

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE A ESTABILIDADE DINÂMICA NO FRESAMENTO DE TOPO ESFÉRICO A ALTAS VELOCIDADES

Walter Lindolfo Weingaertner⁽¹⁾

Rolf Bertrand Schroeter⁽²⁾

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: wlw@emc.ufsc.br⁽¹⁾, rolf@imp.ufsc.br⁽²⁾

Milton Luiz Polli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: polli@utfpr.edu.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

Resumo. *O progresso da usinagem a altas velocidades tem sido limitado por desgaste prematuro de ferramenta e instabilidades dinâmicas. O fresamento de topo esférico de acabamento é caracterizado por elevadas interrupções durante o corte, que resultam em fenômenos dinâmicos diferentes daqueles referentes ao processo de desbaste. Neste trabalho é pesquisada a influência dos parâmetros de corte, da direção de corte e da inclinação da superfície usinada sobre a estabilidade no processo de fresamento de topo esférico a altas velocidades do aço ABNT P20. Os experimentos foram realizados em centros de usinagem com ferramentas inteiriças de metal-duro. A frequência natural do sistema foi medida através de teste de impacto empregando-se martelo e acelerômetro. A avaliação da estabilidade foi baseada na rugosidade das superfícies usinadas e na análise do espectro da pressão sonora medida durante o processo. Verificou-se que as vibrações que limitam o processo são as forçadas pela passagem de dentes. As magnitudes dos picos do espectro de pressão sonora aumenta à medida que se aumenta o avanço em função da maior retirada de material e conseqüente aumento das forças de usinagem. Os espectros da pressão sonora para os cortes instáveis apresentam maiores magnitudes nos harmônicos das frequências de passagem de dentes que mais se aproximam da natural do sistema. Os melhores resultados em ambas as direções de corte são encontrados para as rotações cujas frequências de passagem de dentes se aproximam de 3/4 da frequência natural.*

Palavras-chave: *usinagem a altas velocidades, fresamento de topo esférico, vibrações.*

1. INTRODUÇÃO

A usinagem a altas velocidades (HSC) é um processo com grande potencial para o aumento da qualidade e produtividade de empresas de importantes setores industriais. A aplicação da HSC na área de produção de moldes e matrizes permite um aumento da taxa de remoção, e tem a vantagem de que as forças específicas de usinagem são sensivelmente menores. Conseqüentemente, as tensões superficiais originadas pelo passe de fresamento são reduzidas, sendo possível evitar modificações

térmicas e químicas que possam alterar as características do material, ou causar problemas para as operações posteriores⁽¹⁾. Porém, o progresso da HSC tem sido limitado por desgaste prematuro de ferramenta e instabilidades dinâmicas. As vibrações relativas entre ferramenta e peça 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 são freqüentemente encontradas 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⁽²⁾. O fresamento destes componentes é uma tarefa difícil, pois as forças de corte periódicas excitam a peça e a ferramenta estática e dinamicamente. Segundo Budak e Altintas⁽³⁾, as deflexões estáticas produzem erros de forma e os deslocamentos dinâmicos prejudicam o acabamento da superfície. As vibrações podem ter fonte externa à máquina-ferramenta, ser causadas pela máquina-ferramenta ou ainda geradas pela própria usinagem. Estas ocorrem pela ação das forças geradas durante o corte do material pela ferramenta. Neste grupo se enquadram as vibrações forçadas pela passagem de dentes, que possuem amplitude proporcional à espessura do cavaco, e as vibrações regenerativas ou auto-excitadas, que resultam de um mecanismo de auto-excitação na geração da espessura do cavaco⁽⁴⁾.

No processo de acabamento as características geométricas da ferramenta e os parâmetros de corte são escolhidos de modo a atender às exigências de projeto quanto à qualidade da superfície e à precisão dimensional. Este processo é caracterizado por elevadas interrupções durante o corte, resultando em fenômenos dinâmicos diferentes daqueles encontrados em condições de desbaste⁽⁵⁾. Durante o processo de fresamento com ferramentas de topo esférico, dependendo da inclinação da superfície, várias partes do gume estão em contato com a peça como mostrado na Figura 1. Como os ângulos de contato no corte, na entrada e na saída (φ_e e φ_a), são funções do ângulo de direção do gume (κ), todos os pontos do gume estarão sob diferentes situações de cargas em uma determinada linha de contato. O ângulo de inclinação da superfície da peça com a mesa da máquina horizontal (α) determina a qualidade do corte com ferramentas de topo esférico. Quando o centro da ferramenta de corte está em contato no corte, as cargas sobre o gume são máximas, devido à elevada força passiva e à pequena área de saída de cavaco na ponta da ferramenta⁽⁶⁾.

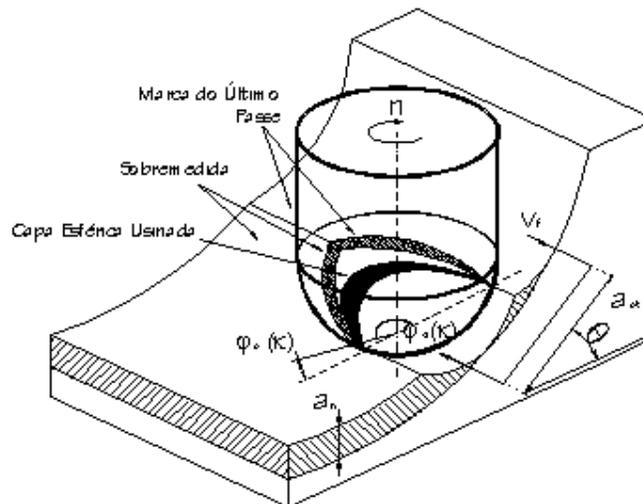


Figura 1. Representação do processo de fresamento de topo esférico⁽⁶⁾

Neste trabalho é pesquisada a influência da rotação, do avanço, da direção de corte e da inclinação da superfície usinada sobre a estabilidade no processo de fresamento de topo esférico a altas velocidades do aço ABNT P20. Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem com ferramenta inteiriça de metal-duro. A freqüência natural do sistema foi medida através de teste de impacto empregando-se martelo e acelerômetro. A avaliação da estabilidade foi baseada na rugosidade das superfícies usinadas e na análise do espectro da pressão sonora medida durante o processo.

2. METODOLOGIA

Os experimentos foram conduzidos nos centros de usinagem Hermle C800U e C600U, ambos com rotação máxima 16.000 rpm e potência 15 kW. O material do corpo de prova foi o aço ABNT P20, escolhido devido a sua ampla aplicação na fabricação de moldes e matrizes. O corpo de prova foi dimensionado e fixado à máquina de tal forma que pudesse ser considerado rígido. Foram realizados ensaios com ferramenta de topo esférico inteiriça de metal-duro (EBL080A20, fabricante Iscar) com revestimento de TiAlN, diâmetro 8 mm e quatro dentes. Ela foi fixada com comprimento em balanço 64 mm. Não foram empregados meios lubri-refrigerantes.

Na avaliação da estabilidade foi levado em conta o acabamento das superfícies usinadas utilizando um rugosímetro portátil (modelo 178-923A, Mitutoyo) e os sinais de áudio medidos por um microfone de campo livre de 1/2" (modelo 377A02, fabricante PCB). A opção pelo emprego de um microfone como sensor para detecção de vibrações durante o processo foi devida a sua adequada banda de frequência e capacidade de detectar sinais de vibrações provenientes da ferramenta, da peça ou da máquina, mesmo para cortes com pequena seção de usinagem. Este foi colocado na área de trabalho da máquina próximo ao corpo de prova. A função resposta em frequência (FRF) da ferramenta foi obtida por teste de impacto empregando martelo munido de um transdutor de força piezolétrico (modelo 086B03, fabricante PCB) e acelerômetro (modelo 352810, fabricante PCB). As componentes das forças de usinagem foram medidas através de um sistema de medição piezolétrico composto de uma célula de carga (9272A, fabricante Kistler), amplificadores de sinais, placa de aquisição, microcomputador e programa para análise dos sinais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Influência da rotação sobre a estabilidade

A Figura 2 mostra a rugosidade em função da rotação para o corte concordante e também para o discordante na usinagem de uma superfície inclinada a 45° . Existem diferenças entre os valores encontrados para o corte concordante em relação àqueles do discordante. Porém, verifica-se que existem regiões que se apresentam com picos e outras com vales, de forma semelhante para as duas direções de corte. Os picos ocorrem em rotações cujas frequências de passagem de dentes se aproximaram a $1/2$ e a $1/3$ da frequência natural medida experimentalmente (1.425 Hz). Os menores valores de rugosidade são encontrados para a rotação $n = 16.000$ rpm. Esta, além de ser a máxima da máquina permitindo a maior velocidade periférica, tinha frequência de passagem de dentes próxima a $3/4$ da frequência natural.

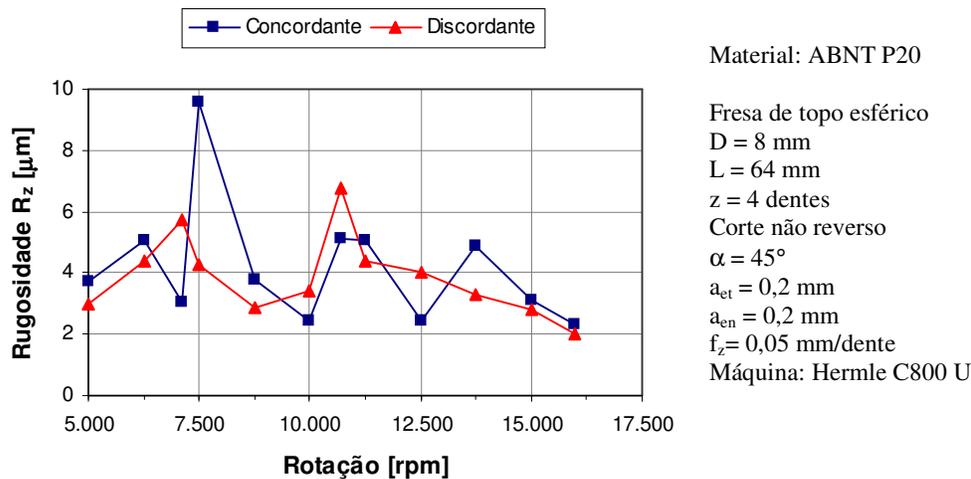


Figura 2. Rugosidade em função da rotação para as duas direções de corte.

A Figura 3 mostra os gráficos referentes a força de usinagem na direção ortogonal ao avanço para um corte estável ($n = 16.000$ rpm) e outro instável ($n = 10.500$) para o fresamento na direções concordante e discordante. Foi empregada a mesma montagem de ferramenta, porém na máquina Hermle C600U. Para o corte instável discordante os valores de força apresentam grande dispersão, sendo que os valores máximos são superiores ao triplo daqueles encontrados para o corte estável. Para o corte concordante, estes correspondem aproximadamente ao dobro. A maior dispersão dos cortes instáveis está associada às elevadas amplitudes das vibrações, que fazem com que os dentes em determinados instantes não removam material devido à perda de contato com a peça, e que em outros haja uma remoção excessiva.

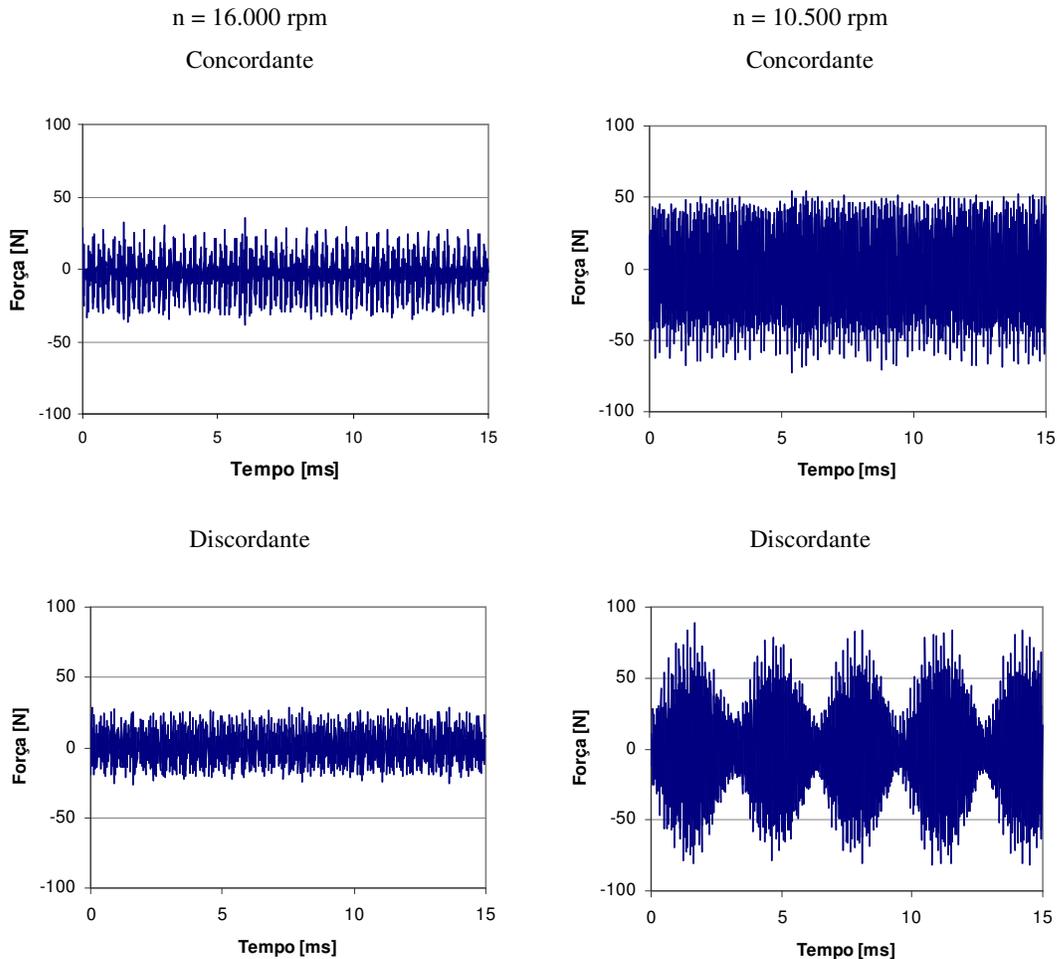
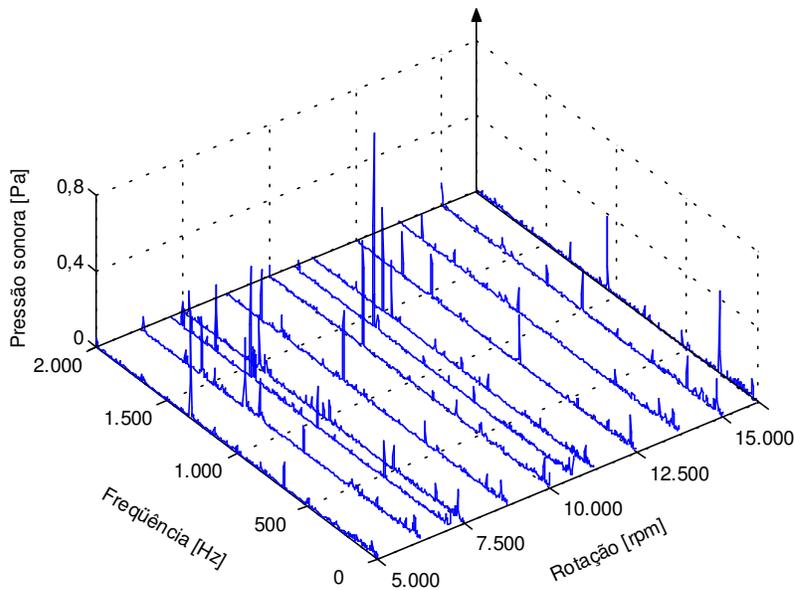


Figura 3. Forças de corte para fresamento de topo esférico estável e instável

O gráfico da Figura 4 mostra os espectros da pressão sonora medidos durante os ensaios para o corte concordante.



Material: ABNT P20

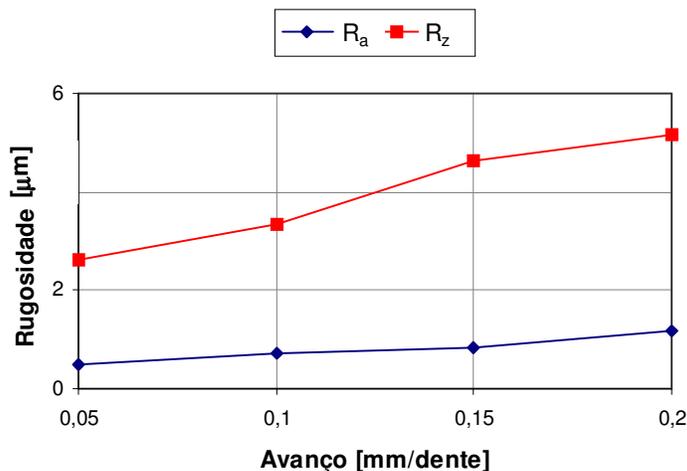
Fresa: topo esférico
 D = 8 mm
 L = 64 mm
 z = 4 dentes
 Tecnologia: concordante
 $\alpha = 45^\circ$
 $a_{et} = 0,2$ mm
 $a_{en} = 0,2$ mm
 $f_z = 0,05$ mm/dente
 Máquina: Hermle C800 U

Figura 4. Espectros da pressão sonora para o corte concordante

Os picos maiores se concentram nas rotações cujas frequências de passagem de dentes se aproximaram a 1/2 e a 1/3 da frequência natural do sistema. Estes correspondem aos harmônicos da frequência de passagem de dentes que mais se aproximaram da frequência natural. Isto indica que as vibrações presentes neste processo foram as forçadas pela passagem dos dentes da fresa. Fato similar ocorreu para o corte discordante. Os melhores resultados foram encontrados para a $n = 16.000$ rpm, cuja frequência de passagem de dentes se aproximou de 3/4 da frequência natural. Esta foi uma das condições onde os harmônicos da frequência de passagem de dentes estavam mais distantes da natural. Desta forma, o sistema apresentou uma menor resposta às forças de usinagem periódicas características do processo de fresamento.

3.2. Influência do avanço sobre a estabilidade

O gráfico da Figura 5 mostra os parâmetros de rugosidade em função do avanço para $n = 16.000$ rpm.



Material: ABNT P20

Fresa: topo esférico
 D = 8 mm
 L = 64 mm
 z = 4 dentes
 Tecnologia: concordante
 Corte não reverso
 $\alpha = 45^\circ$
 $a_{et} = 0,2$ mm
 $a_{en} = 0,2$ mm
 $n = 16.000$ rpm
 Máquina: Hermle C800 U

Figura 5. Rugosidade em função do avanço

A rugosidade se eleva com o aumento do avanço, como era de se esperar conforme a cinemática do processo. Não foram verificadas marcas de vibrações, e o corte foi estável mesmo para o maior avanço empregado.

A Figura 6 mostra os espectros da pressão sonora medidos para as diferentes condições de avanço.

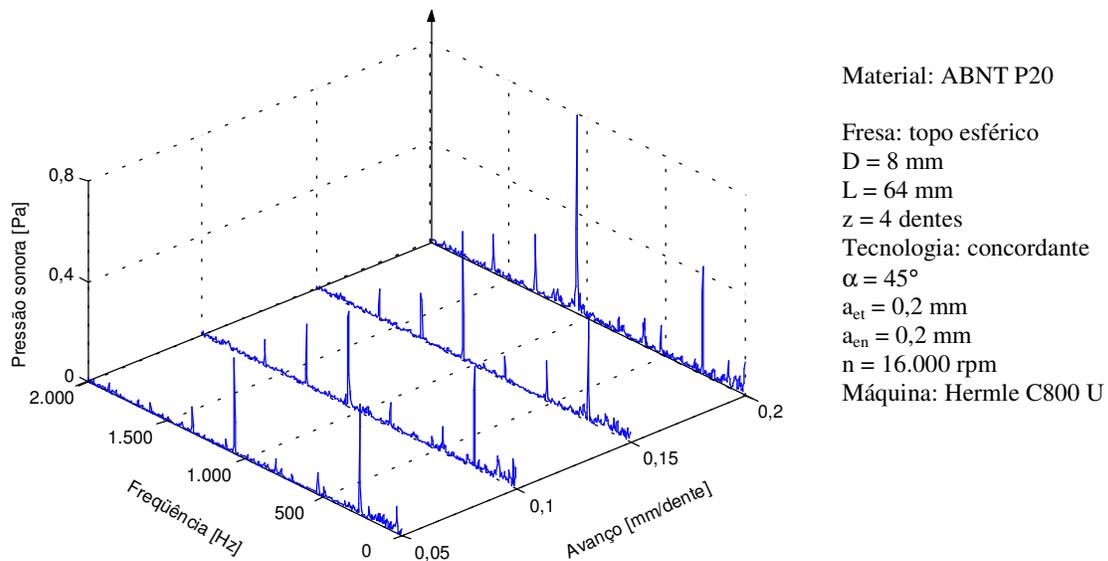


Figura 6. Espectros da pressão em função do avanço

Os maiores picos ocorrem na frequência de passagem de dentes (1.067 Hz), sendo que sua magnitude aumenta à medida que se aumenta o avanço em função da maior retirada de material e conseqüente aumento das forças de usinagem. Também se destacam os picos referentes à frequência de rotação devido à excentricidade.

Estes dados confirmam que esta rotação é a mais estável, por seus harmônicos estarem afastados da frequência natural do sistema.

3.3. Influência da inclinação da superfície sobre a estabilidade

O ângulo de inclinação da superfície da peça com a mesa da máquina horizontal (α) determina a qualidade do corte com ferramentas de topo esférico (Figura 7). Quando o centro da ferramenta de corte está em contato no corte, as cargas sobre o gume são máximas, devido à elevada força passiva (F_p) e à pequena área de saída de cavaco na ponta da ferramenta (Bieker⁽⁶⁾).

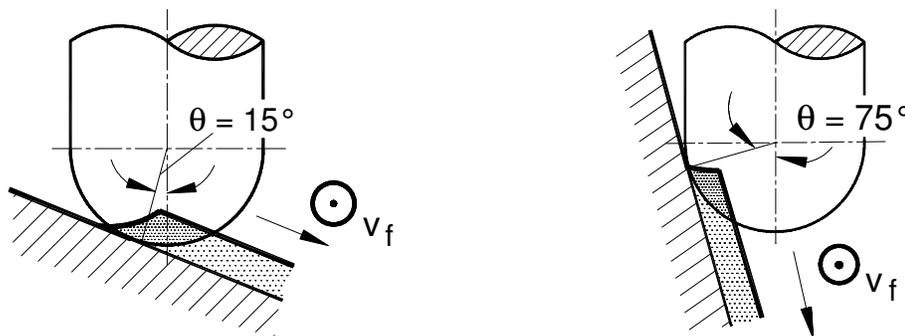


Figura 7. Condições de contato para diferentes inclinações de superfície (Bieker⁽⁶⁾)

O gráfico da Figura 8 mostra os valores da rugosidade em função da rotação para uma superfície inclinada a 75° .

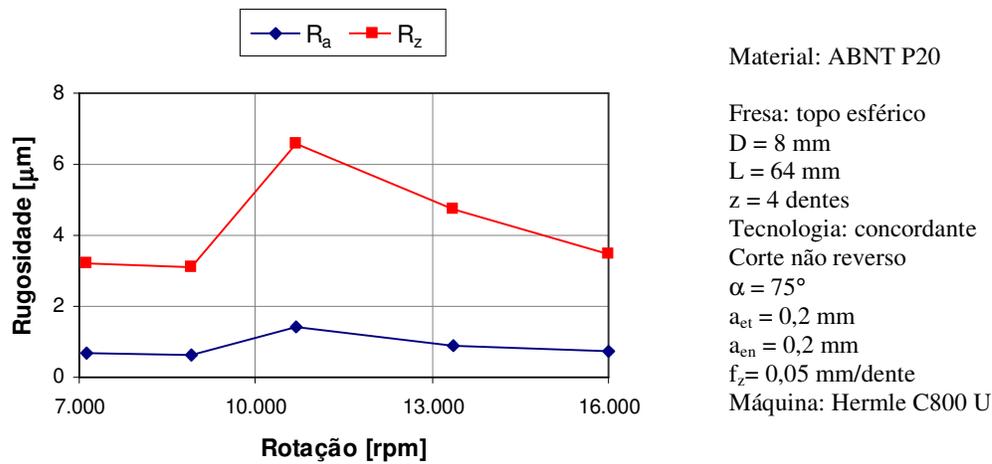


Figura 8. Rugosidade em função da rotação para superfície inclinada a 75°

O comportamento das curvas é similar àqueles encontrados para a inclinação de 45° , sendo que o maior valor de rugosidade também ocorre para a rotação $n = 10.688 \text{ rpm}$. A Figura 9 mostra os espectros da pressão sonora para esta condição.

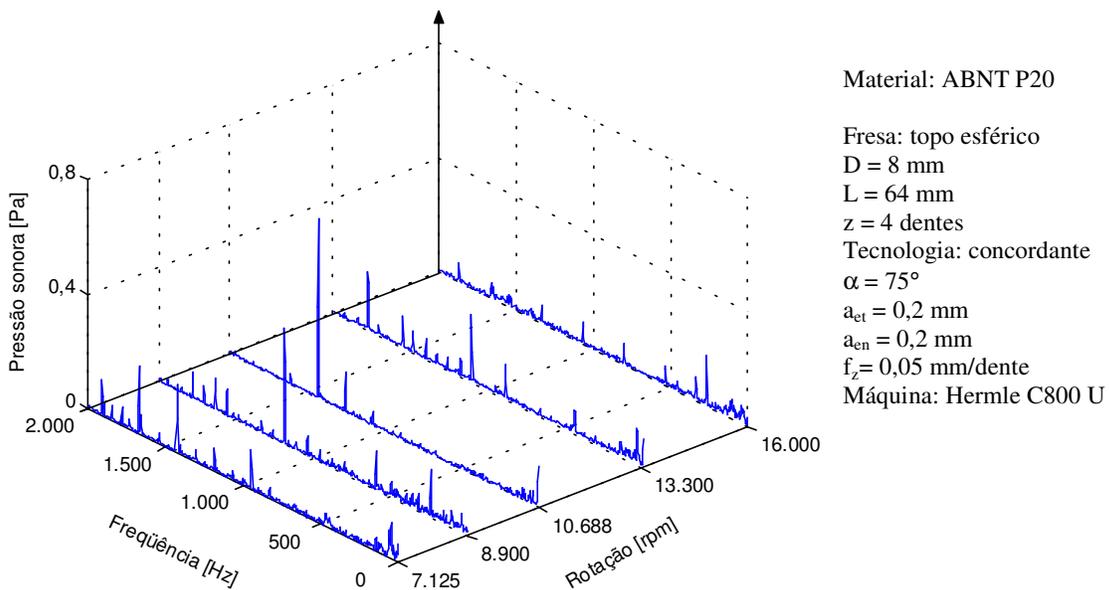
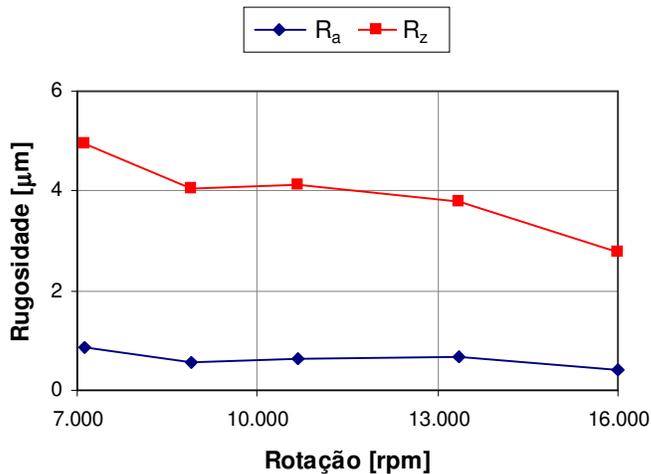


Figura 9. Espectros da pressão sonora para superfície inclinada a 75°

Os picos têm menores magnitudes quando comparados aos da inclinação de 45° . Isto pode estar associado ao fato de o contato ocorrer mais afastado do centro da ferramenta resultando em maior velocidade de corte, e conseqüente redução dos esforços de corte. O maior pico também ocorre para $n = 10.688 \text{ rpm}$, confirmando os resultados da medição da rugosidade.

O gráfico da Figura 10 mostra a rugosidade em função da rotação para uma superfície inclinada a 15° .



Material: ABNT P20

Fresa: topo esférico
 D = 8 mm
 L = 64 mm
 z = 4 dentes
 Tecnologia: concordante
 Corte não reverso
 $\alpha = 15^\circ$
 $a_{et} = 0,2$ mm
 $a_{en} = 0,2$ mm
 $f_z = 0,05$ mm/dente
 Máquina: Hermle C800 U

Figura 10. Rugosidade em função da rotação para superfície inclinada a 15°

Nesta situação a rugosidade foi influenciada principalmente pelos cavacos que ficaram aderidos à superfície. Para ângulos (α) menores do que 15° , a remoção de cavaco da região de corte é difícil e a velocidade de corte na região central tende a zero, provocando esmagamento de material na zona de corte. Devido à construção geométrica da fresa, apenas dois dentes opostos se prolongam até sua extremidade. Somente estes removem material durante a usinagem da superfície nesta condição (Figura 11). Isto pode ser comprovado através dos espectros da pressão sonora da Figura 12.

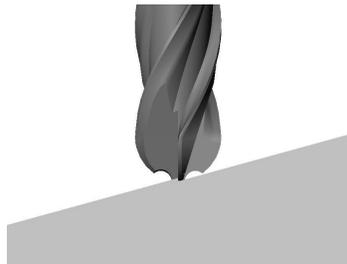
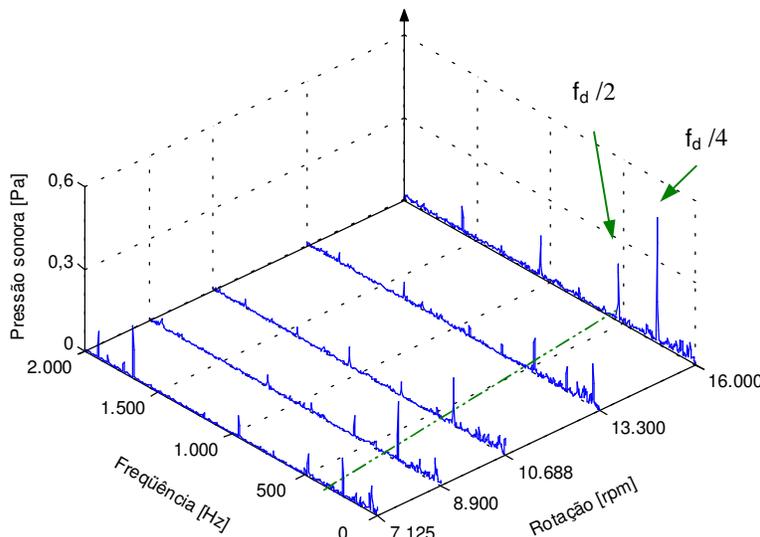


Figura 12. Contato dos dentes da fresa no fresamento da superfície a 15°



Material: ABNT P20

Fresa: topo esférico
 D = 8 mm
 L = 64 mm
 z = 4 dentes
 Tecnologia: concordante
 $\alpha = 15^\circ$
 $a_{et} = 0,2$ mm
 $a_{en} = 0,2$ mm
 $f_z = 0,05$ mm/dente
 Máquina: Hermle C800 U

Figura 13. Espectros da pressão sonora para superfície inclinada a 15°

Este mostra que os maiores picos ocorrem principalmente na frequência que corresponde ao dobro da rotação. Esta está muito distante da frequência natural, de forma que seus harmônicos que poderiam se aproximar deste valor não contêm energia suficiente para provocar maiores amplitudes nas vibrações forçadas.

4. CONCLUSÕES

As vibrações que limitam o processo de fresamento de topo esférico são as forçadas pela passagem de dentes. As magnitudes dos picos do espectro de pressão sonora aumentam à medida que se aumenta o avanço em função da maior retirada de material e conseqüente aumento das forças de usinagem. A inclinação da superfície usinada apresenta pequena influência sobre a estabilidade do processo. Os espectros da pressão sonora para os cortes instáveis apresentam maiores magnitudes nos harmônicos das frequências de passagem de dentes que mais se aproximam da natural do sistema. Os melhores resultados em ambas as direções de corte são encontrados para a rotação cuja frequência de passagem de dentes se aproxima de 3/4 da frequência natural. Esta é uma das condições onde os harmônicos da frequência de passagem de dentes estão mais distantes da natural. Desta forma, o sistema apresenta uma menor resposta às forças de corte periódicas características deste processo.

5. REFERÊNCIAS

1. SCHULTZ, H. High Speed Milling of Dies and Moulds. **Annals of the CIRP**, v. 29, n.1, p. 19-21, 1995.
2. TLUSTY, J. High-Speed Machining. **Annals of the CIRP**, v. 42, n. 2, p. 733-738, 1993.
3. BUDAK, E.; ALTINTAS, Y. Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 34, n. 7, p. 907-918, 1994.
4. CREDE, C. E.; HARRIS, C. M. **Shock and vibration handbook**. New York: Editora Mc. Graw-Hill, 1995, 1456 p.
5. POLLI, M. L. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte**. 2005. 214 f. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
6. BIEKER, R. **NC-Fräsen von Stahlhohlformen**. 1.ed. Düsseldorf: Editora VDI-Verlag, 1991. 127 p.

THE INFLUENCE OF THE CUTTING PARAMETERS ON THE HIGH-SPEED BALL-END MILLING DYNAMIC STABILITY

Walter Lindolfo Weingaertner⁽¹⁾

Rolf Bertrand Schroeter⁽²⁾

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: wlw@emc.ufsc.br⁽¹⁾, rolf@imp.ufsc.br⁽²⁾

Milton Luiz Polli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Av. Sete de Setembro, 3165. CEP 80230-901, Curitiba/PR – Brasil, e-mail: polli@utfpr.edu.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

Abstract. *High-speed machining progress has been limited by premature tool failure and dynamic instabilities. Finishing ball-end milling is characterized by high interruptions during the cut. The phenomena related to the process dynamic are different from those found in roughing operations. The influence of the cutting parameters, cutting direction and machined surface inclination on the stability of high-speed ball-end milling of ABNT P20 steel are investigated in this work. The experiments were conducted on machining centers and cemented carbide tools were used. The natural frequency of the system was measured by using instrumented hammer and accelerometer. It was verified that the forced vibrations are the major limitation to the process. The magnitudes of the sound pressure spectra increase as the feed increases due to higher machining forces. The sound pressure spectra of the unstable cuts have higher magnitude for the harmonics of the tooth-passing frequency, which are closer to the natural frequency. Best results are found for the spindle speeds whose tooth-passing frequencies are close to 3/4 of the natural frequency.*

Keywords. *High-speed machining, ball-end milling, vibrations.*