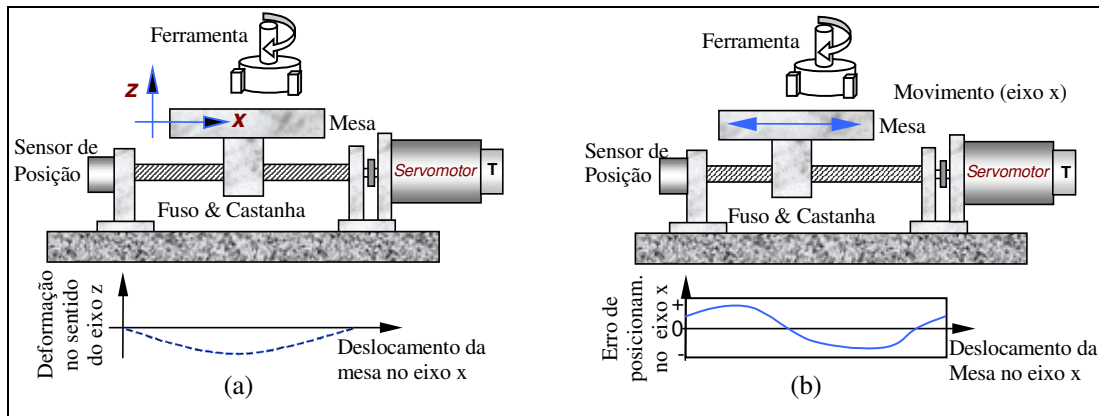


Figura 1. Correção do erro em posicionadores (Porto et al., 2004).

Tanto no trabalho de Chen et al (2001) e de Okafor et Etekin (2000), é citado que ao todo são possíveis 21 erros geométricos em um centro de usinagem vertical de três (3) eixos, os mesmos encontram-se na Tabela (1).

Tabela 1. Erros geométricos em um centro de usinagem vertical de 3 eixos.

Tipo de erro	Número de erros
Erros lineares de posição (erros de escala)	3
Erros de retilinearidade	6
Erros Angulares	9
Erros de ortogonalidade dos eixos da Máquina-ferramenta (Perpendicularidade)	3
TOTAL	21

Okafor et Etekin (2000) apresentaram em seu estudo uma ilustração dos seis erros possíveis durante a movimentação ao longo do eixo X. Tal ilustração pode ser vista na Figura (2).

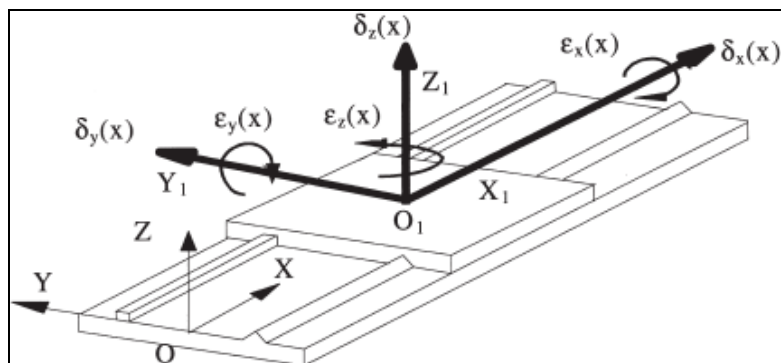


Figura 2. Erros dependentes da movimentação ao longo do eixo X - Okafor et Etekin (2000)

Os erros provenientes de fatores térmicos podem ter a sua origem nas mudanças na temperatura ambiente, fontes de calor (ex. calor proveniente de um motor elétrico ou atritos) e calor gerado no processo de usinagem. A variação de temperatura causa expansão, contração e deformação na estrutura da máquina-ferramenta, gerando erros de posição relativos entre a peça e a ferramenta de corte.

Segundo Okator et Etekin (2000), existem basicamente três tipos de força atuando no processo de usinagem, sendo elas: peso da peça, forças resultantes do processo de corte e forças oriundas dos deslocamentos das massas dos diversos componentes da máquina-ferramenta, todas estas forças irão causar deformações elásticas na estrutura.

Ramesh et al (2000) em seu trabalho citam outras fontes para possíveis erros, entre elas: erros cinemáticos, erros provenientes da instabilidade do material, erros de instrumentação, desgaste da ferramenta de corte, erros de fixação e erros dos servo-posicionadores (erros de movimentação e de interpolação).

2.2. Acabamento Superficial

Segundo Field et al (1995), o acabamento superficial está relacionado apenas com as irregularidades geométricas superficiais de materiais sólidos e também com as características dos instrumentos de medição. O acabamento superficial é definido em termos da rugosidade, ondulação, direção predominante das irregularidades e falhas. A medição da rugosidade tem sido tradicionalmente um dos principais métodos de verificação da qualidade superficial da peça. A rugosidade superficial consiste de irregularidades na superfície, geralmente inerentes ao processo de fabricação, tais como marcas de avanço produzidas durante a usinagem.

Irregularidades geométricas, tais como rugosidade e ondulações, podem ser medidas por uma variedade de instrumentos de medição incluindo os tipos de contato e sem contato. A técnica mais comum é medir a rugosidade com instrumentos de contato que fornecem valores numéricos de R_a , R_t e R_z , entre outros.

A rugosidade média, denominada R_a , é possivelmente o mais antigo conceito de rugosidade ainda em uso. Sua disseminação pode ser atribuída à facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples. Sua definição pode ser expressa como o desvio médio de um perfil de sua linha média. Outra boa definição seria a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento medido.

A rugosidade total R_t , ou rugosidade máxima é dada pela diferença entre o pico mais alto e a depressão mais baixa no comprimento considerado. Podendo ser um bom indicador da ocorrência de falhas no processo de fabricação.

O parâmetro R_z é definido com sendo a distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos, dentro de um comprimento medido.

O parâmetro R_z fornece uma idéia mais clara para a monitoração da variação do acabamento superficial em um processo de fabricação. A média das distâncias verticais (R_z) pode ser considerada como sendo um parâmetro mais sensível à mudança no acabamento superficial em relação à R_a , isso se deve ao fato de que somente as alturas máximas de perfis, e não suas médias, são comparadas e analisadas.

2.3. Erros no fresamento de cavidades

Segundo Pinheiro et al (2005), os principais parâmetros que influenciam os erros de uma usinagem de topo são: deflexões da MF e da ferramenta, erros de posicionamento, efeitos térmicos e parâmetros de corte. A deflexão da ferramenta pode ser estimada como sendo uma função das características geométricas da ferramenta e das forças de corte atuantes. Para o fresamento de topo, a fim de cálculos, pode-se considerar a ferramenta como uma viga engastada. Para atingir melhores resultados, deve-se utilizar fresas com maiores momentos de inércia, mais curtas e uma redução das forças de corte. Por esta razão, optou-se pela utilização do alumínio no atual trabalho. Segundo Mitisubishi (2007), para um avanço de 0,1mm/dente, a força de corte do alumínio é de aproximadamente um terço, quando comparada com a do aço.

Law et al (1999) afirmaram que o fator que mais influencia os desvios dimensionais é a deflexão da ferramenta. Nota-se portando a importância da escolha dos parâmetros de corte que minimizem as forças aplicadas e, conseqüentemente, a deflexão.

Pinheiro et al (2005) chegaram à conclusão de que os melhores resultados são obtidos quando se utiliza maiores velocidades de corte, menores profundidades de corte, fresamento discordante e fluído de corte. É importante ressaltar que estas condições forma adotadas no presente trabalho.

2.4. Erro de Posicionamento

O erro de posicionamento é definido como sendo o desvio entre a posição real e teórica de um determinado elemento. Remesh et al (2000) afirmam que o erro de posicionamento de uma MF depende muito do seu projeto e da sua construção. Os diversos movimentos entre as partes móveis da MF também irão contribuir, sendo que os mesmos podem gerar tanto erros aleatórios quanto sistemáticos. Alguns fatores que afetam a máquina ferramenta são: rugosidade e dureza superficiais das peças responsáveis pelas movimentações dos eixos, paralelismos, perpendicularismos e pré-cargas em rolamentos.

Os erros cinemáticos também são consideráveis, uma vez que, todas as movimentações envolvem acelerações e, conseqüentemente, forças, sendo estas responsáveis por erros nos posicionamentos/interpolações.

Os componentes de controle dos atuadores dos eixos também irão influenciar os erros de posicionamento, sendo uma maior precisão dos mesmos, fundamental para assegurar um menor erro de posicionamento.

2.5. Ajuste (otimização)

Otimizar significa buscar a melhor solução para um determinado problema. Existem muitos métodos de otimização e cada um deles alcançam resultado otimizados em determinados tipos de problemas. A escolha do método depende de uma série de características do problema a ser otimizado, principalmente do comportamento da função que o representa. Neste trabalho os pontos coletados serão ajustados para se obter a melhor equação que possa representá-los. Espera-se que três tipos de ajustes sejam efetuados, reta, plano e círculo, representando respectivamente, perfil das superfícies usinadas, mesa da máquina de medir por coordenada e cavidades circulares.

Para o presente trabalho, foi escolhido o método dos mínimos quadrados, pois o objetivo é de encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados de tal modo que a soma dos quadrados das distâncias entre a curva ajustada e cada um dos pontos dados seja a menor possível. Estas diferenças entre a curva ajustada e cada um dos dados são denominados resíduos. Um bom motivo para se minimizar a soma dos quadrados dos resíduos ao invés de se minimizar a soma dos resíduos é o fato de que a função módulo não é diferenciável na origem e serão usadas derivadas para resolver os problemas de mínimos quadrados não-lineares.

No caso do ajuste circular é usado um método de otimização dos mínimos quadrados proposto por Levenberg–Marquardt. O método Levenberg–Marquardt é um método iterativo. Deste modo, dado um ponto inicial, o método produz um novo ponto a ser recalculado e assim espera-se que vá convergir para um valor mínimo local para a função de entrada a ser ajustada.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A seguir, descreve-se os principais pontos da metodologia aplicada para a usinagem. O centro de usinagem utilizado foi um Discovery 560 do fabricante ROMI.

3.1. Medição de Rugosidade

As medições de rugosidade foram feitas com um rugosímetro Mitutoyo SurfTest 301, sendo o cut-off de 0,25mm e com 5 medições. Ao todo foram feitas 40 medições, sendo 10 medições em cada face usinada.

3.2. Preparação do corpo de prova

Inicialmente foi feito um desbaste de 0,5 mm em todos os quatro lados do tarugo de alumínio, visando a eliminação de qualquer imperfeição residual do processo de fabricação do mesmo.

3.3. Fresamento ao longo do eixo X e posteriormente do eixo Y

Para a avaliação dos erros de forma, foi feito inicialmente um fresamento ao longo do eixo X e posteriormente ao longo do eixo Y, para desta forma reproduzir o erro apresentado na Figura 1 (a). Os parâmetros de corte utilizados foram: $V_c=400\text{m/min}$, $f=0,1\text{mm/rot/aresta}$, $a_p=0,5\text{mm}$, $a_e=17\text{mm}$, fresamento discordante e utilização de fluido de corte, estes valores foram obtidos do catálogo da Mitsubishi (2007), os parâmetros de corte foram cuidadosamente escolhida para evitar a formação de arestas postizas de corte e para estarem em conformidade com as observações feitas no trabalho de Pinheiro et al (2005). A fresa utilizada foi a ASX445-050A03R, com 03 insertos, sendo 02 insertos com quebra-cavaco SEGT13T3AGFN-JP e 01 inserto alisador WEEW13T3AGER8C. A MITSUBISHI é a fabricante tanto dos insertos, como da fresa, ver Figura (3). Esta fresa apresenta um ângulo de posição de 45° e ângulo de saída positivo de aproximadamente 20° . Os 04 lados do tarugo foram usinados, sendo 02 ao longo do eixo X e 02, do eixo Y (Figura 3).

3.4. Medição de erros de forma

Após o fresamento, foram feitas várias medições em uma máquina de medir por coordenadas, TESA MICRO-HITE-3D, a fim de verificar quais seriam os erros de forma obtidos após o fresamento das direções X e Y. Este equipamento apresenta uma repetibilidade de $3\mu\text{m}$. Seguindo os princípios apresentados por Nakazawa (1994), as medições foram feitas através de toques na direção Z, uma vez que desta forma, respeita-se o princípio de Abbe, reduzindo os possíveis erros de medição.

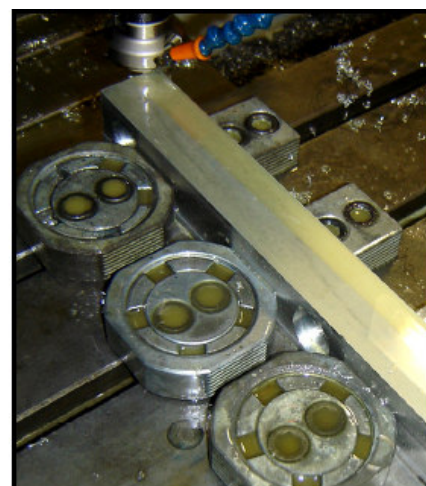


Figura 3. Fresa Mitsubishi ASX445-050A03R (esq) e o fresamento ao longo do eixo Y (dir)

3.5. Fresamento de cavidades circulares

Utilizando a sub-rotina parametrizada do comando numérico SIEMENS 810D para a abertura de cavidades circulares (POCKET 4), foram fresadas 06 cavidades, sendo 03 em cada lado do corpo de prova, ao longo do eixo X. Com tal experimento, procura-se testar o erro de posição entre as cavidades e o resultado final adquirido através do programa POCKET4 do centro de usinagem DISCOVERY560. Os parâmetros utilizados no POCKET4 foram (5; 0; 3; -7; X; Y; 25.5; 0.5; 0;0; 0.2; 0.05; 3; 22; 5; 16; 6; 5; 0.5), sendo a distância entre as cavidades de 210mm.

Para a usinagem destas cavidades, foi utilizada uma fresa de aço rápido, com 33mm de comprimento, 15mm de diâmetro e quatro (4) arestas de corte. A velocidade de corte utilizada foi de 200m/min. Como descrito anteriormente, na rotina POCKET4, o avanço utilizado foi de 0,2mm/rot.

3.6. Medição das cavidades

Após o fresamento das cavidades circulares, foram feitas várias medições em uma máquina de medir por coordenadas (MMC), TESA MICRO-HITE-3D (Figura (4)).

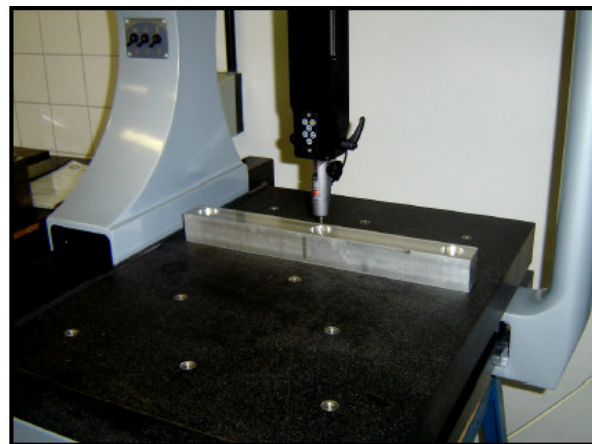
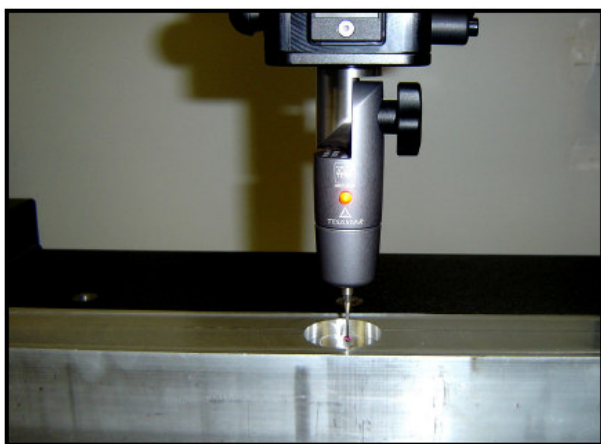


Figura 4. Medição das cavidades circulares na Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) Tesa Micro Hite 3D

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados medidos ao longo dos testes encontram-se a seguir.

4.1. Rugosidade Superficial

Os resultados para a rugosidade superficial foram os seguintes:

Para o eixo X, considerando um intervalo de confiança de 95%, obteve-se para o lado A: $R_a=(0,16\pm0,02)\mu\text{m}$, $R_t=(1,1\pm0,1)\mu\text{m}$ e $R_z=(0,7\pm0,1)\mu\text{m}$, já para o lado B: $R_a=(0,14\pm0,01)\mu\text{m}$, $R_t=(1,0\pm0,2)\mu\text{m}$ e $R_z=(0,6\pm0,1)\mu\text{m}$.

Para o eixo Y, considerando um intervalo de confiança de 95%, obteve-se para o lado A, $R_a=(0,15\pm0,02)\mu\text{m}$, $R_t=(1,1\pm0,1)\mu\text{m}$ e $R_z=(0,7\pm0,1)\mu\text{m}$, já para o lado B: $R_a=(0,12\pm0,01)\mu\text{m}$, $R_t=(0,9\pm0,1)\mu\text{m}$ e $R_z=(0,5\pm0,1)\mu\text{m}$.

De posse destes valores, fica evidente que o acabamento superficial do produto final não apresenta nenhuma influência nos valores medidos durante a avaliação dos erros de forma ou posição, ou seja, a rugosidade pode ser desconsiderada.

4.2. Erros de forma

As medições do eixo Z ao longo dos eixos X e Y possibilitaram o levantamento dos perfis Z versus X e Z versus Y para os dois lados usinados. Com isto, pode-se avaliar os erros de forma gerados pela máquina ferramenta. A Figura (5) mostra a variação encontrada no eixo Z ao longo do eixo X. Torna-se evidente que à medida que a fresa tende a usinar próximo a valores mais elevados de X, os valores de Z passam a serem maiores. É importante ressaltar, que o melhor resultado possível seria um valor de Z constante para qualquer valor experimentado por X.

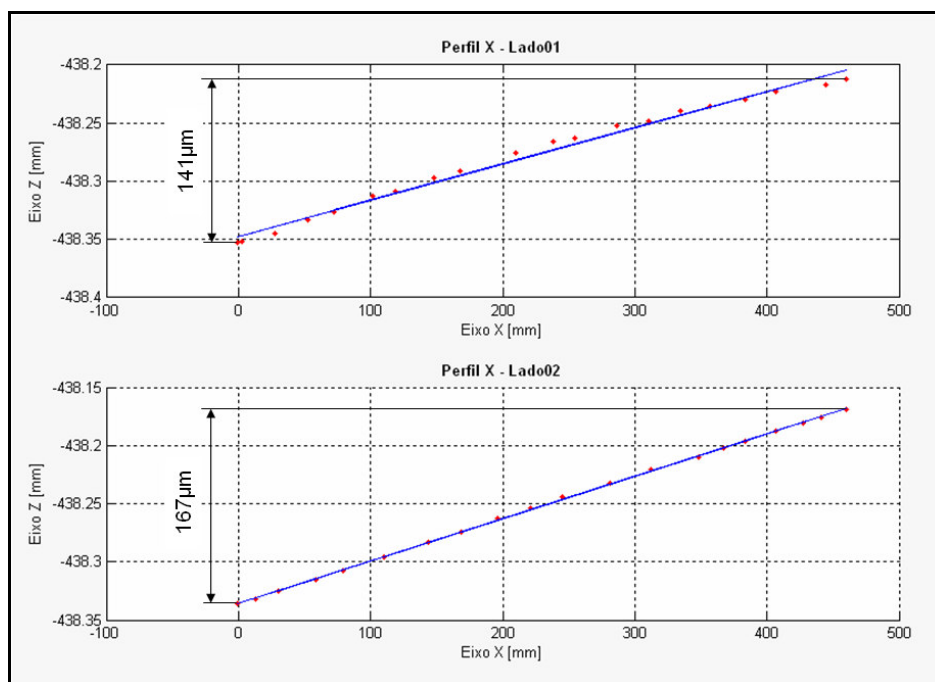


Figura 5. Z versus X para os lados 01 e 02

Na Figura (6) é possível observar a variação do eixo Z em função do eixo Y, sendo evidente que para maiores valores do eixo Y, o eixo Z assume valores menores.

A partir dos dados obtidos do mapeamento da variação do eixo Z com os eixos X e Y, é possível a obtenção do perfil e da sua equação de reta. Sabe-se que a equação da reta é dada pela Equação (1).

$$Y = A \times X + B \tag{1}$$

A Tabela(2) mostra os coeficientes de cada reta, sendo que a inclinação de cada reta foi convertida em ângulo pela Equação (2) e a média, o desvio padrão, o valor máximo e mínimo foram calculados com os 20 pontos coletados.

$$\theta = \text{ArcTg}(A) \tag{2}$$

Tabela 2. Coeficientes das retas.

	A (mm)	B (mm)	θ (s)	Média (mm)	Desvio P. (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Máx - Min (mm)	n ^o pontos
Xlado01_linha01	0,0003	-438,3473	64,2120	-438,2791	0,0471	-438,212	-438,353	0,141	20
Xlado01_linha02	0,0003	-438,2453	61,9380	-438,1781	0,0435	-438,113	-438,251	0,138	20
Xlado02_linha02	0,0004	-438,3357	75,0960	-438,2502	0,0562	-438,169	-438,336	0,167	20
Ylado01_linha01	-0,0002	-438,2009	-45,1560	-438,2591	0,0257	-438,228	-438,307	0,079	20
Ylado01_linha02	-0,0002	-438,1567	-43,7220	-438,2141	0,0242	-438,185	-438,259	0,074	20
Ylado02_linha01	-0,0001	-438,1691	-29,9520	-438,2096	0,0158	-438,186	-438,234	0,048	20
Ylado02_linha02	-0,0001	-438,2128	-27,9804	-438,2524	0,0144	-438,226	-438,273	0,047	20

A mesa da MMC foi aferida com o objetivo de descartar influencias do processo de medição no resultado obtido. Na Tabela (3) é possível observar os valores medidos para o eixo Z ao longo dos eixos X e Y da mesa da MCC, sem o produto acabado, ficando evidente que a variação do eixo Z é muito menor quando comparada com as medidas do

produto acabado. Observa-se que o plano normal ao eixo Z assume um valor muito próximo da unidade, vide Tabela (4). Ao todo foram feitas 70 medições.

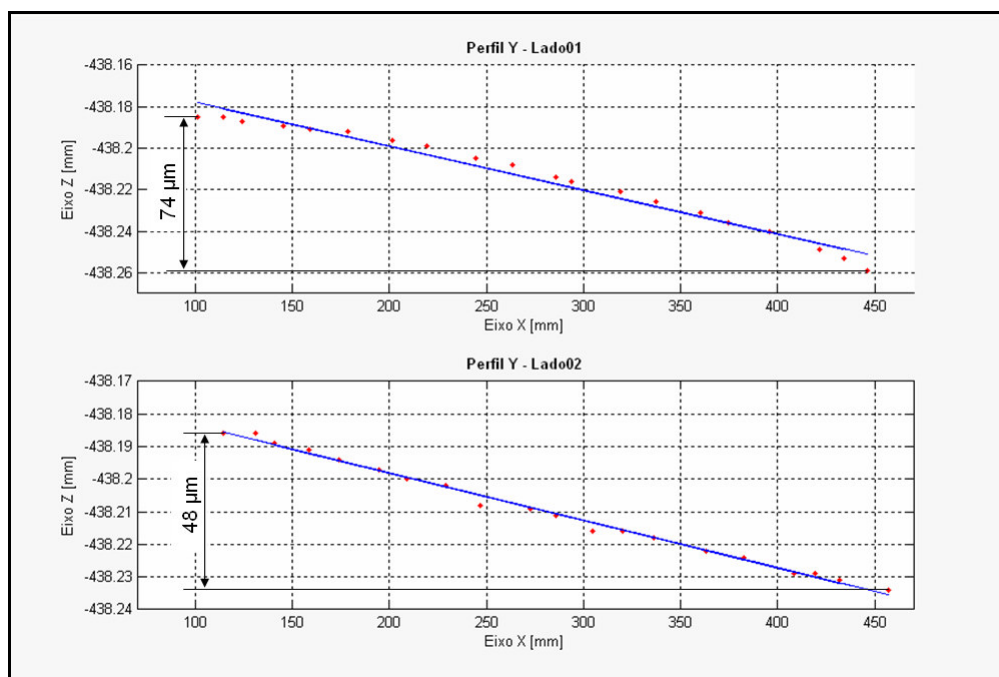


Figura 6. Z versus Y para os lados 01 e 02.

Tabela 3. Valores obtidos para a mesa da MCC.

Média (mm)	Desvio P. (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Máx - Min (mm)	nº pontos
-487,2603	0,0050	-487,2490	-487,2690	0,0200	70

Tabela 4. Direção do Plano Normal à mesa da MCC.

Direção normal do plano		Centroide do plano	
X	-0,000020686532157	X	247,1712
Y	-0,000018277098571	Y	281,6474
Z	0,99999999619007	Z	-487,2603

4.3. Erros no fresamento de cavidades

Para as seis cavidades usinadas foi calculado: o centro (X_c, Y_c), o raio (r) e o erro dos pontos coletados em relação ao modelo ajustado (E). O erro é dado pela Equação (3). A variável R corresponde à distância do ponto coletado (PC) ao centro do ajuste (X_c, Y_c), vide Equação (4). O somatório do erro mostra se o ajuste possui alguma tendência em relação aos pontos coletados e o somatório absoluto é um parâmetro de comparação entre os ajustes. Os valores obtidos encontram-se na Tabela (5).

$$E = R - r \tag{3}$$

$$R = \sqrt{(PCx - X_c)^2 + (PCy - Y_c)^2} \tag{4}$$

Tabela 3. Medições das Cavidades Cilíndricas.

	X_c (mm)	Y_c (mm)	r (mm)	ΣE (mm)	$\Sigma abs(E)$ (mm)	nº pontos
Cavidade 01	24,3965	341,4583	17,3029	2,52E-05	5,5204	20
Cavidade 02	234,2845	340,6150	17,2426	1,07E-04	5,1467	20
Cavidade 03	444,3697	340,5522	17,2495	7,89E-04	6,4393	20
Cavidade 04	441,9394	340,5267	17,3099	3,25E-06	5,4377	20
Cavidade 05	231,8244	340,7773	17,3172	1,70E-03	4,0676	20
Cavidade 06	21,8440	341,3180	17,3932	6,53E-05	2,9774	20

Na Figura (7), observar-se claramente os 20 pontos medidos e a interpolação circular que representa o melhor ajuste para esta cavidade.

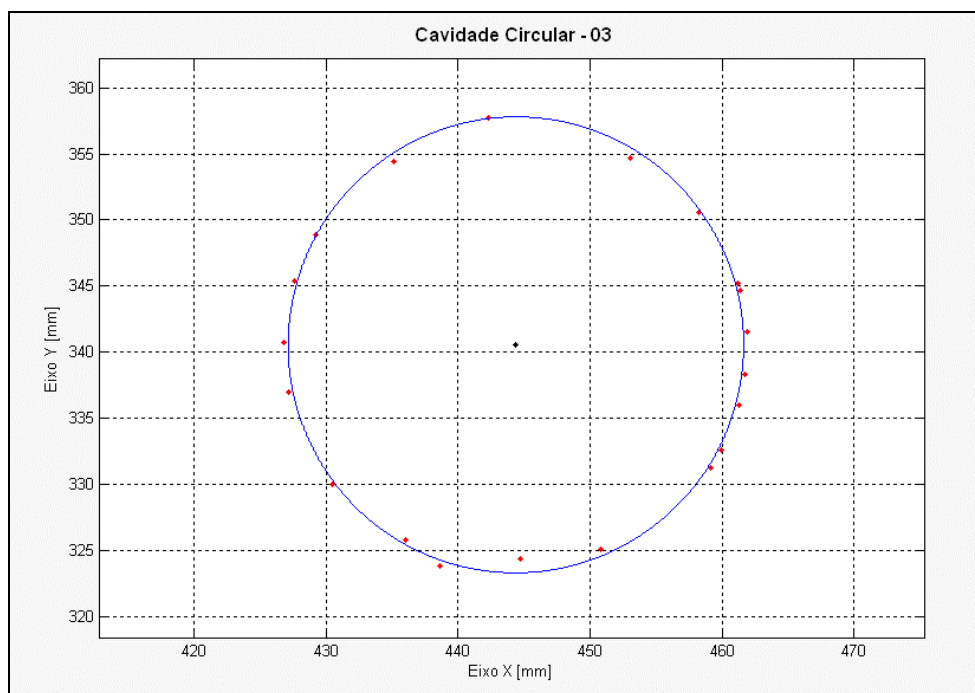


Figura 7. Pontos obtidos na medição da Cavidade Fresada através da MMC.

4.4. Erros no posicionamento das cavidades

O programa para o fresamento das seis cavidades contemplava uma distância entre centros de 210mm. As distâncias medidas entre as cavidades estão nas Figura 8 e Figura 9. As diferenças entre as distâncias reais e planejadas entre as cavidades podem ser observadas na Tabela 6.

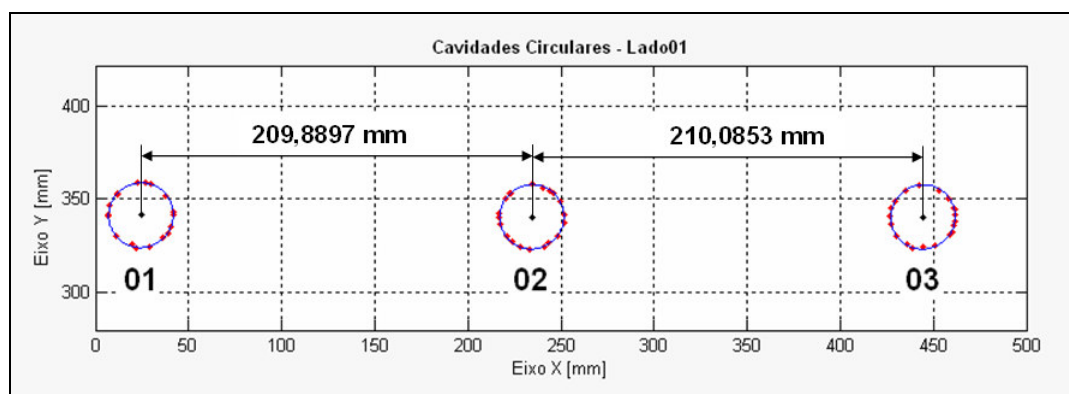


Figura 8. Posicionamento das Cavidades - Lado A.

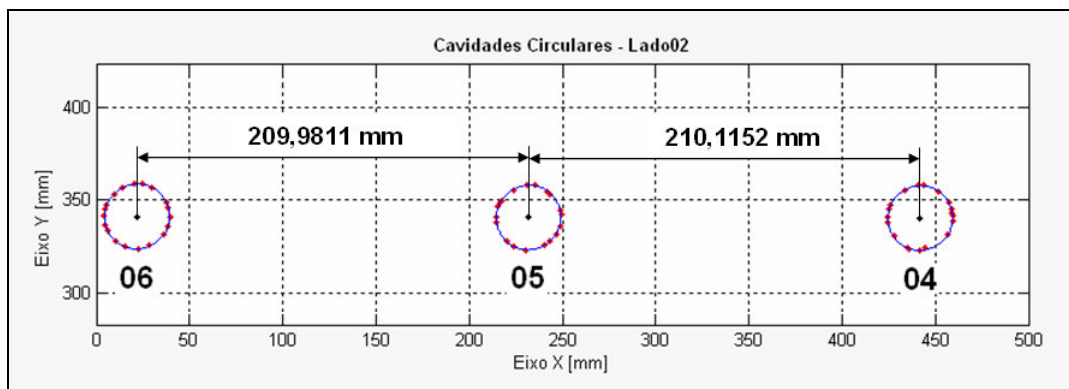


Figura 9. Posicionamento das Cavidades - Lado B.

Tabela 6. Diferença entre as distâncias reais e planejadas.

Lado 01		Lado 02	
Cavidade 01 para 02 (μm)	Cavidade 02 para 03 (μm)	Cavidade 04 para 05 (μm)	Cavidade 05 para 06 (μm)
-110,3	+85,3	+115,2	-18,9

5. CONCLUSÕES

Os diversos erros apresentados no produto final são de suma importância para a avaliação da Máquina-ferramenta (MF). Através das medições, foi possível constatar erros de forma e de posição.

A máquina-ferramenta avaliada apresentou variações de $167\mu\text{m}$ e $141\mu\text{m}$ no eixo Z ao longo do eixo X e de $48\mu\text{m}$ e $74\mu\text{m}$ para o eixo Z ao longo do eixo Y. Fica evidente que a MF em questão apresenta problemas de paralelismo, dificultando a obtenção de produtos dentro das especificações do cliente.

Os valores de rugosidade obtidos foram muito baixos, evidenciando a alta qualidade superficial do produto final, assim como que o acabamento superficial não afetou a medição dos erros em estudo.

Em função da precisão cinemática limitada, não é possível obter cavidades cilíndricas sem erro de forma. Todas as cavidades usinadas apresentaram um diâmetro final menor do que o pretendido (35mm). A cavidade que mais se aproximou desta medida foi a sexta (06), apresentando um diâmetro interno de $34,786\text{mm}$. Verificando a posição espacial do eixo X pode-se concluir que na região próxima do início da coordenada X a máquina apresenta menores erros de seguimento.

Em nenhum dos casos conseguiu-se obter uma distância entre cavidades de 210mm , evidenciando que a MF também apresenta problemas de posicionamento. O melhor resultado foi obtido entre as cavidades 05 e 06, com um erro de $18,9\mu\text{m}$.

Através desta avaliação dos desvios geométricos, pode-se criar padrões que apontem quais são os limites máximos toleráveis, possibilitando à empresa uma rápida decisão a respeito da viabilidade do uso de determinada MF. Com isto, otimiza-se a inspeção da máquina-ferramenta e determina-se o melhor momento para a manutenção da mesma.

Este estudo também foi útil para ressaltar a importância do processo de correções durante a usinagem, uma vez que dificilmente um componente de maior precisão poderá ser fabricado sem ser levado em conta as condições das ferramentas, dos materiais e principalmente o desempenho do equipamento.

6. REFERÊNCIAS

Bryan, J.B., A simple method for testing measuring machines and machine tools. Part I: principles and applications, *Precision Engineering* 4 (1982) 61-69;

Chen, Guiquan; Yuan, Jingxia; Ni Jun, A displacement measurement approach for machine geometric error assessment, *Internacional Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 149-161;

Knapp, W., Circular test for three-coordinate measuring machines and machine tools, *Precision Engineering* 17 (1983) 115-124;

Law, K. M. Y., Geddam, A., Ostafiev, V.A., "A process-design approach to error compensation in the end milling of pockets", *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 89-90, p. 238-244;

Mitsubishi, Catálogo geral 2007, F021;

Nakazawa, Hiromu, *Principles of Precision Engineering*, Oxford University Press, 1994, p. 83-90;

Okafor, A.C.; Ertekin, Yalcin M., Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 1199-1213;

Pinheiro, B.L.; Abrão, A.M.; Lacerda, H.B.; Machado, A.R.; Dimensional and geometric deviations after milling H13 hot work die steel, *CIRP - 38th International Seminar on Manufacturing Systems*, 2005, Florianópolis - SC. CD-ROM of the 38th International Seminar on Manufacturing Systems, 2005. v. 1. p. 94-104;

Porto, A. Silva, H. Duduch, J. Campos Rubio, J. Montanari, L. Jacinevicius, R. Almeida R. Schroeter, R. *Usinagem de Ultraprecisão*. Rima Editora, São Carlos. 2004.

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* 40 (2000) 1235-1256.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL METHODOLOGY FOR GEOMETRIC DEVIATION ASSESSMENT IN MACHINE TOOLS USING THE FINISHED PART

Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br¹
Breno Ferreira Lizardo, brenodiv@yahoo.com.br²
Bruno Lopes Pinheiro, lussivo@gmail.com¹
Juan Campos Rubio, juan@ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Usinagem e Automação, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais – Brasil

Abstract: The machine tools are key elements required for the production of components within the required surface finish and tolerances. The machine tool performance can be characterized by the relationship between the real displacement of the tool and the planned movement. This paper presents the results obtained in the analysis of the finished part produced in a machining center using a coordinate measuring machine. Issues such as geometric and dimensional accuracy, surface finish and kinematics accuracy are addressed. This methodology presents a clear and direct boundary for the measurement of the performance of machine tools.

Keywords: *Machine tools, geometric deviations, finished product, experimental methodology, milling*