

## FORÇAS DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE AÇOS PARA MATRIZES

**José Luiz Silva Ribeiro**

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Av. Dom José Gaspar, 500, Cor. Eucarístico, Belo Horizonte, MG, ribeirojls@pucminas.br

**Alexandre Mendes Abrão**

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, abrao@ufmg.br

**Wisley Falco Sales**

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Av. Dom José Gaspar, 500, Cor. Eucarístico, Belo Horizonte, MG, ribeirojls@pucminas.br

**RESUMO:** *O conceito de redução de custos em todos os processos industriais tem sido continuamente desenvolvido, com o objetivo de tornar as empresas cada vez mais competitivas. Na cadeia produtiva de matrizes e moldes esta preocupação não é diferente, uma vez que, para atender à crescente demanda por produtos cada vez mais sofisticados, com “design” arrojado e em consonância com os anseios do mercado, estes têm que ser desenvolvidos com agilidade e de forma a se lançar, rapidamente, o produto final para venda ao mercado consumidor. Este trabalho tem como objetivo o estudo da influência das forças de corte durante o fresamento frontal a seco do aço ferramenta VHSUPER. Durante os testes foi avaliada a influência da velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço por aresta ( $f_z$ ) sobre a força de usinagem resultante, visando a otimização do desempenho. Os resultados indicaram que, dentro da faixa de parâmetros utilizada, o parâmetro que mais influenciou de forma expressiva o aumento das forças de usinagem foi o avanço.*

**Palavras-chave:** *fresamento, forças de usinagem, aço ferramenta.*

### 1. INTRODUÇÃO

Na fabricação de matrizes a preocupação com o conceito de redução de custos não é diferente dos demais segmentos industriais. Para atender a esta necessidade as empresas lançam mão de ferramentas de software e hardware cada vez mais poderosas e usinagem em máquinas CNC, com a utilização de modernos conceitos de ferramental, ferramentas com revestimentos tribológicos e metodologias de usinagem específicas para cada objetivo.

Se por um lado, problemas oriundos dos processos que envolvem a remoção de material estão relacionados tanto com a qualidade do acabamento superficial quanto com a geração de desvios geométricos e a geração de desvios dimensionais, a constante busca pela solução das principais fontes destes problemas é incessante. Esta busca passa pela melhoria de máquinas-ferramenta, melhoria do ferramental e confecção de desenhos mais elaborados das peças que se pretende usinar. Além disso, são necessárias constantes melhorias nas metodologias a se empregar, utilizando-se para tal dos recursos de CAD e CAM, que estão em constante evolução.

O estudo das forças de usinagem permite otimizar parâmetros de corte e assim assegurar menor gasto de energia, melhor acabamento e maior vida de ferramenta. Além disso, as forças de usinagem são determinantes para a qualidade geométrica e dimensional da superfície usinada uma vez que suas componentes podem induzir deflexões em ferramentas mais esbeltas. Como no fresamento a área da seção transversal do cavaco varia periodicamente, as forças resultantes, observadas na movimentação que ocorre entre peça e ferramenta também variam, gerando

vibrações excessivas. O material a ser usinado e seu estado de dureza; a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte; o material da ferramenta; o material de recobrimento; a geometria da ferramenta escolhida; o uso ou não de fluido de corte; o desgaste da ferramenta; os efeitos térmicos; o atrito e as tensões geradas na remoção do cavaco são fatores que, em maior ou menor grau, afetam as componentes das forças de corte na operação de fresamento. Dessa forma, pode-se afirmar que o monitoramento destas forças é útil para prever ou acompanhar o desempenho global do processo.

A força total resultante é chamada de força de usinagem ( $F_u$ ). Como é difícil se saber adequadamente a direção desta força, são primeiramente avaliadas as suas componentes e as direções conhecidas e, assim, calculados os esforços que daí resultam. Fatores como a geometria e material da ferramenta, o material da peça usinada, e condições de usinagem afetarão os valores dos esforços necessários à correta usinagem.

Segundo DINIZ et al. (1999), a norma DIN 6584 (1982), descreve os termos técnicos de usinagem como força, energia, trabalho e potência. Nesta norma, além de apresentada a decomposição da força de usinagem,  $F_u$  (N) é descrita a decomposição no plano de trabalho, que é denominada força ativa ( $F_t$ ) e em uma componente perpendicular a este plano, denominada força passiva ( $F_p$ ). A força ativa contribui para o cálculo da potência de usinagem pelo fato de se posicionar no plano onde os movimentos de usinagem são realizados. A força ativa se decompõe, por sua vez, em força de corte ( $F_c$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte, e em força de avanço ( $F_f$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço. Cita ainda a força de apoio ( $F_{ap}$ ), que é a projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho. Na Figura 1 são apresentadas as disposições destas componentes para os processos de fresamento.

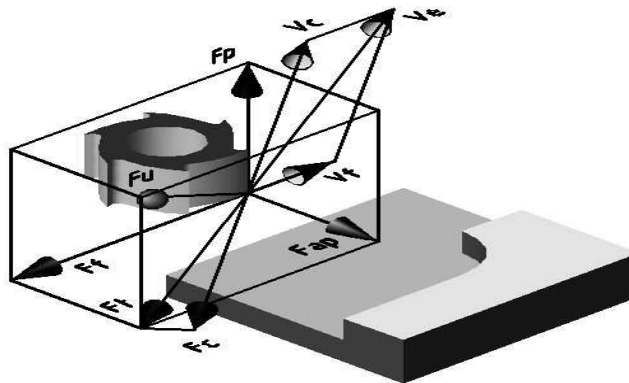


Figura 1 – Componentes das forças de usinagem nos processos de fresamento.

Como nos processos de fresamento o ângulo de direção de avanço  $\phi$  se encontra em constante variação (diferentemente dos processos de torneamento, onde este valor é sempre uma constante  $\phi = 90^\circ$ , fazendo com que a força  $F_{ap}$  se confunda com  $F_c$ ), a força ativa resultante será expressa como a resultante das componentes  $F_{ap}$ ,  $F_c$  e  $F_f$ , por meio da Equação 1:

$$\overline{F_t} = \overline{F_{ap}} + \overline{F_f} + \overline{F_c} \text{ (N)} \quad (1)$$

A força passiva ou de profundidade ( $F_p$ ) é a projeção da força de usinagem em um plano perpendicular ao plano de trabalho e não contribui para a potência de usinagem, uma vez que é perpendicular aos movimentos exercidos neste plano, onde ocorrem os movimentos de corte e de avanço. Entretanto, deve ser estudada pois é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte e, dessa forma, responsável pelas variações de tolerâncias de forma e tolerâncias dimensionais quando estas são muito rígidas.

Pode-se resumir, assim, que a força de usinagem será a resultante da força ativa –  $F_t$ , Equação 1, e da força passiva ( $F_p$ ) e expressa pela Equação 2 como:

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \text{ (N)} \quad (2)$$

À exceção da força passiva ou de profundidade ( $F_p$ ), que coincide com a força exercida no eixo Z ( $F_z$ ), as forças  $F_{ap}$ ,  $F_f$  e  $F_c$  são de difícil obtenção, como anteriormente exposto. Entretanto a sua resultante  $F_t$  (Equação 1) também pode ser obtida pela análise vetorial das forças  $F_x$  e  $F_y$ . Estas componentes da força ativa podem ser determinadas com facilidade pela utilização de um dinamômetro capaz de medir os esforços distribuídos nos planos cartesianos. Estes equipamentos medem as forças resultantes geradas no processo e as representam como distribuídas nos eixos X, Y e Z (Figura 2).

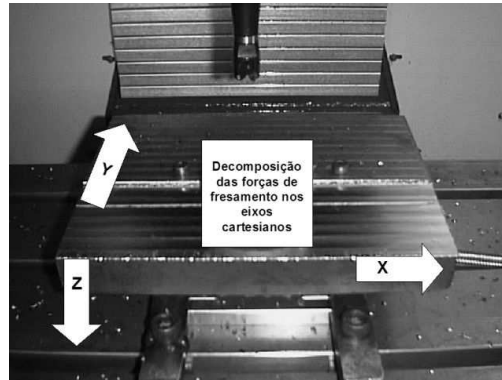


Figura 2 – Decomposição das forças de fresamento no dinamômetro Kistler.

Como as forças de usinagem variam periodicamente de acordo com a rotação do eixo, cada aresta da fresa exerce uma força para cisalhar o material, que se repete periodicamente a cada rotação. Num processo ideal de fresamento, um gráfico de força em função da posição angular seria uma senóide. Resultados encontrados por KO et al. (2002), entretanto, apresentam variações substanciais entre as forças  $F_x$  e  $F_y$  não somente em relação à sua intensidade, mas também em sua forma em relação ao ângulo de rotação da fresa, devido à complexidade da dinâmica de corte.

LAW et al. (1999) citam que, no fresamento de cavidades, a deflexão das ferramentas varia durante todo o ciclo de usinagem, incluindo não só os segmentos retos como os cantos. A exatidão da usinagem dos cantos é influenciada pela deflexão da haste e da fresa, causada pela variação das forças cortantes. A forma de melhorar a usinagem dos cantos consiste em diminuir as profundidades radiais de corte para reduzir os esforços e assim reduzir os erros da deflexão das ferramentas. Através de um efetivo planejamento de processo é possível alcançar uma redução gradual nas larguras radiais dos cortes durante a usinagem dos cantos. Assim, há uma necessidade de se identificar as condições de usinagem para controlar o processo no qual a ferramenta sofra os mínimos erros de deflexão.

LIU et al (2002) efetuaram um estudo para o prognóstico da distribuição das forças de corte nos eixos X e Y, de forma a se prever a deflexão das ferramentas. Com o objetivo de facilitar a análise do comportamento da força, construíram gráficos de força em função de avanço. A conclusão destes estudos revela uma tendência de crescimento praticamente linear das forças  $F_x$  e  $F_y$  com o aumento do avanço. Comportamento semelhante ocorreu com a força em relação a penetração de trabalho. Ainda segundo estes, a distribuição ideal de forças de corte permite evitar ou minimizar os processos de acabamento uma vez que em muitos casos basta uma usinagem de semi-acabamento para se obter a exatidão exigida nas peças fresadas.

Dentre os erros que podem ser causados pelas variações das forças de usinagem, o que exerce maior influência no acabamento e na tolerância dimensional é a deflexão da ferramenta. No fresamento de topo, a deflexão varia durante todo o processo de usinagem, tanto na usinagem de segmentos retos quanto na usinagem de cantos. A exatidão no acabamento e na tolerância dimensional é, portanto, fortemente influenciada pela deflexão da ferramenta, que é causada pela variação das forças de corte, pelo diâmetro e pelo comprimento da fresa. Deve-se buscar a melhor relação entre o comprimento e o diâmetro da fresa, a diminuição da penetração de trabalho ( $a_e$ ), o que reduzirá as forças de corte e desta forma os erros devidos a deflexão da ferramenta e, se

possível, pela diminuição da largura usinada ( $a_p$ ) no fresamento de cantos, principalmente na usinagem de cavidades.

Modelos matemáticos e algoritmos numéricos têm sido desenvolvidos para se ter uma previsão das deflexões estática e dinâmica de ferramentas. Dentre vários autores se pode citar KIM *et al* (2003) e XU *et al* (2003) que estudaram também a influência da deflexão no acabamento das superfícies.

Segundo XU *et al* (2003), sob circunstâncias estáveis do corte, a deflexão estática da ferramenta é a mais significativa do que a dinâmica. Segundo estes, os efeitos da deflexão dinâmica da ferramenta podem ser desconsiderados, uma vez que seu cálculo exigirá a elaboração de outro modelo matemático e o que se busca é conhecer os parâmetros que tornam o corte estável. Os efeitos da deflexão dinâmica serão somados à vibração da máquina e podem ser medidos com o auxílio de um acelerômetro.

Vibrações em máquinas-ferramenta produzem instabilidade no processo de usinagem, o que sempre é seguido de ruído característico e deixa marcas sobre a peça usinada. A análise dos gráficos de força pode oferecer informações sobre vibrações excessivas ou inadequadas em processos de usinagem. FOFANA (2003) cita que, se as forças de corte apresentarem flutuações dinâmicas, estas podem estar representando instabilidade no processo.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Processos de Fabricação II do Departamento de Engenharia Mecânica/Mecatrônica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas. Os testes foram realizados em um centro de usinagem ROMI modelo Discovery 560 (potência de 9,0 kW e rotação máxima de 10.000 rpm), equipado com comando numérico Siemens 810D. Para medição das forças de usinagem foi utilizado o dinamômetro Kistler, modelo 9257 BA com acessórios, placa de aquisição instalada em um computador AMD K6 e software Dynoware.

Para o desenvolvimento desta pesquisa a empresa VILLARES METALS S/A forneceu o aço para trabalho a quente denominado VHSUPER, com propriedades similares ao aço ABNT H13 e ao aço normalizado pela “Deutsches Institut für Normung” (DIN) com a denominação DIN 1.2367, tanto em relação às suas características quanto a suas aplicações, com modificações na composição química nominal, que contém 0,36% C, 0,30% Si, 3,80% Cr, 2,50% Mo e 0,50% V. O aço VHSUPER é um material indicado para a fabricação de matrizes e punções para forjamento de aços e forjamento de alta velocidade, além de extrusão de ligas de alumínio, latão e ligas de magnésio, em operações acima de 500 °C nas quais sua elevada resistência a quente pode promover expressiva melhoria de desempenho. Pode ainda ser indicado para matrizes destinadas à fundição sob pressão. É fornecido em estado recozido, com dureza máxima de 230 HB. Um tarugo com dimensões de 240 x 200 x 140 mm foi utilizado como corpo de prova.

Como ferramenta de corte foi utilizada uma fresa de topo toroidal Coromill® 300 (R300-25T12-10M) com haste de acoplamento com rosca – MAS BT (392.55T-40 12). Foram escolhidas três classes de pastilhas aplicáveis aos trabalhos de fresamento de aços alta-liga: GC4040, GC1025 e CT530, todas com geometria R300-1032E-PM. Todo ferramental foi fornecido pela empresa SANDVIK do BRASIL S/A. Segundo SANDVIK COROMANT (2001) e DINIZ *et al.* (2004), a classe GC4040 (ISO P40) é um metal duro com tamanho de grão em torno de 5  $\mu$ m, apresentando elevada tenacidade e dureza em torno de 1250 HV. Possui revestimento multicamada MT-CVD contendo TiN + TiCN + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (dureza média de 2500 HV), sendo indicada para operações que exigem tenacidade no fresamento de aços. Pode ser utilizada em velocidades médias a baixas e com ou sem utilização de fluido de corte. A classe GC1025 (ISO P10) também é um metal duro com tamanho de grãos menores que 1  $\mu$ m, com dureza média de 1650 HV e com revestimento PVD de TiCN (dureza em torno de 3000 HV). Esta pastilha é indicada para fresamento leve e médio de aços, onde a elevada resistência ao desgaste se faz necessária. Finalmente, a classe CT530 (ISO P20) é um cermet sem revestimento, com dureza em torno de 1490 HV, indicada para operações de

fresamento leve, principalmente quando se deseja usinagem sem refrigeração. A elevada resistência desse material à deformação plástica, à abrasão e à formação de aresta postiça de corte permite que as operações possam utilizar variadas gamas de velocidade de corte.

Os testes de força foram executados por fresamento frontal discordante, sem a utilização de fluido de corte e por meio de passadas no sentido do maior comprimento do corpo de prova, diminuindo assim o número de entradas e saídas da ferramenta sobre o plano de trabalho. Os parâmetros de corte utilizados foram os seguintes: velocidades de corte ( $v_c$ ) de 300, 370 e 440  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e avanços por dente ( $f_z$ ) de 0,10 – 0,15 – 0,20 e 0,25  $\text{mm}\cdot\text{rot}^{-1}$ . Foram mantidos constantes os valores de profundidade de usinagem ( $a_p = 0,50$  mm) e penetração de trabalho ( $a_e = 12,50$  mm).

Inicialmente foram feitos quatro furos de diâmetro de 8 mm no corpo de prova, para fixação por meio de parafusos sextavados, no dinamômetro já fixado à mesa da máquina. Após configuração adequada do software Dynoware, na frequência de aquisição de 400 Hz, foi feita a verificação das leituras por meio de padrões e iniciados os processos de obtenção dos dados de forças de corte nos eixos X, Y e Z. Não foram realizadas réplicas deste experimento.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de distribuição dos esforços nos eixos cartesianos, obtidas com o dinamômetro piezoelétrico, têm o aspecto mostrado na Figura 3. Pode-se verificar que, na configuração e na captura dos dados com a utilização do software Dynoware, é possível obter os valores médios, máximos e mínimos das forças medidas, após seleção da faixa de tempo relativa ao percurso da ferramenta sobre a peça em teste.

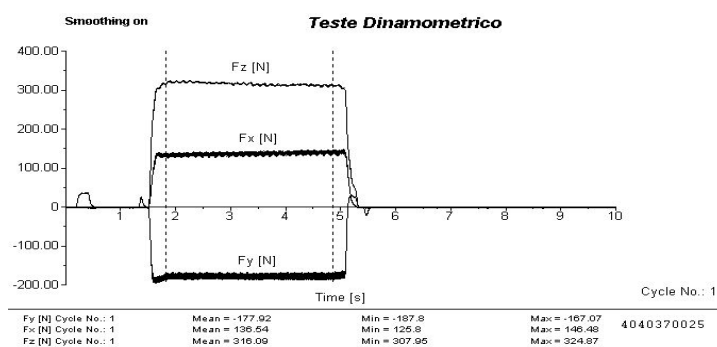


Figura 3 – Forças de usinagem (N) em função do tempo (s). Pastilha da classe 4040

( $v_c = 370$   $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e  $f_z = 0,25$  mm/aresta).

Foram analisadas as forças resultantes nos eixos X, Y e Z, sendo que a força aplicada no eixo Y ( $F_y$ ), foi representada com o sinal negativo, no gráfico, em função do posicionamento do dinamômetro sobre a base da máquina, este sinal foi corrigido quando construídos os gráficos para estudo da relação entre estas forças e os parâmetros de usinagem estabelecidos para os testes. A força resultante no eixo Z ( $F_z$ ) é coincidente com a força passiva  $F_p$ , descrita anteriormente.

Nas Figuras 4 e 5 é possível avaliar a variação da força de usinagem  $F_x$  e  $F_y$ , respectivamente, para as três classes de pastilhas analisadas, em função de diferentes velocidades de corte. É possível perceber que a variação que ocorre nas forças  $F_x$  e  $F_y$ , quando são aumentadas as velocidades de corte, não é muito significativa. Uma explicação para este fenômeno é que, embora o incremento na taxa de remoção de material seja causador do aumento da força de corte, por outro lado, o aumento na temperatura do cavaco se traduz numa diminuição da mesma, mantendo pequenas variações nos esforços gerados. Percebe-se que, das três classes de pastilhas analisadas, a classe GC1025 apresenta os menores valores de força resultante. Entretanto, há que se observar que o valor de avanço utilizado, para esta classe, foi ligeiramente inferior aos demais.

Todos os gráficos foram traçados com a mesma escala para facilitar a comparação dos dados apresentados entre eles.

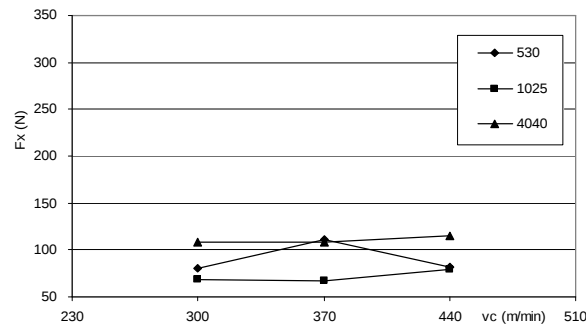


Figura 4 – Força de usinagem –  $F_x$  em função da velocidade de corte para as três classes de pastilhas testadas (530 e 4040:  $f_z = 0,15$  mm/aresta e 1025:  $f_z = 0,10$  mm/aresta).

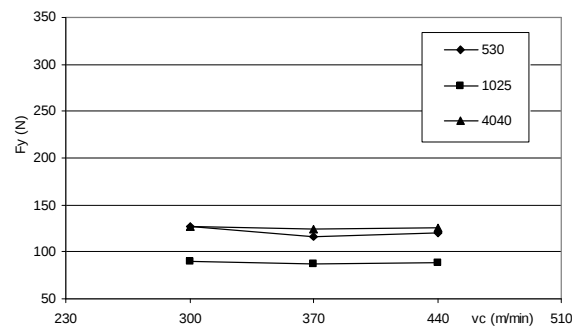


Figura 5 – Força de usinagem –  $F_y$  em função da velocidade de corte para as três classes de pastilhas testadas (530 e 4040:  $f_z = 0,15$  mm/aresta e 1025:  $f_z = 0,10$  mm/aresta).

Na Figura 6 é apresentada a variação da força passiva ( $F_p / F_z$ ) para as três classes de pastilhas analisadas, em função de diferentes velocidades de corte. Neste caso, percebe-se que existe um substancial incremento da força resultante no eixo Z, para as pastilhas da classe GC4040. Entretanto, a ferramenta CT530 (cermet) manteve variação mais moderada e a GC1025 apresentou um incremento substancial apenas com  $v_c = 440$  m.min<sup>-1</sup>, possivelmente devido ao fato de estar trabalhando com condições de corte muito acima do recomendado.

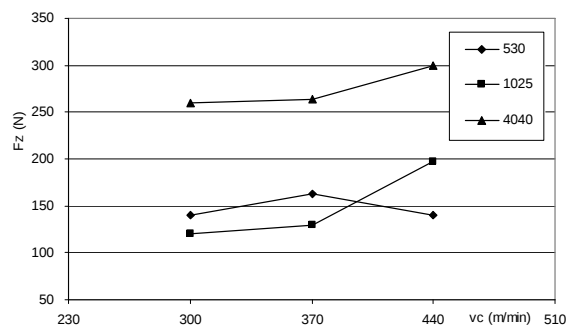


Figura 6 – Força de usinagem –  $F_p / F_z$  em função da velocidade de corte para as três classes de pastilhas testadas (530 e 4040:  $f_z = 0,15$  mm/aresta e 1025:  $f_z = 0,10$  mm/aresta).

Na comparação da evolução das forças de usinagem  $F_x$  e  $F_y$  geradas no plano de trabalho em função dos avanços estudados observa-se, respectivamente, nas Figuras 7 e 8 a evolução quase linear do esforço em função do avanço. Nota-se a proximidade desta tendência ao se comparar as três classes de pastilhas avaliadas. O aumento do avanço produz um aumento do volume de material arrancado em função do tempo, resultando em maiores esforços gerados.

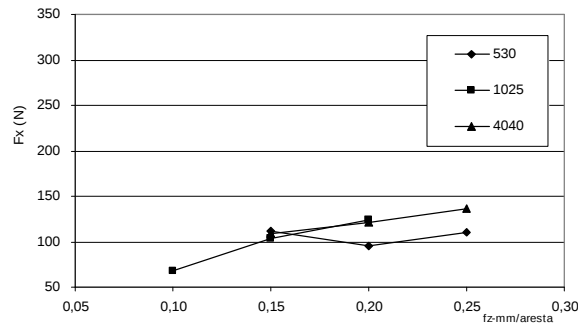


Figura 7 – Força de usinagem –  $F_x$  em função do avanço por aresta para as três classes de pastilha testadas ( $v_c = 370 \text{ m.min}^{-1}$ ).

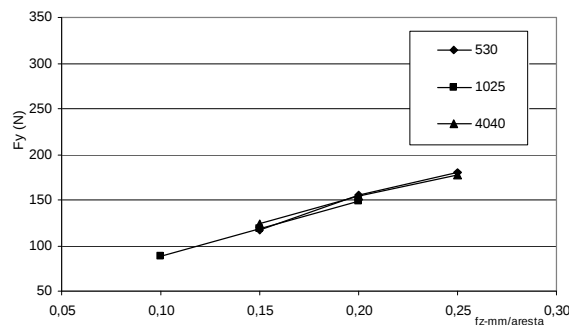


Figura 8 – Força de usinagem –  $F_y$  em função do avanço por aresta para as três classes de pastilha testadas ( $v_c = 370 \text{ m.min}^{-1}$ ).

O aumento da força passiva ( $F_p / F_z$ ) em função do avanço por aresta, mantendo-se a velocidade de corte constante, é percebido na Figura 9 principalmente para as classes GC4040 e GC1025. A classe CT530 apresenta variação desprezível na força de usinagem neste eixo.

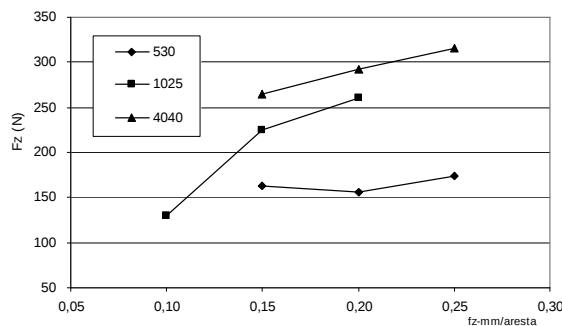


Figura 9 – Força de usinagem –  $F_p / F_z$  em função do avanço por aresta para as três classes de pastilha testadas ( $v_c = 370 \text{ m.min}^{-1}$ ).

Pode-se verificar que o incremento do avanço é o parâmetro mais importante no aumento da força de usinagem nos três eixos. O aumento da velocidade de corte não produz incrementos significativos de força de usinagem.

Na comparação entre as classes de pastilha utilizadas, empregando-se velocidade de corte constante  $v_c = 370 \text{ m.min}^{-1}$ , a variação do avanço por aresta resulta num ligeiro aumento na força de usinagem  $F_x$  (Figura 10) para as classes GC1025 e GC4040 e um ligeiro decréscimo para a classe CT530. Na avaliação da força de usinagem  $F_y$  esta variação é mais significativa para todas as classes avaliadas, como se verifica na Figura 11.

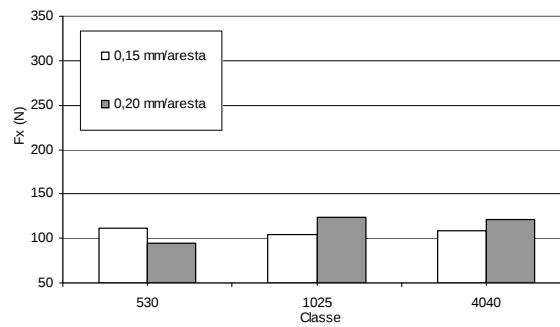


Figura 10 – Força de usinagem –  $F_x$  em função da classe de pastilha avaliada, para os avanços por aresta –  $f_z = 0,15$  e  $0,20$  mm/aresta, respectivamente ( $v_c = 370$  m.min<sup>-1</sup>).

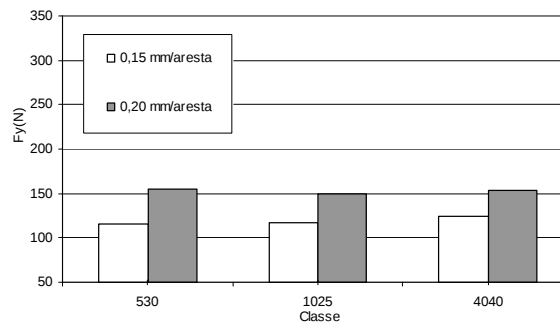


Figura 11 – Força de usinagem –  $F_y$  em função da classe de pastilha avaliada, para os avanços por aresta –  $f_z = 0,15$  e  $0,20$  mm/aresta, respectivamente ( $v_c = 370$  m.min<sup>-1</sup>).

Pode-se perceber o aumento na força passiva ( $F_p / F_z$ ) na Figura 12, para as classes GC1025 e GC4040. Observa-se que a pastilha da classe CT530 (cermet) apresentou valores de força bastante próximos, com ligeiro decréscimo com o aumento do avanço, diferente do que ocorreu com as ferramentas de metal duro.

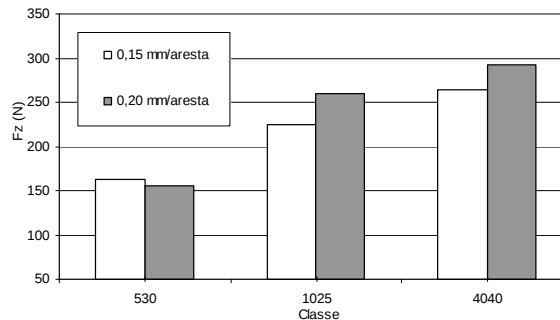


Figura 12 – Força de usinagem –  $F_p / F_z$  em função da classe de pastilha avaliada, para os avanços por aresta –  $f_z = 0,15$  e  $0,20$  mm/aresta, respectivamente ( $v_c = 370$  m.min<sup>-1</sup>).

A pastilha de cermet, classe CT530, foi a que apresentou os menores valores de força passiva, na comparação com as pastilhas de metal duro revestido (GC1025 e GC4040). Como esta componente é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte, esta análise pode permitir a escolha da ferramenta que apresente menores variações de tolerâncias de forma e tolerâncias dimensionais, se estes fatores forem os mais significativos.

#### 4. CONCLUSÃO

Dentre os parâmetros avaliados, o avanço foi o mais expressivo na análise dos fatores que influenciaram as forças de usinagem. O aumento do avanço apresentou, como consequência, o aumento destas forças, em especial o da força passiva ( $F_p / F_z$ ). Ao serem comparadas as três classes

de ferramentas testadas, as pastilhas da classe CT530 apresentaram os menores valores de força passiva e as da classe GC4040 os maiores, com as da classe GC1025 ocupando uma posição intermediária neste aspecto.

O aumento da velocidade de corte também resultou no aumento de forças de usinagem. Entretanto este aumento se deu de forma bem menos significativa do que o obtido com o aumento do avanço. Somente na avaliação da força passiva, quando as ferramentas GC4040 e CT530 foram solicitadas na  $v_c = 440 \text{ m.min}^{-1}$  é que ocorreu um aumento significativo das forças obtidas na leitura do dinamômetro.

Estes estudos permitem a escolha de condições de corte que combinem produtividade com baixos valores de forças de usinagem, e conseqüentemente, menores esforços, que são causadores de deflexão nas ferramentas. Os componentes usinados terão, como resultado maior qualidade dimensional e geométrica.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Rede de Materiais para Usinabilidade Melhorada (REMAUSME), ao CNPq, à Villares Metals S/A, à Sandvik do Brasil S/A e à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

## 6. REFERÊNCIAS

- Diniz, Anselmo E.; Marcondes, Francisco C.; Coppini, Nivaldo L. "Tecnologia da Usinagem dos Materiais". São Paulo: MM Editora, 1999. 244 p.
- Diniz, Anselmo E., Ferreira, J. R., Silveira J.F. "Toroidal Milling of Hardened SAE H13 Steel". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. Vol. XXVI. Nº 1, pág. 17-21. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, Artigo, 2004. 5 p.
- Fofana, M.S. "Delay Dynamical Systems and Applications to Nonlinear Machine-tool Chatter". Pergamon. Chaos Solitons & Fractals. Vol. 17. pág. 731-747. Artigo. 2003. 17 p.
- International Organization for Standardization – ISO. "International Standard – ISO 513 – Classification and Application of Hard Cutting Materials for Metal Removal with Defined Cutting Edges –Designation of the Main Groups and Groups of Application". Genève, Switzerland. 2004. 3 p.
- Kim, G.M., Kim, B.H., Chu, C.N. "Estimation of Cutter Deflection and Form Error in Ball-end Milling Processes". Pergamon. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 43. pág. 917-924. Artigo. 2003. 8 p.
- Ko, J.H., Yun, W-S, Cho, D-W, Ehman, K.F. "Development of a Virtual Machining System, Part 1: Approximation of the Size Effect for Cutting Force Prediction". Pergamon. Machine Tools and Manufacture. Vol. 42. pág. 1595-1605. Artigo. 2002. 11 p.
- Law, K.M.Y., Geddam, A., Ostafiev, V.A. "A Process-design Approach to Error Compensation in the End Milling of Pockets". Elsevier. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 89-90. pág. 238-244. Artigo. 1999. 7 p.
- Liu, X.-W, Cheng, K., Webb, D., Luo, X.-C. "Prediction of Cutting Force Distribution and its Influence on Dimensional Accuracy in Peripheral Milling". Pergamon. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 42. pág. 791-800. Artigo. 2002. 10 p.
- Sandvik Coromant. "Ferramentas Rotativas". Suécia: Catálogo. 2001.
- Xu, A.-P., Qu, Y.-X, Zhang, D.-W., Huang, T. "Simulation and Experimental Investigation of the End Milling Process Considering the Cutter Flexibility". Pergamon. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 43. pág. 283-292. Artigo. 2003. 10 p.

## CUTTING FORCES ASSESSMENT WHEN MILLING A TOOL STEEL

**José Luiz Silva Ribeiro**

Pontifical Catholic University of Minas Gerais

Av. Dom José Gaspar, 500, Cor. Eucarístico, Belo Horizonte, MG, ribeirojls@pucminas.br

**Alexandre Mendes Abrão**

University of Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, abrao@ufmg.br

**Wisley Falco Sales**

Pontifical Catholic University of Minas Gerais

Av. Dom José Gaspar, 500, Cor. Eucarístico, Belo Horizonte, MG, ribeirojls@pucminas.br

**ABSTRACT:** *this work is concerned with the machining forces generated during face milling of VHSUPER tool steel, aiming to identify the machining parameters which result in lower forces, and therefore, will lead to lower tool deflection and consequently superior dimensional and geometric quality for the machined component. The machining parameters assessed were: cutting speed ranging from 300 to 440 m.min<sup>-1</sup>, feed per tooth from 0,1 to 0,25 mm.rev<sup>-1</sup> and three tool grades (two coated carbide and one cermet). The results indicated that, in general, feed per tooth was the parameter which most affected the machining forces. Among the tool materials, the cermet promoted lower forces.*

**Keywords:** *milling, milling forces, tool steel.*