



APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE TESTES DE IMPACTO PARA OTIMIZAÇÃO DO DESBASTE DE COMPONENTES EM ALUMÍNIO

Leonardo de Oliveira Soares

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - End.: Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias
CEP 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil
leonardo.aero@gmail.com

Francisco Márcio Farias da Costa

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Gustavo Francisco Cabral

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Oswaldo Mendes França Junior

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Resumo: *A definição de parâmetros de corte precisos na usinagem a altas velocidades de corte é uma grande ferramenta no aumento da eficiência desse processo de produção. A frequência natural de vibração da ferramenta é um dos fatores que podem auxiliar muito nesta definição. Neste artigo é mostrada uma forma simples de utilizar esta frequência, determinada utilizando um martelo resposta em frequência, a fim de se selecionar os parâmetros de corte que otimizem a usinagem de componentes em alumínio. Foram realizados testes em dois centros de usinagem, um Hermle C600U do Centro de Competência em Manufatura (CCM) e um SNK HPS- 120B da empresa Embraer, onde se obteve ganhos percentuais de até 55% em produtividade.*

Palavras-chave: *Usinagem, Ligas de Alumínio, Ensaio de impacto, Vibração.*

1. INTRODUÇÃO

As exigências de mercado atuais têm solicitado cada vez mais a flexibilização dos processos de produção. Processos mais flexíveis exigem da engenharia moderna o desenvolvimento de métodos para uma análise mais profunda de seu comportamento dinâmico, objetivando reduzir tempos de produção, aumentar a produtividade e o tempo de vida útil de equipamentos e de componentes.

Um processo largamente utilizado na indústria é o de fresamento a altas velocidades de corte, que é naturalmente sujeito a vibrações. Este fenômeno limita a produtividade do processo, pois compromete a vida da ferramenta e provoca deterioração do acabamento da superfície usinada. Esse problema é amplificado em altas rotações, nas quais as condições de amortecimento são reduzidas. Para compreendê-lo e propor soluções, é necessário realizar um estudo dos modos de vibração do conjunto fresa, sistema de fixação e eixo-árvore (Weingaertner, W. L., Schroeter, R. B., Gomes, J. O., Polli, M. L, 2005).

Existem diversos métodos para análise do comportamento dinâmico de sistemas físicos: métodos analíticos, experimentais e simulação numérica por elementos finitos. No caso de sistemas de múltiplos graus de liberdade, como as máquinas-ferramenta, um dos métodos mais utilizados para prever o comportamento dinâmico de tais sistemas é o do martelo de impacto.

Os testes de impacto têm por finalidade a obtenção da Função Resposta em Frequência (FRF) para uma dada montagem de ferramenta no *tool holder*. A partir da FRF podem ser estimadas informações importantes, como a razão de amortecimento, rigidez e, principalmente, a frequência natural do sistema.

As vibrações que decorrem da ação de forças geradas pelo próprio corte do material pela ferramenta podem ser basicamente divididas em dois tipos: as 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. Segundo Altintas (1995), para o surgimento desta última, um dos modos estruturais do sistema máquina-ferramenta-peça é excitado por forças de corte inicialmente. Uma superfície ondulada resultante da passagem de um gume é removida pelo subsequente, que também deixa uma superfície ondulada devido a vibrações estruturais. Dependendo da diferença de fase entre duas ondulações sucessivas as vibrações podem ser atenuadas ou ampliadas. No caso da instabilidade, a espessura máxima do cavaco pode crescer exponencialmente oscilando em uma frequência próxima à do modo estrutural dominante do sistema.

Neste trabalho, foi realizada a determinação da carta de estabilidade para uma ferramenta, método clássico que define os limites operacionais do conjunto máquina-fixação-ferramenta, porém bastante trabalhoso. Em seguida, foi mostrada uma forma simples de utilizar as características dinâmicas do sistema, as quais são determinadas utilizando testes de impacto, a fim de se selecionar os parâmetros de corte que otimizem a usinagem de componentes em alumínio. Por fim, é feita a comparação entre os dois métodos e a aplicação e validação do método proposto em um centro de usinagem no chão de fábrica da Embraer.

2. MÉTODO

2.1. Aparato Experimental

Os experimentos foram conduzidos em um centro de usinagem Hermle C600U, com rotação máxima 16.000 rpm e potência de 15 kW pertencente ao Centro de Competência em Manufatura (CCM), e em um SNK HPS 120-B, com rotação máxima de 20.000 rpm e potência de 30 kW pertencente à empresa Embraer. O material da peça foi a liga de alumínio 7075-T6. Foram avaliadas três ferramentas (S1, S2, S3) no centro SNK e uma ferramenta (H1) no centro Hermle.



Figura 1: Metodologia dos ensaios no centro de usinagem Hermle C600U.

Todas as fresas eram inteiriças de metal duro e suas características estão presentes na tabela 1.

Tabela 1: Características gerais da fresas avaliadas neste trabalho.

| Ferramenta | Diâmetro - D (mm) | Número de Dentes - Z | Balanço - L (mm) | Raio de ponta (mm) |
|------------|----------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|
| H1 | 12.0 | 2 | 50 | 1.5 |
| S1 | 25.0 | 3 | 61 | 1.0 |
| S2 | 32.0 | 3 | 90 | 1.5 |
| S3 | 20.0 | 2 | 128 | 0.5 |

Nos testes foi empregada imersão total ($A_e=D$), sem uso de fluido de corte. O avanço empregado inicialmente foi 0,1 mm/dente.

2.2. Avaliação da estabilidade

A avaliação da estabilidade foi baseada no acabamento superficial das peças usinadas e na análise dos sinais de áudio medidos por um microfone unidirecional de 1/2". 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 frequência e capacidade de detectar sinais de vibração provenientes da ferramenta, da peça ou da máquina (Weingaertner, W. L., Schroeter, R. B., Gomes, J. O., Polli, M. L., 2005). Para a avaliação da superfície usinada pela ferramenta H1, utilizou-se um rugosímetro digital, conforme descrito na figura 2.

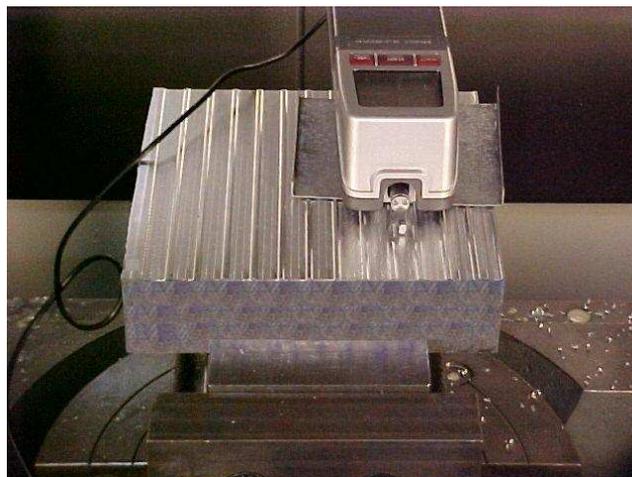


Figura 2: Avaliação da rugosidade das superfícies usinadas.

2.3. Obtenção da FRF

A função resposta em frequência (FRF) foi obtida fixando-se um acelerômetro (modelo 352810, fabricante PCB) na extremidade da ferramenta e excitando-a com um martelo (modelo 086B03, fabricante PCB) na direção do acelerômetro. Os sinais do acelerômetro e do martelo são aquisitados através de um analisador de sinais dinâmicos Data Physics SignalCalc ACE, determinando-se então a FRF do conjunto.

2.4. Determinação da rotação ótima e da profundidade máxima de corte

Estabelecido há mais de 40 anos, o conceito de cartas de estabilidade consiste em uma ferramenta gráfica que identifica a fronteira entre regiões de corte estáveis e instáveis para o fresamento em um diagrama bidimensional dos parâmetros de controle primário: profundidade de corte axial, A_p (eixo vertical, das ordenadas), e rotação do *spindle* (eixo horizontal, das abscissas).

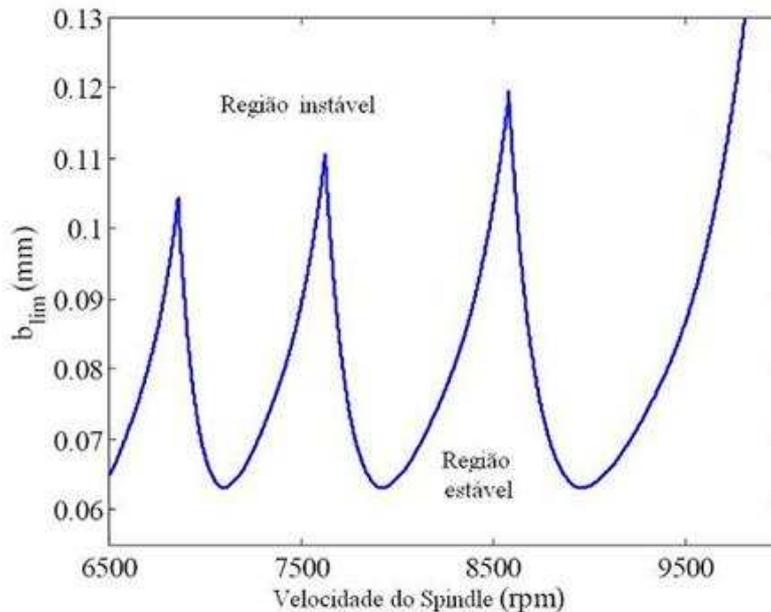


Figura 3: Exemplo de carta de estabilidade.

Na figura 3, os picos apresentados por esse diagrama ocorrem aproximadamente em velocidades de rotação onde a frequência de passagem dos dentes (f_d) é igual a uma fração inteira da frequência natural correspondente ao modo mais flexível [1,2]. Nesses picos é possível atingir as maiores profundidades de corte axial e, portanto, é possível obter o melhor desempenho da máquina-ferramenta, levando a uma maior produtividade global do processo.

As velocidades de corte otimizadas, que ocorrem nos picos, podem ser estimadas utilizando-se a Equação 1:

$$\Omega = \frac{60 \cdot f_n}{j \cdot z} \quad (1)$$

Onde:

Ω [rpm] : Velocidade de rotação do *spindle*;

z : Número de dentes;

f_n : [Hz] : frequência natural;

j : inteiro (1,2,3,...).

Para determinação da rotação ótima, considerou-se a frequência correspondente ao modo mais flexível. Nos casos em que a rotação obtida excedia a rotação máxima disponível no *spindle*, considerou-se o modo mais próximo da rotação máxima, ou um lóbulo das frequências obtidas (Cabral, 2006).

A profundidade máxima de corte foi determinada realizando-se ensaios de desbaste, avaliando a estabilidade através do espectro de áudio e da textura da superfície. Utilizando a rotação ótima determinada e mantendo fixos o avanço e o engajamento radial, realizaram-se operações de desbaste variando-se a profundidade de corte radial (A_e). A profundidade crítica foi aquela em que se iniciou o surgimento de instabilidades dinâmicas, marcadas pela presença de picos diferentes da frequência de passagem de dentes e de seus harmônicos ou sub-harmônicos no espectro de áudio da usinagem (Cabral, 2006).

O fluxograma abaixo resume o procedimento realizado para se determinar os valores de rotação ótima e profundidade máxima de corte, tendo a FRF como entrada.

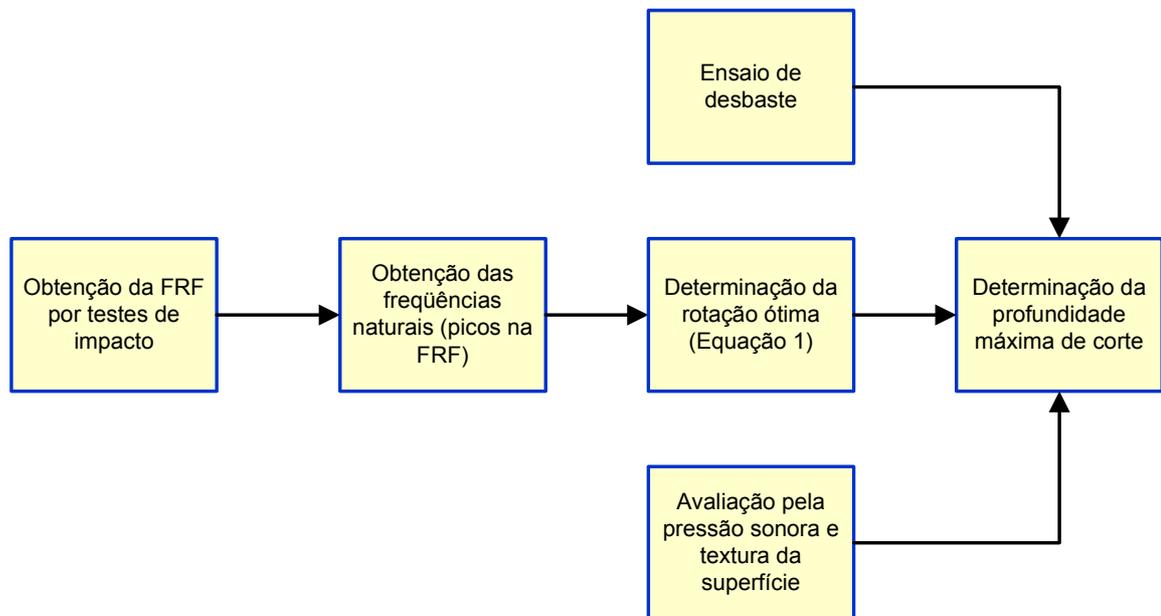


Figura 4: Fluxograma do procedimento para obtenção das velocidades ótimas de desbaste e de profundidade máxima de corte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Determinação da carta de estabilidade de H1

Utilizando a fresa H1, realizaram-se ensaios de desbaste, conforme descrito no item 2.4, a fim de se determinar a carta de estabilidade para esta ferramenta. O gráfico da figura 5 mostra a rugosidade medida no fundo dos canais em função da rotação para uma profundidade de corte axial $a_p = 0,8$ mm e avanço $f_z = 0,1$ mm/dente.

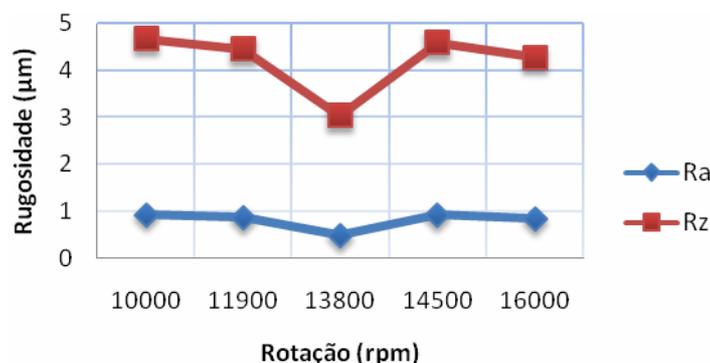


Figura 5: Rugosidade do fundo dos canais em função da rotação para $a_p=0,8$ mm.

As curvas referentes aos demais parâmetros de avaliação de estabilidade seguem a mesma tendência. Existem picos caracterizando valores consideravelmente elevados para determinadas rotações. Esses são resultado do surgimento de vibrações regenerativas durante o processo. Nesses casos, a profundidade de corte axial empregada no ensaio foi superior àquela limite para um processo estável.

A figura 6 mostra o sinal de áudio medido durante o corte realizado em uma condição estável e a figura 7, numa condição instável para rotação de 16.000 rpm, $a_p = 0,6$ e $0,9$ mm respectivamente.

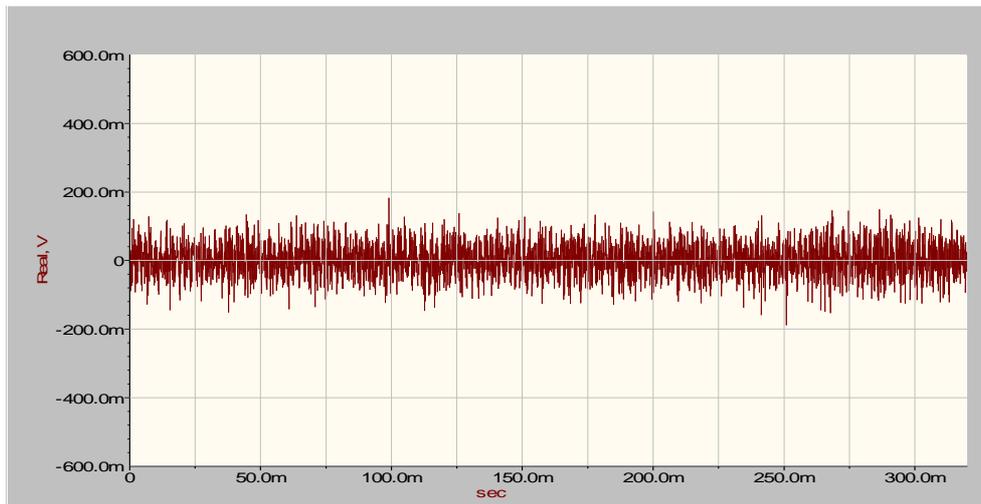


Figura 6: Sinal de áudio para $n = 16.000$ rpm em condição estável, $a_p = 0,6$ mm.

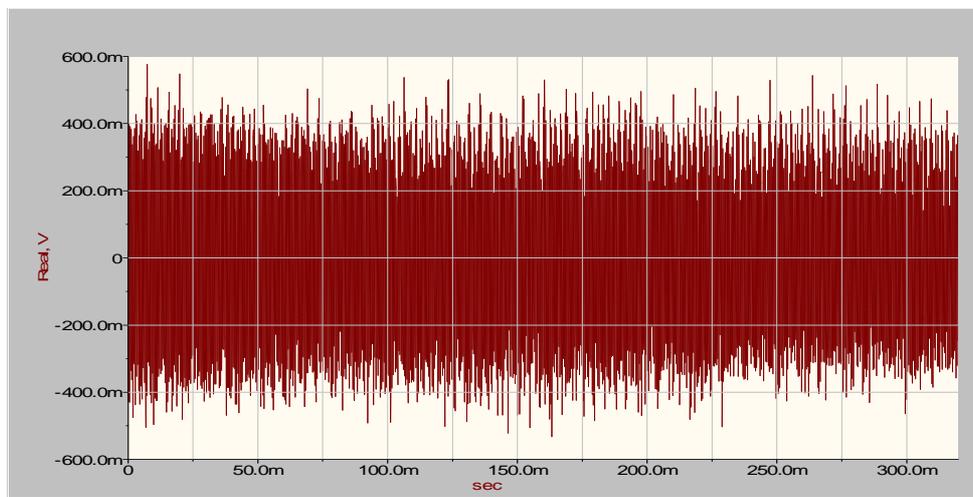


Figura 7: Sinal de áudio para $n = 16.000$ rpm, em condição instável, $a_p = 0,9$ mm.

É possível perceber que o nível da pressão sonora é consideravelmente maior para a condição instável, representando um ruído que contribui significativamente para a poluição sonora no chão de fábrica. Abaixo é mostrado o espectro correspondente a essas medições.

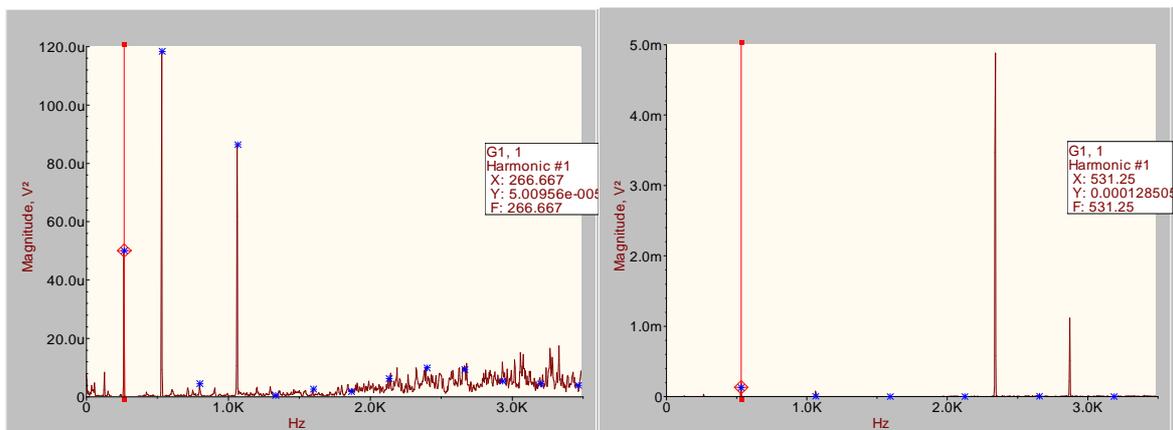


Figura 8: Espectro de áudio para $n = 16.000$, $a_p = 0,6$ e $0,9$ mm.

Para o corte estável o espectro é dominado pela frequência de passagens de dentes (532 Hz, amplitude de 10,8 mV), resultado das vibrações forçadas. Também aparecem harmônicos correspondentes à rotação excêntrica, de modo que um dente usina mais que os outros. Já para a condição instável, o maior pico não ocorre na frequência de passagem de dentes, nem nos seus harmônicos, mas em um novo valor (2.350 Hz, amplitude de 69,8 mV), que corresponde à frequência da vibração regenerativa.

Sabe-se que a sensibilidade do microfone utilizado é 45,2 mV/Pa e $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

$$\text{Nível dB} = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

Considerando as amplitudes das frequências predominantes mencionadas acima e a Equação 2, de conversão de pressão sonora para decibéis, tem-se que o nível sonoro no interior da máquina para o caso estável é de aproximadamente 81,54 dB, enquanto que, no caso instável, o nível é 97,75 dB. Para fins de comparação, segundo a OMS, o nível de ruído recomendado para o ambiente de trabalho é de 50 dB.

Aumentando-se a profundidade de corte para as demais rotações e tomando-se os espectros de áudio e medições de rugosidade foi possível construir a carta de estabilidade da figura 9.

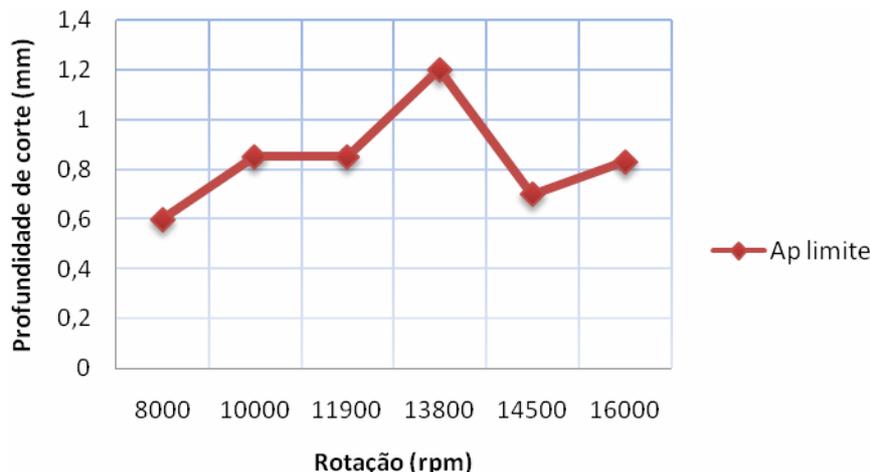


Figura 9: Carta de estabilidade para a ferramenta H1.

A coordenada vertical é a profundidade de corte axial limite e a horizontal corresponde à rotação. As rotações que permitiram as maiores profundidades limite poderiam ser determinadas diretamente pela FRF, como foi realizado no item seguinte.

Para avaliar a aplicabilidade da carta de estabilidade, consideremos que um processo de desbaste ocorre com os seguintes parâmetros de corte: avanço = 0,1 mm/dente, imersão total ($A_e=D$) e rotação de 11.900 rpm. Nessa rotação, a máxima profundidade que se pode obter livre de vibrações regenerativas é 0,85 mm.

Através da carta de estabilidade, observa-se que o processo poderia ser realizado a 13.800 rpm, ainda com um aumento do limite de profundidade radial, que poderia chegar a 1,20 mm. Desse modo, neste caso, o ajuste da rotação ótima produziria um aumento potencial de cerca de 63,7% na produtividade do processo (taxa de remoção de material por unidade de tempo).

É importante observar que a figura 8 corresponde a apenas um trecho da carta de estabilidade. A rotação relativa à frequência natural encontra-se além do limite de 16.000 rpm, portanto o pico em 13.800 rpm ainda não corresponde à máxima taxa de remoção de material. Em seguida foram estudados alguns casos de aumento de produtividade através do método descrito.

3.2. Obtenção da velocidade ótima de corte diretamente através do teste de impacto

Nas figuras 10, 11 e 12, encontram-se as FRF medidas nas extremidades das fresas S1, S2 e S3 respectivamente. Os gráficos foram obtidos através da análise dos dados do teste de impacto pelo *software* SignalCalc ACE da empresa DataPhysics.



Figura 10: FRF medida na extremidade da fresa S1.

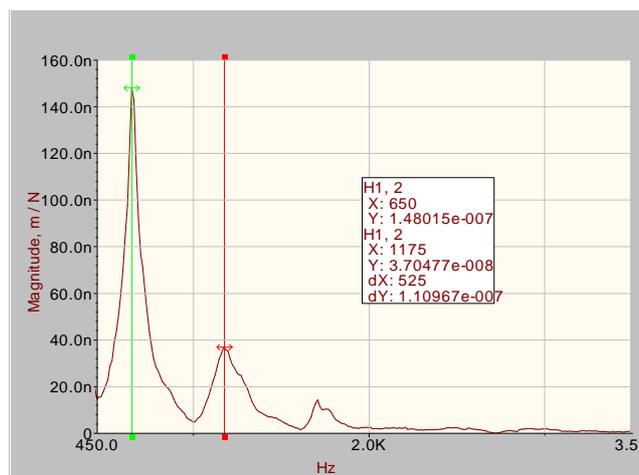


Figura 11: FRF medida na extremidade da fresa S2.

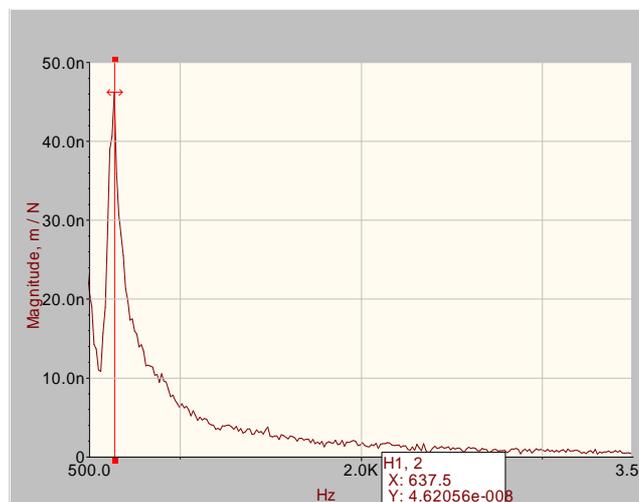


Figura 12: FRF medida na extremidade da fresa S3.

A partir das FRF observadas acima é possível construir a tabela 2, que resume as frequências predominantes nas vibrações livres das ferramentas S1, S2 e S3.

Tabela 2: Frequências principais de vibração das fresas S1, S2 e S3.

| Ferramenta | Número de dentes - Z | 1º Modo (Hz) | 1º Modo (rpm) | 1/2 1º Modo (rpm) | 2º Modo (Hz) | 2º Modo (rpm) |
|------------|----------------------|--------------|---------------|-------------------|--------------|---------------|
| S1 | 3 | 775 | 15500 | 7750 | - | - |
| S2 | 3 | 650 | 19500 | 9750 | 1175 | 35250 |
| S3 | 2 | 637,5 | 12750 | 6375 | - | - |

Para a ferramenta S1, escolheu-se a rotação referente ao primeiro modo (15.500 rpm), pois a mesma está relacionada com o pico principal no gráfico de carta de estabilidade, caracterizando a rotação ótima para o corte.

Na ferramenta S2, o caso foi análogo ao da S1, com a única ressalva que a velocidade obtida pela equação 1 foi de 19.500 rpm, bastante próxima à máxima permitida pelo centro (20.000 rpm). Este tipo de proximidade é a configuração mais desejada, pois permite que a máquina seja utilizada para se chegar próximo possível da taxa de remoção de material máxima. Isso mostra um ajuste adequado do comprimento em balanço das ferramentas, processo conhecido como *tool tuning* (Zelinski, 2006).

Novamente, de modo análogo, para a ferramenta S3 a velocidade ótima não excedeu a velocidade máxima fornecida pela máquina. Assim, utilizou-se a velocidade de 12750 rpm.

Em seguida, comparou-se as rotações ótimas calculadas com as que estavam sendo utilizadas nos processos de desbaste que utilizavam estas ferramentas do centro SNK no chão de fábrica da Embraer. O resumo das características e dos ganhos em produtividade, sendo considerado apenas o ganho em rotação, encontra-se na tabela 3.

Tabela 3: Resumo dos ganhos em produtividade para as ferramentas S1, S2 e S3.

| Ferramenta | Número de dentes | RPM anterior | RPM calculada | Ganho em RPM |
|------------|------------------|--------------|---------------|--------------|
| S1 | 3 | 10.000 | 15.500 | 55% |
| S2 | 3 | 14.000 | 19.500 | 39% |
| S3 | 2 | 10.000 | 12.750 | 28% |

4. CONCLUSÕES

A determinação da rotação ótima permitiu a realização de operações de desbaste a altas rotações mais estáveis, possibilitando a utilização de maiores profundidades de corte e reduzindo o nível de ruído do processo, o qual aumenta bastante a poluição sonora no chão de fábrica.

Ficou claro que, para finalidades práticas de aumento da produtividade, o método da determinação da rotação ótima de desbaste proposto neste trabalho é bem mais eficiente em termos de custos operacionais que a determinação da carta de estabilidade, a qual requer um grande número de testes para que seja efetiva, além de muitas horas de trabalho por pessoa para a análise dos dados obtidos.

Através da análise realizada, foi possível vislumbrar ganhos bastante significativos para o processo de usinagem da Embraer, sendo que o ganho pode ser ainda maior se considerarmos o ganho em rotação mais o ganho em profundidade de corte. O produto de ambos determina o ganho potencial na taxa de remoção de material.

Desse modo, o método experimental mostrou-se apropriado para obter resultados rápidos e práticos, podendo ser aplicado não só na indústria aeronáutica, mas em toda indústria manufatureira, sobretudo na usinagem de alumínio.

5. REFERÊNCIAS

- Zelinski, P. 2006, “The Overhang Effect”, Modern Machine Shop, Gardner Publications, Inc.
- Weingaertner, W. L., Schroeter, R. B., Gomes, J. O., Polli, M. L, 2005. “Influência das Parâmetros de Corte sobre a Estabilidade Dinâmica do Fresamento de Topo Reto”. Máquinas e Metais, São Paulo, n. 472.
- Altintas, Y.; Budak, E. 1995. “Analytical prediction of stability lobes in milling”. Annals of the CIRP 1995.
- Cabral, G. F., 2006. “Seleção de parâmetros para otimização do processo de usinagem de componentes aeronáuticos em alumínio.” Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

APPLICATION AND EVALUATION OF IMPACT TESTS FOR THE OPTIMIZATION OF HIGH-SPEED MILLING OF ALUMINIUM COMPONENTS

Leonardo de Oliveira Soares

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - End.: Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias
CEP 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil
leonardo.aero@gmail.com

Francisco Márcio Farias da Costa

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Gustavo Francisco Cabral

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Oswaldo Mendes França Junior

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Abstract: *Defining the correct cut parameters in high-speed milling has great influence over the efficiency of this process of production. The natural frequency of vibration is a factor that can provide important data about the dynamic behavior of the system. In this article is shown a simple method to use this frequency, obtained using a frequency response hammer in order to select the cut parameters that optimize the milling of aluminum components. The tests were performed on a Hermle C600U from Centro de Competência em Manufatura (CCM) and on a SNK HPS- 120B from Embraer company. The productivity gains of the latter achieved values up to 55%.*

Keywords: *High-speed milling, Aluminum alloys, Stability, Chatter.*