

INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO EM BALANÇO DA FERRAMENTA SOBRE A ESTABILIDADE DINÂMICA DO FRESAMENTO DE TOPO RETO A ALTAS VELOCIDADES

Walter Lindolfo Weingaertner

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão, Campus Universitário. Caixa Postal 476, EMC – CEP 88010-970, Florianópolis/SC – Brasil, e-mail: rolf@imp.ufsc.br

Milton Luiz Polli

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Departamento de Mecânica, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: polli@cefetpr.br

Jefferson de Oliveira Gomes

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Divisão de Engenharia Mecânica Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50. CEP 12228-900, São José dos Campos /SP - Brasil, e-mail: gomes@ita.br

Alexandre Paes

Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia, Senai-Cimatec, Av. Orlando Gomes, 1845 – Piatã. CEP 41650-010, Salvador/BA - Brasil, e-mail: apaes@cimatec.fieb.org.br

***Resumo.** O fresamento a altas velocidades é caracterizado por crescentes exigências sobre o comportamento dinâmico do sistema máquina-ferramenta-peça. A fixação de uma fresa em diferentes comprimentos em balanço resulta em diferentes valores para as frequências naturais e para a rigidez do sistema. Dependendo destas características e dos parâmetros de corte, vibrações regenerativas podem ocorrer durante o processo. Neste trabalho foi pesquisada a influência do comprimento em balanço da fresa sobre a estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades. O método de elementos finitos (MEF) foi empregado nos cálculos das frequências naturais e modos de vibração das estruturas resultantes para as diferentes montagens. As funções resposta em frequência para as diferentes fixações da ferramenta foram obtidas através de testes de impacto empregando-se martelo e acelerômetro. Os experimentos consistiram na abertura de canais em peças de alumínio usando fresas inteiriças de metal-duro. Na avaliação da estabilidade foi levado em conta o acabamento da superfície das peças usinadas e os sinais de áudio captados por um microfone. Verificou-se que menores comprimentos em balanço não resultam necessariamente em maior estabilidade para o processo. Isto apresenta maior relevância quando a frequência de passagem de dentes se aproxima da frequência natural do modo flexível dominante. Neste caso, existe a possibilidade de alterar as características dinâmicas do sistema a fim de aumentar a taxa de remoção de material sem que ocorram vibrações regenerativas.*

***Palavras-chave:** fresamento, comprimento em balanço, vibrações regenerativas.*

1. INTRODUÇÃO

O fresamento a altas velocidades é caracterizado por crescentes exigências sobre o comportamento dinâmico do sistema máquina-ferramenta-peça. As vibrações relativas entre a peça e a ferramenta, que surgem durante a operação, exercem grande influência sobre os resultados do processo. Elas podem atingir níveis inaceitáveis, deteriorando o acabamento da superfície e comprometendo a vida da ferramenta, especialmente em situações onde há inerente falta de rigidez do sistema. Estas condições são freqüentemente encontradas no fresamento de paredes finas de estruturas aeronáuticas e componentes automotivos, e na usinagem de moldes e matrizes, cujas geometrias requerem a utilização de ferramentas de grandes comprimentos para áreas profundas, a fim de evitar colisões com as superfícies adjacentes. O fresamento destes componentes é uma tarefa difícil, pois as forças de corte periódicas excitam a peça e a ferramenta estaticamente e dinamicamente. Segundo Altintas⁽¹⁾, as deflexões estáticas produzem erros dimensionais e os deslocamentos dinâmicos prejudicam o acabamento superficial.

De uma forma geral, as estruturas da máquina-ferramenta e da peça têm geometrias complexas, e a dinâmica do processo é de difícil previsão. Em muitas situações de usinagem, o sistema tem múltiplos modos acoplados de vibração atuando em diferentes direções, ou modos dominantes de vibração que podem mudar de uma posição para outra do corte.

No fresamento de topo, as fresas costumam ser a parte mais flexível no sistema, uma vez que sua relação comprimento-diâmetro (L/D) é elevada. Segundo Smith et al⁽²⁾ o método de elementos finitos (MEF) é um procedimento útil para a obtenção das freqüências naturais e modos de vibração da estrutura da dinâmica de tais sistemas, mas tem limitações uma vez que envolve aproximações. Este transforma um sistema de equações diferenciais que descrevem o problema num sistema de equações algébricas, através da aproximação do meio contínuo para um modelo discreto (Zienkiewicz e Morgan⁽³⁾).

Neste trabalho é pesquisada a influência do comprimento em balanço da ferramenta sobre a estabilidade do processo de fresamento a altas velocidades de uma liga de alumínio (7075-T6). A estabilidade é avaliada a partir do acabamento das peças usinadas e da análise dos sinais de áudio medidos durante o processo. O método dos elementos finitos (MEF) é empregado para a análise das freqüências naturais e modos de vibração da estrutura para as diferentes montagens.

2. METODOLOGIA

Os experimentos foram conduzidos em um centro de usinagem Hermle C800U, com rotação máxima 16.000 rpm e potência 15 kW. Foram usadas fresas inteiriças de metal-duro de 16 mm de diâmetro com quatro e seis dentes. Os ensaios consistiam na abertura de canais em uma peça de alumínio 7075-T6. Para diferentes comprimento em balanço, a profundidade de corte axial foi aumentada progressivamente até que o valor limite para um processo estável fosse ultrapassado. Na avaliação da estabilidade foi levado em conta o acabamento da superfície das peças usinadas e os sinais de áudio medidos por um microfone unidirecional de 1/2" (modelo 377A02, fabricante PCB). Este foi colocado na área de trabalho da máquina próximo ao corpo de prova. A opção pelo emprego de um microfone como sensor para detecção do surgimento de vibrações durante o processo foi escolhida em função da sua adequada banda de freqüência e capacidade de detectar sinais de vibrações provenientes da ferramenta, da peça ou da máquina. As funções resposta em freqüência (FRF) para cada montagem foram obtidas por teste de impacto empregando martelo (modelo 086B03, fabricante PCB) e acelerômetro (modelo 352810, fabricante PCB). Também foi empregado o MEF para a análise das freqüências naturais e modos de vibração da estrutura para as diferentes montagens, contudo não foi considerado o contato da ponta da ferramenta com a peça que ocorre durante a usinagem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a ferramenta como uma viga em balanço, os valores da frequência natural (f_n) e da rigidez (k) para o primeiro modo de vibração podem ser calculados, segundo Inman⁽⁴⁾, respectivamente por:

$$f_n = \frac{3,52}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho L^4}} \quad (1)$$

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (2)$$

onde E é o módulo de elasticidade e ρ é a massa por unidade de comprimento.

As propriedades mecânicas dos materiais empregadas nos cálculos são mostradas na tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais (Kennametal⁽⁵⁾)

Propriedades do material	Aço de alta resistência	Metal-duro
Módulo de Elasticidade (GPa)	200	630
Densidade (kg/m ³)	7.850	14.780
Coefficiente de Poisson	0,32	0,22

O gráfico da figura 1 mostra os resultados encontrados para a frequência natural do 1º modo de vibração em função do comprimento em balanço para uma fresa de topo de 16 mm de diâmetro. Os resultados do cálculo analítico (equação 1) e pelo método de elementos finitos são próximos, quando apenas a ferramenta é considerada. Entretanto, estes valores são consideravelmente mais elevados que os encontrados experimentalmente. A diferença diminui à medida que o comprimento em balanço da ferramenta aumenta. Com o crescente aumento de sua flexibilidade, as características dinâmicas do sistema advêm principalmente das propriedades mecânicas e características geométricas da ferramenta. Quando o porta-ferramenta é incluído na análise por elementos finitos, os resultados se aproximam dos experimentais, sendo as variações nas frequências naturais menos sensíveis às mudanças no comprimento em balanço da fresa.

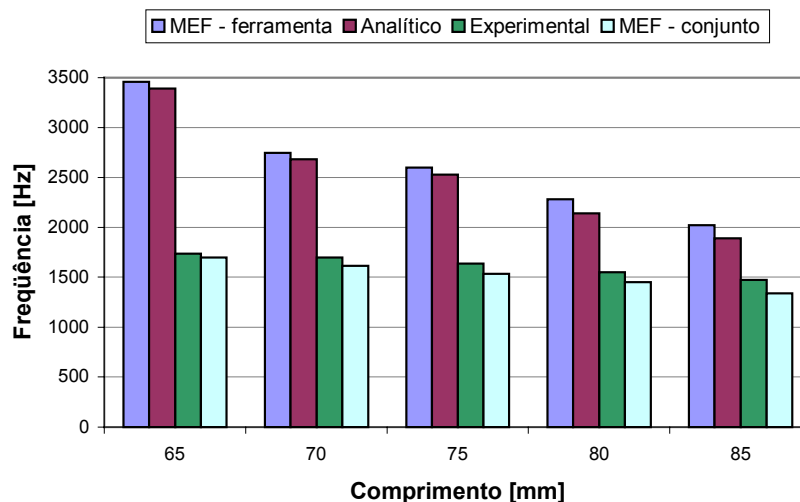


Figura 1. Frequências naturais para o 1º modo de vibração da fresa de 4 dentes

A figura 2 mostra os modos de vibração para um comprimento em balanço $L = 65$ mm. Como condições de contorno foram considerados os sulcos para a transmissão do torque e a fixação do porta-ferramenta ao eixo-árvore através da superfície interna do cone, característica do sistema HSK.

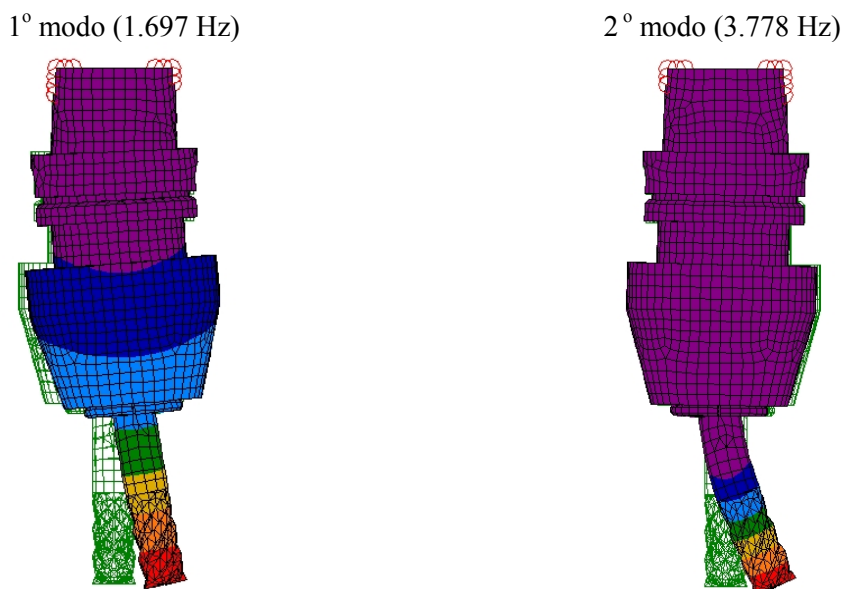


Figura 2. Modos de vibração do sistema para $L = 65$ mm

As diferenças entre os valores simulados e experimentais para as frequências do 2º modo tenderiam a diminuir, caso as características do eixo-árvore fossem levadas em conta na análise. Outra possibilidade é o emprego da análise de receptância de sub-estruturas acopladas. Segundo Schmitz⁽⁶⁾, neste método a função resposta em frequência da ferramenta, derivada de um modelo analítico ou de elementos finitos, é acoplada a uma FRF experimental do conjunto eixo-árvore e porta-ferramenta para se determinar a resposta dinâmica da montagem.

O gráfico da figura 3 mostra as FRF's medidas na extremidade de uma fresa para dois comprimentos em balanços.

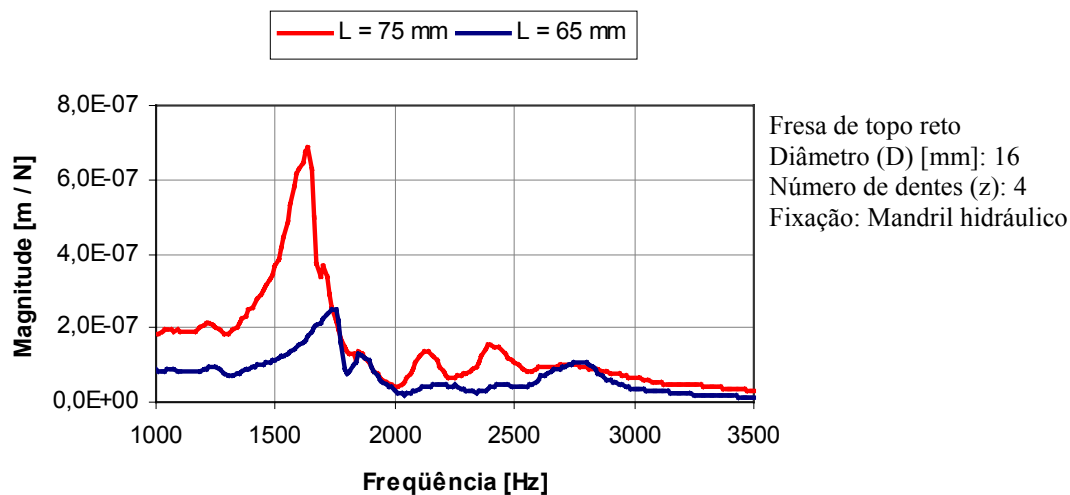


Figura 3. FRF para dois comprimentos em balanço da fresa

Para o comprimento em balanço $L = 75$ mm o maior pico ocorre na frequência de 1.638 Hz, correspondendo ao primeiro modo de vibração. O gráfico também mostra picos menores em 2.400 Hz e em 2.138 Hz, referentes a outros modos de vibração. Para o comprimento em balanço $L = 65$ mm, os picos são menos pronunciados, e a diferença entre o pico primeiro (1.750 Hz) e o do segundo modo (2.800 Hz) é consideravelmente menor. Isto ocorre porque quando o comprimento em balanço é reduzido, aumenta-se a rigidez do sistema, e cresce a importância relativa dos componentes do porta-ferramenta e do fuso na determinação das características dinâmicas do sistema.

Através da análise dos espectros de áudio e medições dos valores de rugosidade foram obtidas as cartas de estabilidade para dois comprimentos em balanço. As curvas são consideradas fronteiras entre regiões de estabilidade (abaixo das curvas) e instabilidade (acima) onde ocorrem vibrações. Estas estão sobrepostas e mostradas na figura 4.

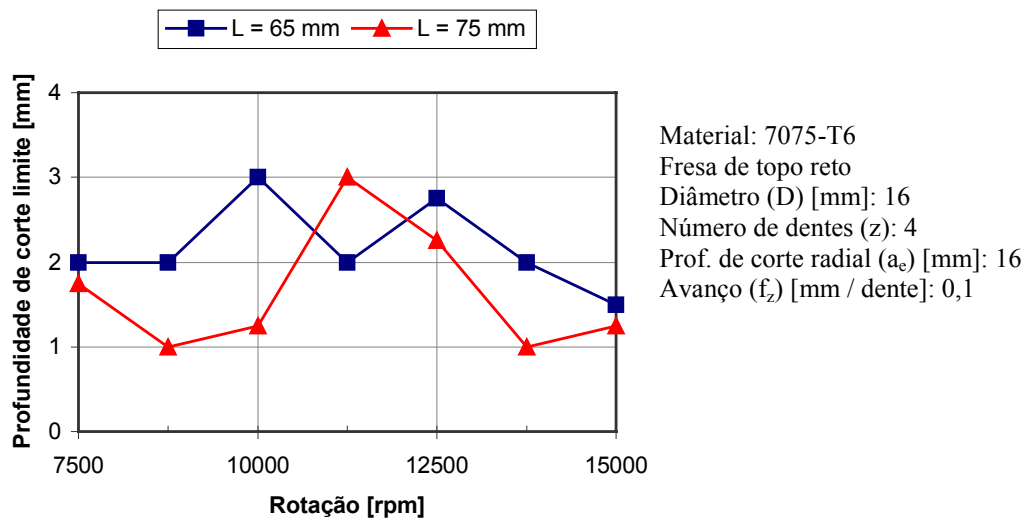


Figura 4. Carta de estabilidade para dois comprimentos em balanço

Para esta faixa de rotações, as variações nas profundidades de corte axiais limites são mais pronunciadas para o maior comprimento em balanço. A maior profundidade limite é o dobro da menor para $L = 65$ mm. Já para $L = 75$ mm, esta relação corresponde ao triplo. O menor comprimento em balanço apresenta profundidades de corte limites maiores, exceto para a rotação $n = 11.250$ rpm, cuja frequência de passagem de dentes está próxima à metade da natural do sistema para o maior balanço.

O gráfico da figura 5 mostra as frequências de vibração (f_v) para ambos os comprimentos em balanço para cada rotação empregada. Para o menor comprimento em balanço as frequências de vibração foram mais próximas da frequência do segundo modo de vibração, apesar deste apresentar magnitude menor que a do primeiro na FRF (figura 1). A exceção ocorreu para a rotação $n = 15.000$ rpm, cuja frequência de vibração se aproximou daquela do primeiro modo. O fato da frequência do segundo modo ser mais elevada e, portanto, mais distante da frequência de passagem de dentes, reduziu as variações das profundidades limites. Para o maior comprimento em balanço, nas rotações que apresentaram as menores profundidades de corte limites, as frequências de vibração foram próximas às do primeiro modo, sendo que para as condições mais favoráveis as vibrações ocorreram em frequências próximas às dos outros modos. Com isso, o gráfico de frequências de vibração apresenta um aspecto semelhante ao da carta de estabilidade.

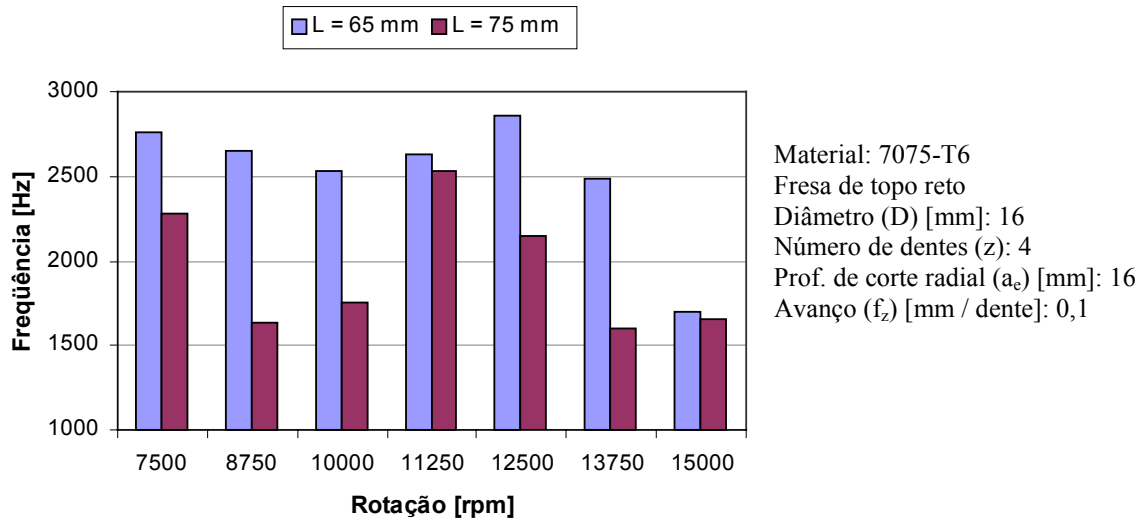


Figura 5. Freqüências de vibração em função da rotação

O gráfico da figura 6 mostra a rugosidade no fundo dos canais em função do comprimento em balanço para uma fresa com seis dentes para rotação máxima da máquina empregada nos ensaios ($n = 16.000$ rpm). As menores rugosidades ocorreram para os comprimentos em balanço $L = 70$ e 75 mm, para os quais o corte foi estável. Apesar do comprimento em balanço $L = 65$ mm resultar em maior rigidez do conjunto, a rotação empregada no ensaio correspondeu a uma condição desfavorável, que acarretou no surgimento de vibrações regenerativas durante o processo.

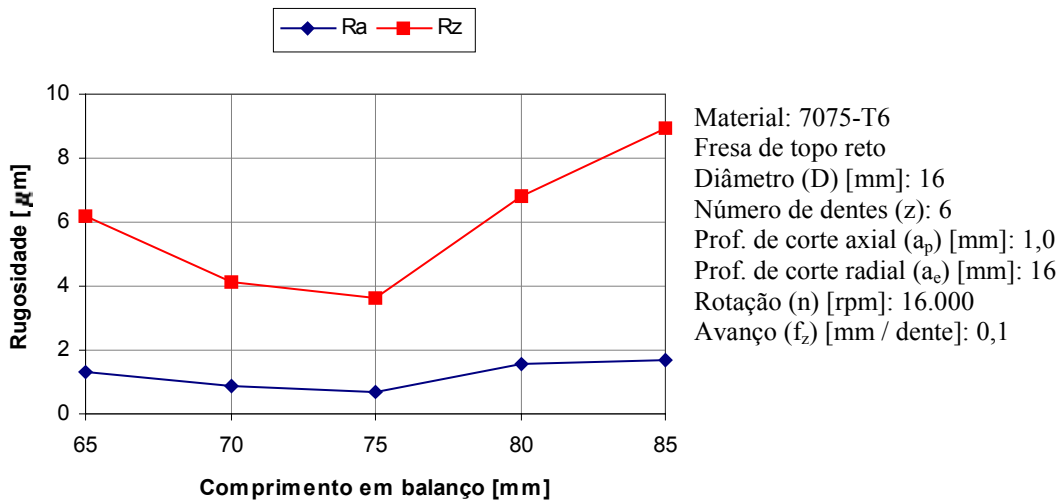
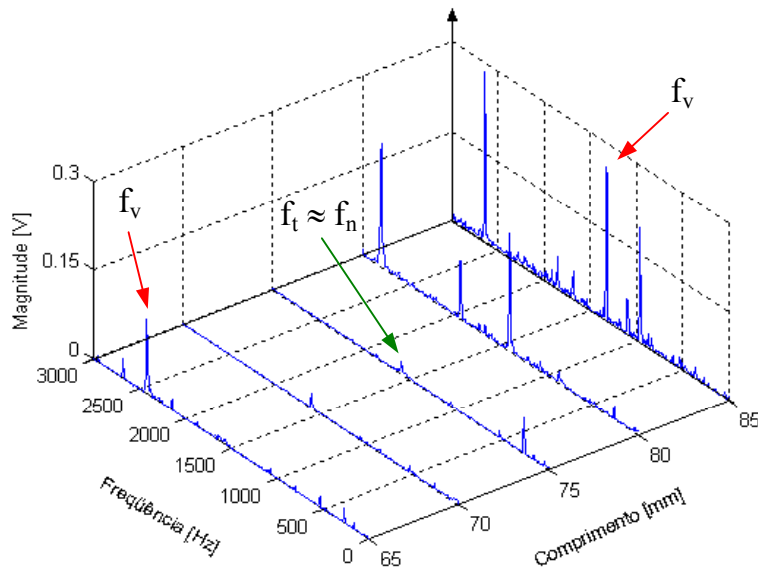


Figura 6. Rugosidade em função do comprimento em balanço

A figura 7 mostra os espectros dos sinais de áudio medidos durante o processo para os diferentes comprimentos em balanço.

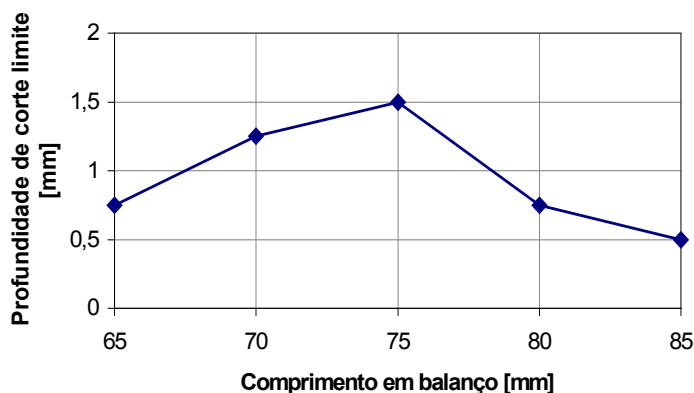


Material: 7075-T6
 Fresa de topo reto
 Diâmetro (D) [mm]: 16
 Número de dentes (z): 6
 Prof. de corte axial (a_p) [mm]: 1,0
 Prof. de corte radial (a_e) [mm]: 16
 Rotação (n) [rpm]: 16.000
 Avanço (f_z) [mm / dente]: 0,1

Figura 7. Espectros do sinal de áudio para diferentes comprimentos em balanço

Para os comprimentos $L = 80$ e 85 mm, as magnitudes são elevadas para as frequências próximas dos primeiros modos e também para seus harmônicos. A frequência de vibração para $L = 65$ mm, a exemplo do que ocorreu com a fresa de 4 dentes, está associada ao segundo modo. Para os comprimentos de $L = 70$ e 75 mm, aparecem com magnitudes consideravelmente menores a frequência de passagem de dentes (f_t) e a frequência de rotação devido à excentricidade.

O gráfico da figura 8 mostra as profundidades de corte axiais limites para os comprimentos em balanço considerados nos ensaios. O comprimento em balanço $L = 75$ mm permitiu a maior profundidade de corte limite, sendo o dobro do valor daquela para $L = 65$ mm. Isto ocorreu porque a rotação empregado no ensaio foi muito próxima da frequência natural resultante para o sistema nesta configuração. Este exemplo ilustra a possibilidade de se manipular as características dinâmicas do sistema a fim de aumentar a taxa de remoção de material como proposto por Tlustý et al ^(7,8).



Material: 7075-T6
 Fresa de topo reto
 Diâmetro (D) [mm]: 16
 Número de dentes (z): 6
 Prof. de corte radial (a_e) [mm]: 16
 Rotação (n) [rpm]: 16.000
 Avanço (f_z) [mm / dente]: 0,1

Figura 8. Profundidade de corte axial limite em função do comprimento em balanço

4. CONCLUSÕES

O comprimento em balanço da fresa tem influência direta sobre as características dinâmicas do sistema. Os valores das frequências naturais do primeiro modo de vibração encontrados pelo método de

elementos finitos se aproximaram dos experimentais quando o porta-ferramenta foi considerado na análise. A sua geometria e propriedades mecânicas fazem com que as variações nas frequências naturais sejam menos sensíveis às mudanças no comprimento em balanço da fresa.

A estabilidade do processo depende das características dinâmicas do sistema e dos parâmetros de corte. Diferentes comprimentos em balanço da ferramenta podem resultar em distintos modos de vibração durante o processo. De um maneira geral, menores comprimentos em balanço permitem o emprego de maiores profundidades de corte sem que ocorram vibrações regenerativas. Entretanto, ocorrem exceções para determinadas combinações de comprimento em balanço e rotações. A taxa de remoção de material pode ser aumentada quando este é ajustado de forma a permitir que a frequência de passagem de dentes se aproxime da natural do sistema para a máxima rotação da máquina.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro e à Kennametal do Brasil pelo fornecimento das ferramentas usadas nos experimentos.

6. REFERÊNCIAS

1. ALTINTAS, Y. **Manufacturing automation**. 1.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 288 p.
2. SMITH, S. et al. The effect of tool length on stable metal removal rate in high speed milling. **Annals of the CIRP**, v. 47, n. 1, p. 307-310, 1998.
3. ZIENKIEWICZ, O. C.; MORGAN, K. **Finite element and approximation**. New York: J. Wiley, 1983. 328 p.
4. INMAN, D. J., **Engineering Vibration**, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1996, p.560.
5. KENNAMETAL. **Specialty carbide catalogue**. Disponível em: < http://www.kennametal.com/en/images/specialty_carbide/Specialty_Carbide_Catalog.pdf >. Acesso em: 15 abril 2004.
6. SCHMITZ, T. L. Predicting high-speed machining dynamics by substructure analysis. **Annals of the CIRP**, v. 49, n.1, p. 303-308, 2000.
7. TLUSTY, J.; Winfough, W. R. Techniques for the use of long slender end mills in high-speed milling. **Annals of the CIRP**, v. 45, n. 1, p. 393-396, 1996.
8. SMITH, S.; TLUSTY, J. Current trends in high-speed machining. **Annals of the CIRP**, v. 119, p. 664-666, nov.1997.

THE INFLUENCE OF TOOL LENGTH ON DYNAMIC STABILITY IN HIGH SPEED END MILLING

Walter Lindolfo Weingaertner

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão, Campus Universitário. Caixa Postal 476, EMC – CEP 88010-970, Florianópolis/SC – Brazil, e-mail: rolf@lmp.ufsc.br

Milton Luiz Polli

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Departamento de Mecânica, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brazil, e-mail: polli@cefetpr.br

Jefferson de Oliveira Gomes

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Divisão de Engenharia Mecânica Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50. CEP 12228-900, São José dos Campos /SP - Brazil, e-mail: gomes@ita.br

Alexandre Paes

Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia, Senai-Cimatec, Av. Orlando Gomes, 1845 – Piatã. CEP 41650-010, Salvador/BA - Brazil, e-mail: apaes@cimatec.fieb.org.br

***Abstract.** High speed end-milling exerts great demands on the dynamic behaviour of the machine-tool-workpiece system. The tool length affects both natural frequency and rigidity of this system. Depending on these characteristics and on the machining parameters chatter may occur. In this paper is investigated the influence of tool length on dynamic stability in high speed end-milling. The finite element method (FEM) was used to compute the natural frequencies and vibrations modes of the structure for different configurations. The frequency response functions (FRF's) were measured at the tool tip through impact tests by using accelerometer and impact hammer. Full immersion (slotting) operations were performed on aluminium workpieces using carbide end mill. The stability evaluation was based on the workpiece surface finish and the audio signals measured by a unidirectional microphone. It was verified that the use of a shorter tool does not necessarily increases the process stability. This is more relevant when the tool passing frequency approaches the natural frequency of the most flexible mode. In this case, it is possible to manipulate the system dynamic characteristics in order to keep the process stable even at high removal rates.*

***Keywords.** milling, tool length, chatter*