

INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DO SISTEMA MÁQUINA-FERRAMENTA- DISPOSITIVOS DE FIXAÇÃO-PEÇA NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO

Hidekasu Matsumoto¹

1 (autor para correspondência) Unesp/Ilha Solteira/Departamento de engenharia Mecânica. Avenida Brasil, 56 - 15.385-000 - Ilha Solteira/SP Brasil – Fone: 18 3743 1037; Fax: 18 3742 2992 - E-Mail: hidekasu@dem.feis.unesp.br

Amanda Cecília Simões da Silva²

2 Unesp/Ilha Solteira/Departamento de engenharia Mecânica. Avenida Brasil, 56 - 15.385-000 - Ilha Solteira/SP – Fone: 18 3743 1037; Fax: 18 3742 2992 - E-Mail: amanditasimoes@gmail.com

Resumo

Analisou-se a influência da rigidez estática do conjunto Máquina-ferramenta - Ferramenta de Corte - Dispositivos de Fixação - Peça (MFDP), no processo de torneamento. Para tanto, traçou-se o perfil de deflexão de uma peça de 25,4 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento, montada entre placa e ponto e submetida a diferentes forças estáticas. Aplicou-se forças de intensidade crescente em diferentes pontos da peça e mediu-se as respectivas deflexões, obtendo assim, o perfil teórico da peça. Usinou-se a mesma peça e mediu-se o diâmetro em vários pontos, obtendo assim, o perfil acabado da peça. Comparou-se o perfil teórico com o usinado e verificou-se que a deflexão ocorreu de forma semelhante nos dois casos, porém com valores diferentes, devido a diferentes fenômenos que atuaram durante a usinagem. Tanto no caso teórico (estático) como no prático, o diâmetro da peça ficou maior na extremidade fixada por contra-ponta e menor na extremidade fixada por placa de três castanhas, porém, ambas com dimensões maiores que o diâmetro nominal.

Palavras-chave: : Rigidez no torneamento, erros dimensionais no torneamento, erros geométricos no torneamento.

1. INTRODUÇÃO

Durante a usinagem de uma determinada peça, ocorre sempre um desvio dimensional e/ou geométrico em relação às indicações nominais do desenho. Vários são os fatores que influenciam na formação da peça, dentre os quais pode-se citar a falta de rigidez da máquina ferramenta, a fixação da peça no dispositivo de fixação, o desgaste da ferramenta de corte, a falta de estabilidade dinâmica (vibrações) das variações nas propriedades mecânicas do material a ser usinado, além de outros fatores que podem influenciar diretamente na qualidade final de uma peça usinada.

A rigidez de um sistema mecânico, que é a capacidade de resistir à ocorrência de deflexão elástica ou ainda, como sendo a relação entre a ação de uma força e a deflexão causada por esta força é um dos grandes responsáveis pela formação desses desvios dimensionais e geométricos na usinagem.

Para determinar os limites dos desvios e enquadrá-los em tolerâncias que não prejudiquem o funcionamento, montagem ou resistência da peça a ser usinada, é necessário conhecer a influência de cada fator causador de desvios, de maneira que seja possível prever aproximadamente o desvio final da peça real com relação às indicações nominais do desenho.

Recentemente, poucos autores têm pesquisado sobre os fatores que influenciam na formação dos desvios dimensionais e geométricos. As bibliografias disponíveis são bastante antigas, podendo-se destacar Kovan⁽¹⁾ que analisou os principais fatores causadores de erros e propôs uma equação com os valores obtidos experimentalmente em ensaios estáticos; Agostinho⁽²⁾ que abordou os aspectos da formação da tolerância através de um tratamento estático e Matsumoto⁽³⁾ que estudou a influência dos dispositivos de fixação nos erros de torneamento e propôs uma equação baseada na equação de Kovan.

Tendo em vista o que foi descrito, fica evidente a importância de se realizar um estudo dos principais fatores que influenciam na formação dos desvios dimensionais e geométricos. Em especial, analisar a influência da rigidez do conjunto Máquina/Ferramenta/Dispositivos de Fixação/Peça (MFDP) no processo de torneamento, por ser esta a grande responsável pela formação destes desvios.

2. OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a influência da rigidez estática do conjunto Máquina-ferramenta - Ferramenta de Corte - Dispositivos de Fixação - Peça (MFDP), no processo de torneamento, de uma peça montada entre placa e ponto, tendo em vista que este é um dos principais fatores que contribuem na formação dos desvios dimensionais e geométricos na usinagem de uma peça.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A rigidez total da máquina-ferramenta pode ser calculada com base na rigidez dos seus componentes, determinados experimentalmente. Assim, a rigidez dos componentes da máquina ferramenta são determinadas por uma aplicação progressiva de cargas, aumentando-se a sua magnitude do zero até um determinado valor.

Geometricamente, a rigidez (j) pode ser expressa pela Equação 1:

$$j = \frac{P}{y} \quad (1)$$

onde: j = rigidez [N/mm];

p = força atuante no sistema [N];

y = deflexão do sistema devido à ação da força p [mm].

As deflexões dos componentes da máquina são medidas, para cada carga, na direção normal à superfície usinada. Após as conceituações teóricas sobre a rigidez das unidades correspondentes do sistema MFDP, torna-se possível analisar a sua influência na variação provocada em uma característica. Com os resultados dos ensaios foi possível obter a rigidez estática dos componentes do conjunto.

O conjunto MFDP será dividido em duas partes, ou seja, componentes da máquina-ferramenta e da peça. A deflexão total será a soma das duas deflexões. As equações utilizadas neste trabalho foram propostas por Matsumoto⁽³⁾.

Para facilitar os cálculos, define-se a flexibilidade W [mm/N], como sendo a capacidade de um elemento do sistema MFD de mudar a posição relativa de pontos previamente selecionados no intervalo $[0, l]$, sob a ação de uma força aplicada, e na direção da linha de ação da força (Agostinho⁽²⁾), ou seja, é o inverso da rigidez do elemento, dada por:

$$w = \frac{1}{j} \quad (2)$$

onde: W = flexibilidade [mm/N];

Sendo Y_m a deflexão total das unidades da máquina em qualquer posição da ferramenta ao longo da peça, conforme a Equação 3:

$$Y_m = p \left[W_{pf} + W_c \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 + W_{cp} \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right] \quad (3)$$

onde: W_{pf} = flexibilidade do porta ferramenta [mm/N];

W_c = flexibilidade do cabeçote [mm/N];

W_{cp} = flexibilidade do contraponto [mm/N];

p = força atuante no sistema [N];

l = comprimento do eixo [mm];

A deflexão Y_p da peça sob a ação de uma ferramenta de corte, em qualquer posição x ao longo do seu eixo, para o método de fixação da peça sendo o contra ponto, pode ser como sendo uma viga engastada no lado da placa e apoiada no lado do contra ponto, considerando-se os componentes da máquina-ferramenta absolutamente rígidos e a peça. Assim, tem-se a Equação 4:

$$Y_p = \frac{p(l-x)^2 10^3}{4EI_1 l^6} \left\{ [3l^2 - (l-x)^2]^2 \frac{x^3}{3} + [3l^2 - (l-x)^2] [(l-x)^2 l - l^3] x^2 + [(l-x)^2 l - l^3]^2 x \right\} + \frac{px^4 10^3}{12EI_2 l^6} [(3l-x)^2 (l-x)^3] \quad [\mu m] \quad (4)$$

onde:

E = módulo de Young [N/mm²];

I_1 = momento de inércia do trecho (1) [mm⁴];

I_2 = momento de inércia do trecho (2) [mm⁴];

l = comprimento do eixo [mm];

A deflexão total do sistema MFDP será a composição da deflexão dos componentes da máquina-ferramenta (Equação 3) com a deflexão da peça (Equação 4), conforme a Equação 5.

$$\begin{aligned}
Y_s = p \{ & W_{pf} + W_c \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 + W_{cp} \left(\frac{x}{l} \right)^2 + \frac{(l-x)^2 \cdot 10^3}{4EI_1 l^6} \cdot \{ [3l^2 - (l-x)^2]^2 \frac{x^3}{3} \} + \\
& [3l^2 - (l-x)^2] \cdot [(l-x)^2 1 - l^3] x^2 + [(l-x)^2 1 - l^3]^2 x \} + \\
& + \frac{x^4 \cdot 10^3}{12EI_2 l^6} [(3l-x)^2 \cdot (l-x)^3] \} \quad [\mu m] \quad (5)
\end{aligned}$$

Para o cálculo e simulações das deflexões em tornos paralelos, desenvolveu-se um programa no MATLAB. Este programa calcula a deflexão em função da força “p” aplicada, da posição “x” em que é aplicada força e do tipo de fixação da peça.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados em um torno paralelo universal, marca Nardini (M S – 205), modelo Mascote, de 5kW de potência do motor principal e a ferramenta de corte utilizada foi o metal duro. O material utilizado foi o aço ABNT 1040, sendo o corpo de prova, um eixo cilíndrico de 25,4 mm de diâmetro por 300 mm comprimento, com marcações de 50 em 50 mm, usinado com fixação entre placa e ponto, profundidade de usinagem (a_p) de 1 mm, avanço (f) de 0,094 mm/volta, velocidade de corte constante (V_c) de 90 m/min.

Em uma primeira fase do experimento, para obtenção do perfil teórico da peça, aplicou-se a força através da célula de carga (BLH Electronics), de capacidade 5kN, presa na torre porta ferramenta. A leitura da força aplicada em cada posição foi feita no visor da fonte do dinamômetro extensométrico amplificadora (DC – 220Volts) e as leituras das deflexões da peça ou dos componentes da máquina - ferramenta, foram medidas através de relógios comparadores, marca MITUTOYO, de 0,001 mm de resolução.

Para obter os valores das deflexões em função da força aplicada em cada posição, aplicou-se nos pontos indicados pela Figura 1 cargas com aumento progressivo de zero a 981N (100 Kgf) e fez-se a leitura da deflexão a cada 49,05N (5 Kgf). A partir dos valores das deflexões obtidas através da aplicação de forças estáticas em diferentes pontos do conjunto MFDP, traçou-se às curvas da deflexão em função da força.

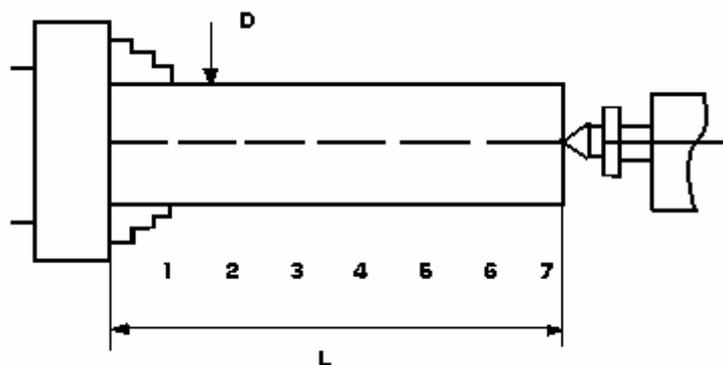


Figura 1. Pontos de aplicação das forças e medições das deflexões – peça fixada entre placa e ponto.

Com os resultados dos ensaios foi possível obter a rigidez estática dos componentes do conjunto a serem utilizadas na resolução da equação previamente deduzida, e que fornecerá a deflexão total do conjunto MFDP e conseqüentemente a previsão de deformação da peça devido a estes fatores.

Na segunda fase do experimento, para obtenção do perfil acabado da peça (perfil usinado), usinou-se a peça usando-se as mesmas condições adotadas por Ferraresi⁽⁴⁾. Com um micrômetro digital, mediu-se o diâmetro da peça em vários pontos, obtendo-se assim, o perfil usinado da peça.

Com os resultados dos ensaios foi possível comparar o perfil teórico com o usinado e comprovar a influência da rigidez na deflexão do conjunto MFDP no processo de torneamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos valores das deflexões obtidas através da aplicação de forças estáticas em diferentes pontos do conjunto MFDP, traçou-se às curvas da deflexão em função da força (Figura 2). Aplicando-se a regressão linear e a partir das equações das curvas, calculou-se os valores da flexibilidade dos componentes do conjunto, como mestrado na Tabela 1.

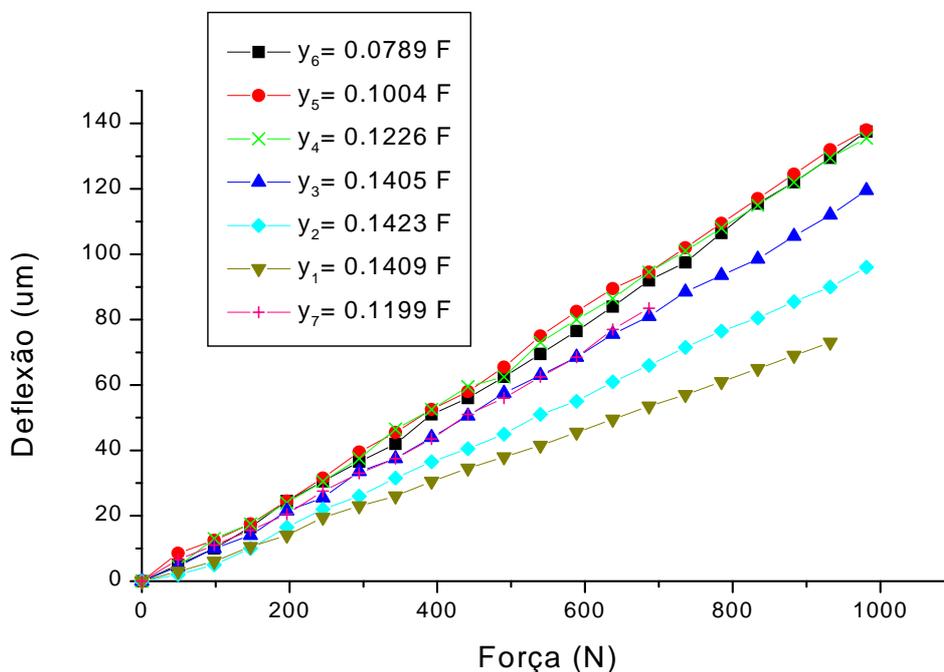


Figura 2. Gráfico da deflexão (μm) em cada posição x Força (N)).

Tabela 1 - Flexibilidade dos Componentes do Sistema MFDP

Flexibilidade ($\mu\text{m}/\text{N}$)
$W_{pf} = 25.47 \times 10^{-2}$
$W_c = 7.89 \times 10^{-2}$
$W_{cp} = 11.99 \times 10^{-2}$

Analisando a Figura 2, pode-se observar que a posição de maior rigidez é a posição 1, próximo à placa, decaindo ao longo do comprimento da peça, atingindo a mínima rigidez (máxima deflexão) na posição 5. A partir daí, a rigidez voltou a crescer atingindo o valor máximo na posição próximo ao contra-ponto (posição 7). Assim, pode-se concluir que a rigidez do sistema é maior nas extremidades próximo aos dispositivos de fixação, sendo máximo na região próxima à placa e um pouco menor na região próxima ao contra - ponto. Estes resultados estão de acordo com o esperado, conforme os valores da rigidez dos componentes.

5.1. Perfil Teórico

A Figura 3 mostra o gráfico da deflexão do sistema em função da força ($Y_s = f(x)$), para cada posição x . Os valores numéricos utilizados para os cálculos de Y_s (W_c , W_{cp} , D e p) estão citados na tabela acima. Neste caso, as curvas serão lineares, quaisquer que sejam os valores de W_{pf} , W_c , W_{cp} , E , D ou p que forem utilizados. Traçou-se as curvas da deflexão em função da posição de aplicação de acordo com a Equação 5.

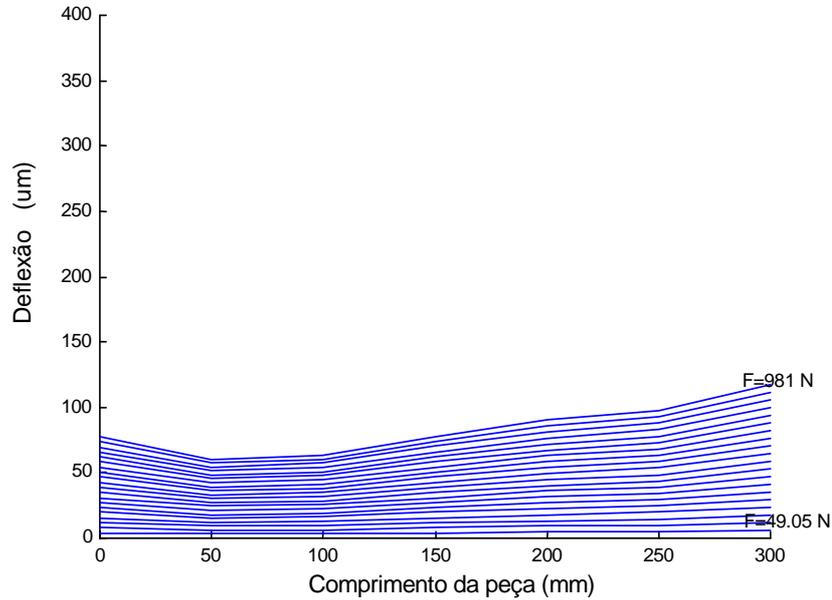


Figura 3. Resultados teóricos

5.2. Perfil Usinado

Usinou-se a peça com as condições descritas no procedimento experimental. Estimou-se através de cálculos teóricos a força de corte que foi de aproximadamente $F = 343N$, assim traçou o perfil da peça usinada. Com um micrômetro digital, mediu-se o diâmetro da peça em vários pontos, obtendo-se assim, o perfil usinado da peça, conforme a Figura 4.

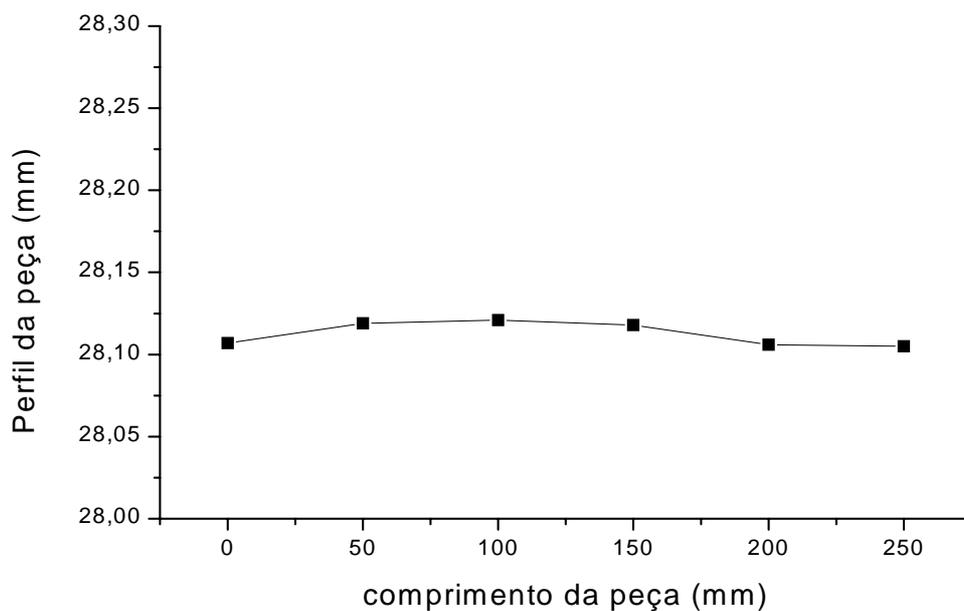


Figura 4. Perfil da peça usinada

5.3. Comparação entre o Perfil Teórico e Usinado

Com o objetivo de comparar os resultados teóricos (Equação 5) com os resultados prático (peça usinada), traçou-se as curvas da deflexão em função da posição, obtendo a Figura 5.

Para a obtenção da curva teórica (estático), utilizou-se força de 344 N, enquanto que para a curva do perfil usinado foi estimada a força de 343 N.

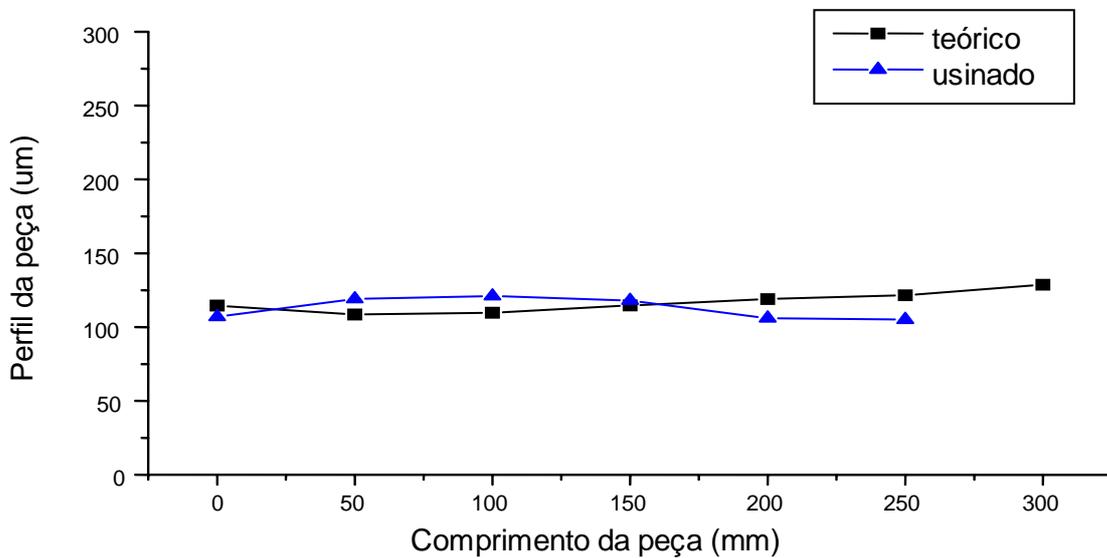


Figura 5. Comparações entre os perfis

Analisando as curvas da Figura 5, verifica-se que a curva teórica e a usinada são bastante semelhantes, sendo que as pequenas diferenças na forma e nas dimensões podem ser atribuídas à ação de diferentes variáveis atuantes durante o ensaio de torneamento.

Nos ensaios estáticos, a rigidez da placa foi maior que o da contra-ponta. Assim, esperava-se que o diâmetro da peça usinada fosse menor próximo à placa e maior próximo ao contra-ponta, porém, ocorreu o contrário. Isto pode ter acontecido porque a placa é fixada no eixo motor, onde se tem maior quantidade de peças acopladas e mais partes móveis, fazendo com que a rigidez dinâmica seja menor que a rigidez estática.

Pela análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo teórico utilizado para prever os erros dimensionais de uma peça torneada pode ser utilizado, pois os erros podem ser mantidos dentro da tolerância dimensional da peça. Já a previsão dos erros geométricos, deve ser utilizada com certas restrições, uma vez que, a deformação dinâmica dos componentes da máquina-ferramenta é diferente da deformação estática.

6. CONCLUSÃO

A rigidez do sistema MFDP tem grande influencia na formação de erros em peças torneadas.

A diferença entre os valores teóricos e usinado da deflexão no sistema MFDP, varia ao longo do comprimento da peça.

Os dispositivos de fixação da peça e o porta-ferramenta tiveram grande influência na formação dos desvios dimensionais e geométricos.

8. AGRADECIMENTO

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp de Ilha Solteira pela colaboração da realização do projeto.

9. REFERÊNCIA

1. KOVAN, V., **Fundamentals of process engineering**, Foreign Languages Publishing House, Moscou, 1973.
2. AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J., **Princípios de engenharia de fabricação mecânica**. V. 2, USP/São Carlos, 1981.
3. MATSUMOTO, H., **Erros dimensionais no torneamento devido à rigidez do sistema**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas 1992.
4. FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais** São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

THE EFFECT OF THE RIGIDITY OF THE MACHINE TOOL/CUTTING TOOL/FIXTURE/WORKPIECE SYSTEM IN TURNING

Hidekasu Matsumoto¹

1 Unesp/Ilha Solteira/Departamento de engenharia Mecânica. Avenida Brasil, 56 - 15.385-000 - Ilha Solteira/SP Brasil – Fone: 18 3743 1037; Fax: 18 3742 2992 - E-Mail: hidekasu@dem.feis.unesp.br

Amanda Cecília Simões da Silva²

2 Unesp/Ilha Solteira/Departamento de engenharia Mecânica. Avenida Brasil, 56 - 15.385-000 - Ilha Solteira/SP – Fone: 18 3743 1037; Fax: 18 3742 2992 - E-Mail: amanditasimoes@gmail.com

Abstract

The effect of the static rigidity of the Machine Tool/Cutting Tool/Fixture/Workpiece System on the geometric and dimensional error formation in turning process was analyzed, by means of a comparison between the results experimentally obtained by applying static forces at several places on the workpiece and the ones obtained by machining. The considered situations is for workpiece fastened between chuck and tail stock.

Keywords. *Rigidity in turning, dimensional error in turning, geometric error in turning.*