

## 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.

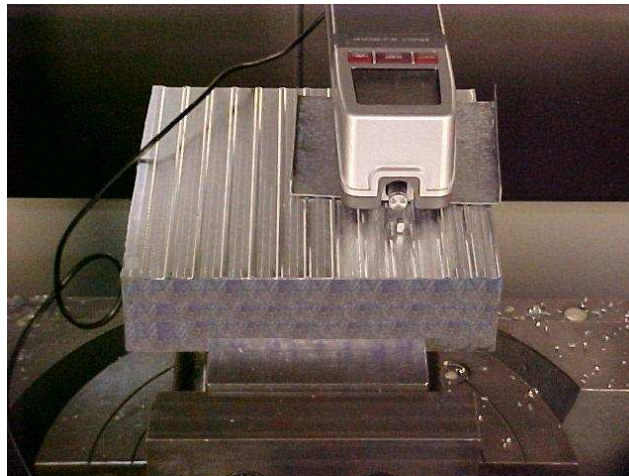


Figura 2: Avaliação da rugosidade das superfícies usinadas.

## 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).

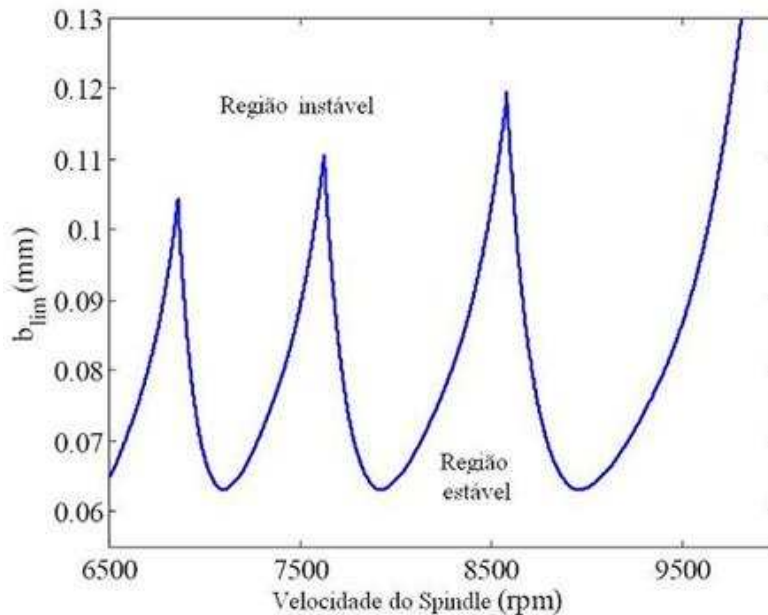


Figura 3: Exemplo de carta de estabilidade.

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:

$\Omega$ [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.

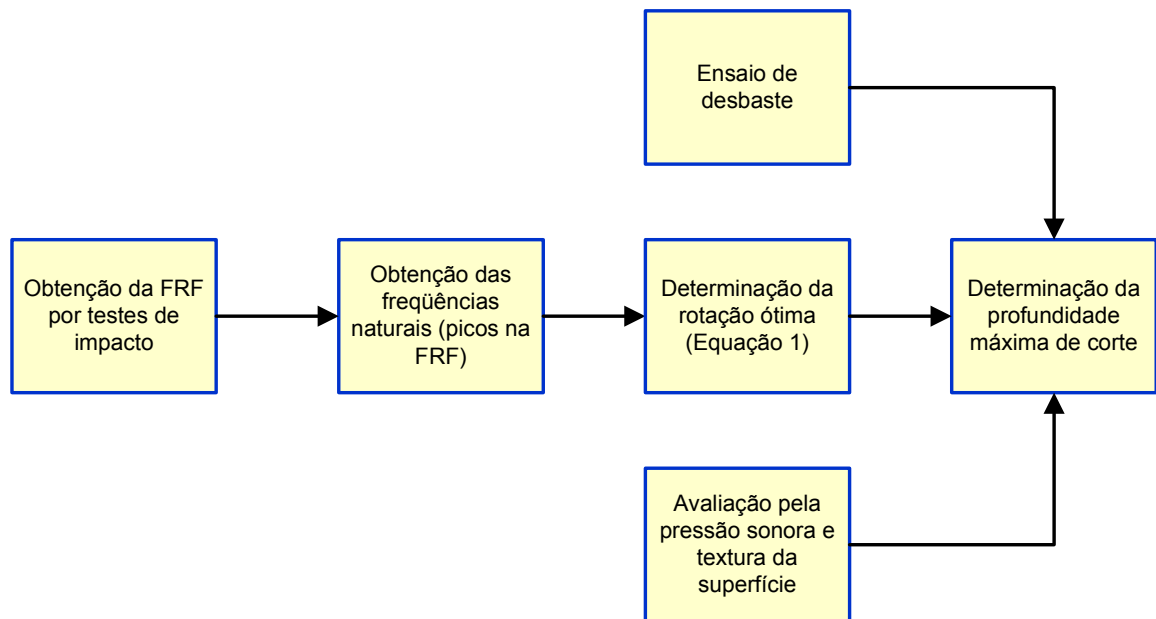


Figura 4: Fluxograma do procedimento para obtenção das velocidades ótimas de desbaste e de profundidade máxima de corte.

### 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.

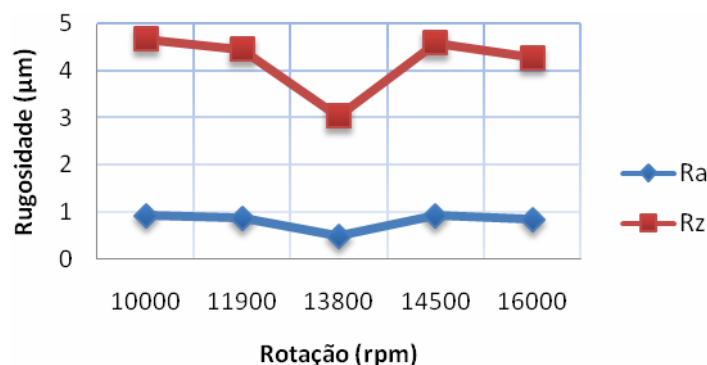


Figura 5: Rugosidade do fundo dos canais em função da rotação para  $a_p=0,8$  mm.

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.

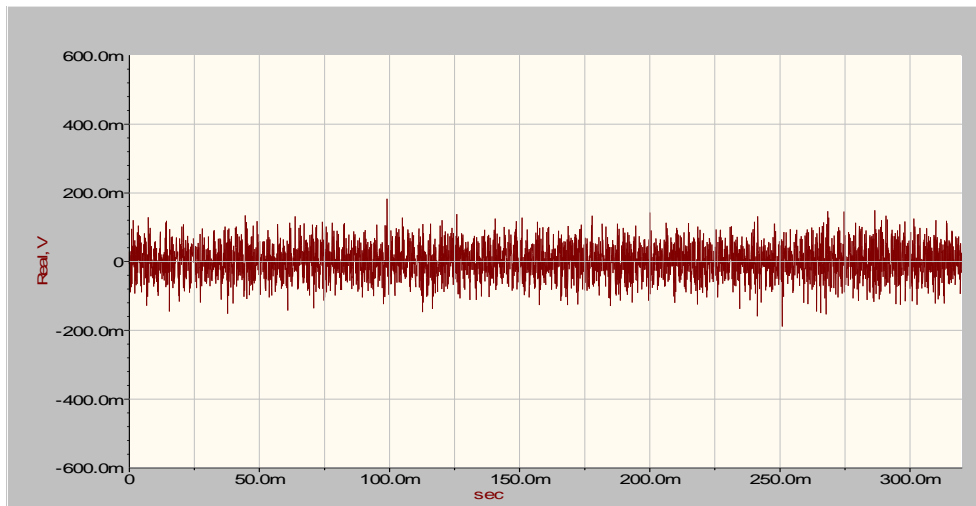


Figura 6: Sinal de áudio para  $n = 16.000$  rpm em condição estável,  $a_p = 0,6$  mm.

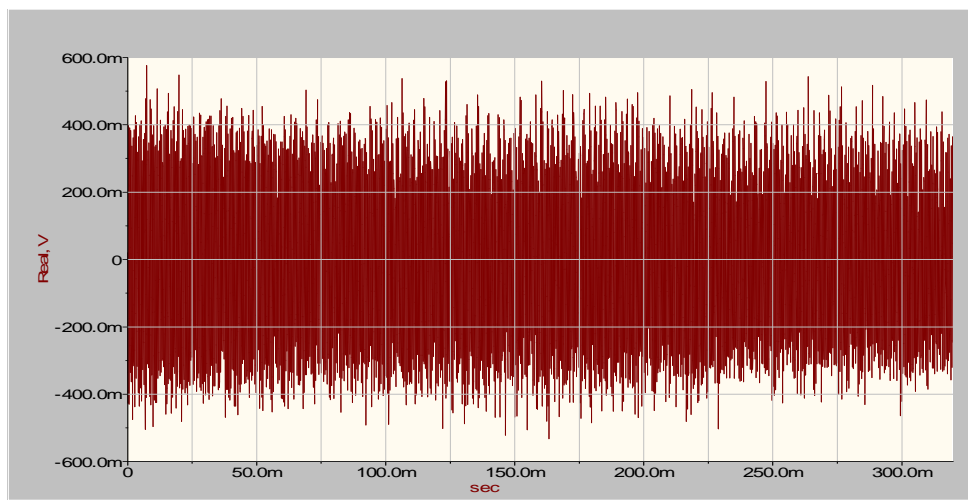


Figura 7: Sinal de áudio para  $n = 16.000$  rpm, em condição instável,  $a_p = 0,9$  mm.

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.

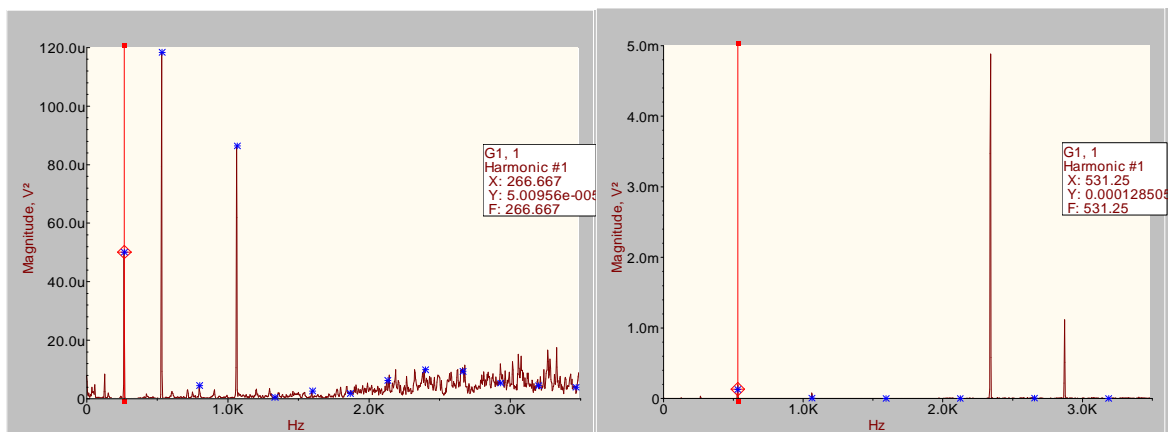


Figura 8: Espectro de áudio para  $n = 16.000$ ,  $a_p = 0,6$  e  $0,9$  mm.



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.

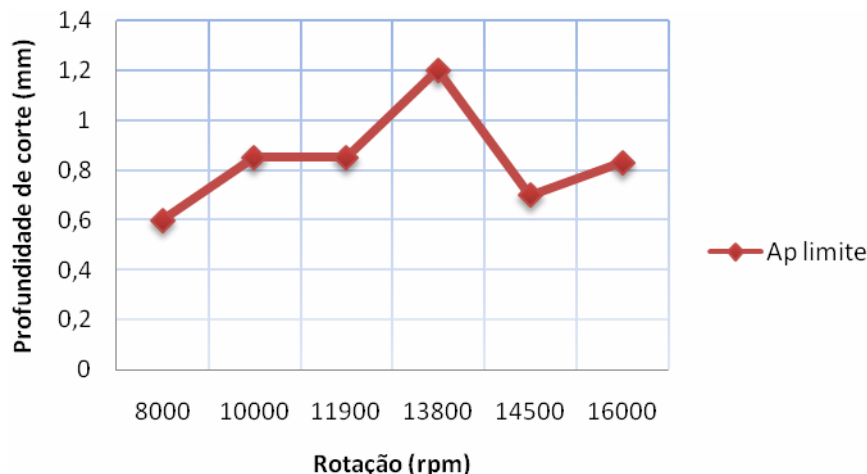


Figura 9: Carta de estabilidade para a ferramenta H1.

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.

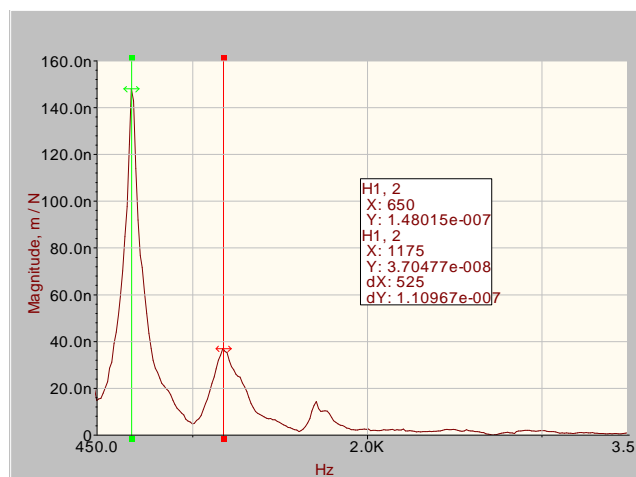


Figura 11: FRF medida na extremidade da fresa S2.

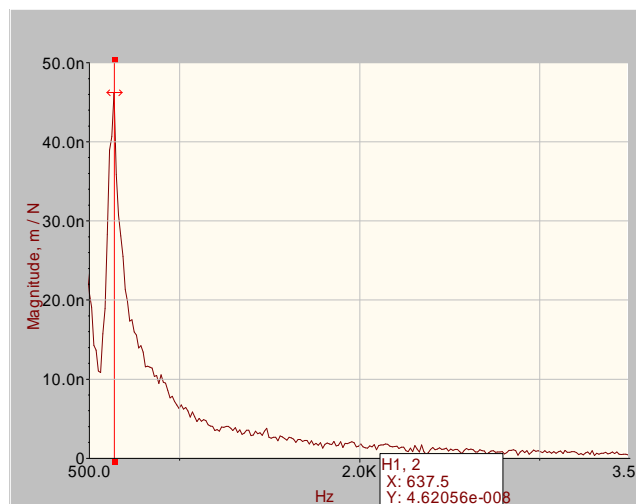


Figura 12: FRF medida na extremidade da fresa S3.



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.*