

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTA CERÂMICA DE Si_3N_4 EM HSM DE FOFO GG25 NO FRESAMENTO DE PERFIL ¹

Jorge Eduardo Guenza ²

Milton Luiz Polli ³

Paulo André de Camargo Beltrão ⁴

Resumo

O fresamento HSC (*High Speed Cutting*) é utilizado principalmente em usinagem de peças monolíticas para indústria aeroespacial, na fabricação de moldes e matrizes e na indústria de autopeças. Aplicações atuais de alta velocidade utilizam os conceitos HSM (*High Speed Machining*) com ferramentas de pequeno diâmetro (tipicamente 10 a 20 mm) e pequenas profundidades de corte. As velocidades de avanço, acelerações e desacelerações exigem máquinas especialmente construídas e de pequenas dimensões. Este artigo busca subsídios para a implementação de altas velocidades no fresamento em outros ramos da usinagem. Foi avaliada a aplicação de fresamento HSC de ferro fundido cinzento classe GG25, em substituição ao fresamento convencional. A execução em centro de usinagem horizontal CNC comum, com ferramentas intercambiáveis de dimensões compatíveis com as rotações disponíveis em máquinas convencionais (máximo 10000 rpm), simula a viabilidade da aplicação em máquinas e ferramentas sem características especiais para alta velocidade. Busca-se através da análise dos resultados obtidos experimentalmente, determinar quais parâmetros são mais influentes e qual a técnica mais adequada de medição a ser implementada em “chão de fábrica” para otimizar a vida da ferramenta, a potência consumida durante o corte e o tempo de usinagem. Foram executados testes para determinação do comportamento de usinagem na faixa de velocidades de transição entre o corte convencional e HSC.

Palavras-chave: Usinagem de ferro fundido; Materiais cerâmicos.

WEARING BEHAVIOR ANALYSIS OF Si_3N_4 CERAMIC CUTTING TOOL IN HSC PROFILE MILLING OF CAST IRON GG25 GRADE

Abstract:

HSC techniques are widely spread out and studied in the operations of manufacture of die and molds. On these applications are used small diameter tools with high spindle rotations (typically above of 15000 rpm), great feed rates and small cutting depths. This work search, among others objectives, to verify the applicability of HSM in typically conventional processes, supplying information regarding to the HSC application to the general manufacture industry.

Key words: Cast iron cutting; High Speed Cutting; Ceramic materials.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestrando – PPGEM – UTFPR Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM. Telefone: 41 – 3227 – 2948. E-mail: guenza@brturbo.com.br

³ Dr. – PPGEM - UTFPR

⁴ Ph-D – PPGEM - UTFPR

1 INTRODUÇÃO

As aplicações de HSC concentram-se principalmente na área de usinagem de matrizes, peças aeronáuticas e autopeças. Os dois primeiros têm como características a usinagem de componentes monolíticos, onde grande parte da matéria-prima é transformada em cavaco, utilizando ferramentas de pequeno diâmetro, altas rotações de fuso, pequenas profundidades de corte e altos avanços. Já a indústria de autopeças tem como característica a produção seriada de grandes lotes, facilitando o monitoramento do processo e determinação de parâmetros ótimos em HSC. Em outros ramos da indústria a dificuldade é justamente a obtenção de parâmetros de corte adequados em máquinas que possuem limitações estruturais e dinâmicas, aliadas à variedade e aos pequenos lotes de peças produzidas.

Em HSC é necessário cuidado especial com a vida da ferramenta. A utilização de parâmetros (ie. profundidade e avanço) incorretos leva ao desgaste prematuro. Segundo a teoria clássica da usinagem, com o aumento da velocidade de corte o desgaste da ferramenta aumenta exponencialmente.⁽¹⁾ Assim em HSC é necessária a aplicação de ferramentas que tenham vida satisfatória com as velocidades empregadas para minimizar o setup de ferramenta. Porém, o aumento da velocidade sem diminuição da vida aumenta a quantidade de peças obtidas por aresta de corte, o que dificulta o acompanhamento do desgaste de flanco (V_b) das ferramentas mais resistentes, nos lotes de produção pequenos. Além disso, materiais cerâmicos como o Si_3N_4 podem não apresentar desgaste perceptível, chegando ao fim da vida com fratura catastrófica, dependendo da faixa de velocidades empregadas. O monitoramento adequado da vida é fundamental em HSC pois, as altas rotações e velocidades de avanço podem causar graves acidentes nas quebras mais severas. Isto exige a avaliação dos mecanismos envolvidos durante o corte, as propriedades dos materiais e as características tribológicas do sistema para o emprego seguro e otimizado de fresamento HSC.

1.1 Características HSC

A aplicação de alta velocidade de corte objetiva a redução do tempo de usinagem. Porém, o simples aumento da velocidade de corte, sem a utilização de parâmetros adequados pode levar ao desgaste prematuro da ferramenta ou inviabilidade econômica do processo. Altas rotações de fuso exigem ferramentas com características especiais como elevada rigidez mecânica, balanceamento e batimento.⁽²⁾ Contudo, ferramentas de materiais mais resistentes podem custar de 3 a 10 vezes mais que materiais comuns (i.e. metal duro sem cobertura X Cerâmica ou CBN). Na utilização de materiais de corte mais nobres é preciso o estudo minucioso do comportamento de usinagem, para garantir o melhor aproveitamento dos recursos. Na utilização de cerâmica de Si_3N_4 (Nitreto de Silício), foi observado que em determinadas combinações de parâmetros de corte a vida da ferramenta pode ultrapassar 180 m de comprimento usinado por aresta (L_{fz}) sem aparecimento de desgaste de flanco (V_b) pronunciado,⁽³⁾ mesmo em velocidades de corte superiores às indicadas pelos fabricantes de ferramenta.⁽⁴⁾ A Figura 1 enfatiza a importância da avaliação de parâmetros para obtenção de vida útil satisfatória.

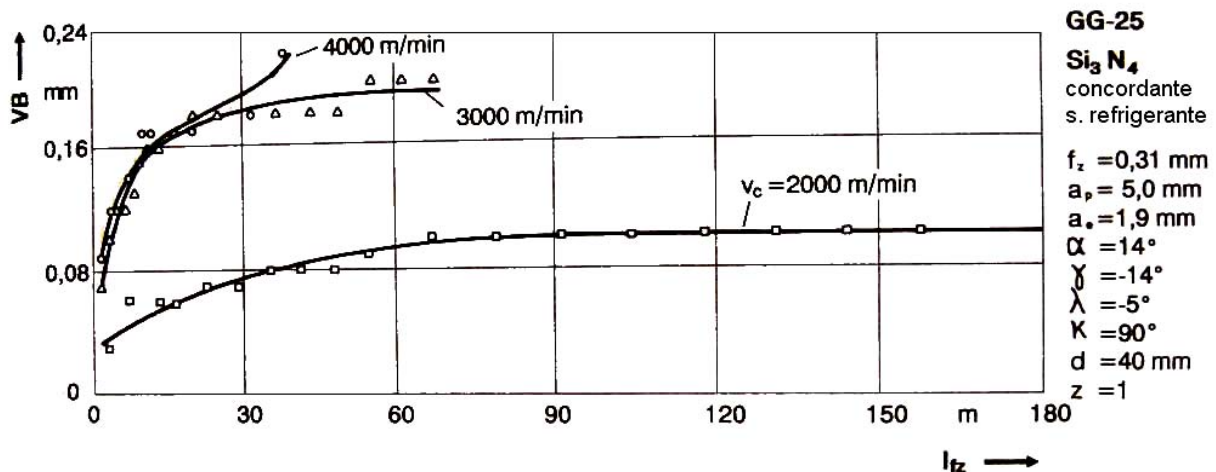


Figura 1. Desgaste de flanco V_b em função da velocidade de corte V_c .⁽³⁾

As profundidades de corte radial (a_e) e axial (a_p) também são fundamentais para otimização da vida da ferramenta. O a_p não tem influência decisiva na vida do ferramental,⁽³⁾ mas sim na potência de corte. Embora sejam atingidas maiores temperaturas na região de corte,⁽⁵⁾ a taxa de desgaste é pouco afetada por este parâmetro. Menores a_p em fresamento frontal e a_e em fresamento tangencial são normalmente utilizados.⁽⁶⁾ Em HSC as profundidades de corte são menores, o que é compensado pelos altos avanços, resultando em taxas de remoção de material (Q) maiores. A profundidade axial muda o ângulo de contato φ , influenciando diretamente a vida da ferramenta. A diminuição de φ possibilita maior tempo em vazio (menor tempo em corte efetivo), maior dissipação do calor e conseqüente maior vida e volume final Q_L (mm^3) de material removido pela ferramenta. Ou seja, o desgaste é menor para menor φ , possibilitando o aumento da velocidade acima das velocidades convencionais.⁽⁷⁾ Outro aspecto importante a ser considerado no uso de pequenas a_e em corte tangencial é a rigidez da ferramenta. Os menores ângulos de contato utilizados diminuem a estabilidade do corte, e ao trabalhar com largura de corte muito pequena, o centro da ferramenta fica fora da região de corte gerando forças radiais e conseqüente vibração da ferramenta segundo a freqüência de passagem dos dentes. Dependendo da amplitude da vibração e da tenacidade da ferramenta de corte, este efeito pode causar a fadiga e conseqüente quebra prematura. Desta forma a utilização de fixação, de ferramentas rígidas e parâmetros de corte adequados são fundamentais.

1.2 Usinagem de Ferro Fundido

O ferro fundido GG-25 se enquadra na categoria lamelar, com resistência à tração aproximada 310 N/mm^2 e dureza típica entre 180 e 220 Hb, apresentando característica frágil ao usinar, com cavaco curto e quebradiço. O cavaco é gerado por propagação de trincas, formando pequenos segmentos que em baixas velocidades acabam se soldando devido às altas pressões e temperaturas (caldeamento) geradas no contato com a face da ferramenta (Figuras 2a e 2b).⁽³⁾



Figura 2. a) foto lateral de cavaco de GG-25 usinado a 750 m/min



Figura 2. b) foto da superfície do cavaco de GG-25 usinado a 750 m/min

À medida que a velocidade de corte aumenta, cresce a velocidade de propagação das trincas, e há menos tempo para que o calor seja conduzido o que aliado à maior energia cinética fornecida aos segmentos, diminui a tendência de formação da “solda” destes segmentos, reduzindo o tamanho do cavaco. Isto facilita a sua expulsão, diminuindo o tempo de contato com a face da ferramenta e conseqüente transferência de calor, contribuindo positivamente para redução do desgaste. A temperatura da ferramenta se mantém a níveis suportáveis, proporcionando tempo de vida adequada mesmo com o aumento significativo da velocidade de corte. A maior parte do calor é transportada para fora da região de corte pelo cavaco. Assim, menos de 2% do calor gerado durante o corte é transferido à peça,⁽³⁾ mantendo a temperatura da peça praticamente inalterada, possibilitando melhor precisão dimensional na usinagem. Pesquisas⁽³⁾ apontam que a velocidade em que se iniciam as mudanças no comportamento do cavaco e do fluxo de calor é da ordem de 750 m/min, sendo a partir desta velocidade considerado o corte em alta velocidade para o ferro fundido cinzento.

1.3 Comportamento do Si_3N_4

A característica principal do Si_3N_4 como ferramenta de corte de GG-25 é que o desgaste não é facilmente identificável. Ocorrem microtrincas devido a reações químicas entre os cristais mistos de Si_3N_4 , fase vítrea da cerâmica, ferro e o oxigênio. Essa difusão de componentes fragiliza o material da ferramenta levando a microlascamentos (Figura 3), difíceis de serem identificados sem o uso de microscopia.

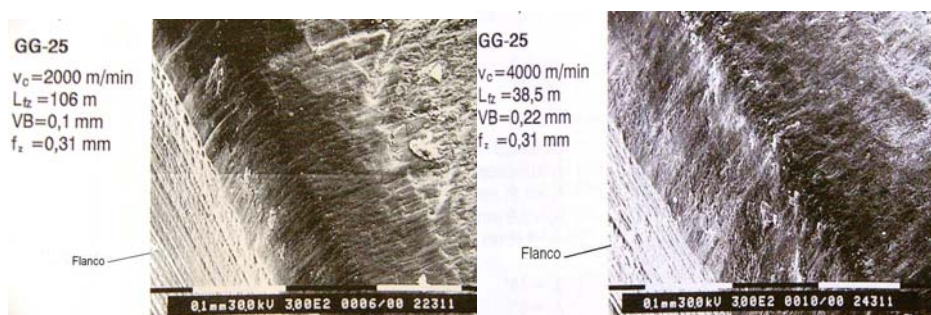


Figura 3. Micrografia da superfície de ferramenta cerâmica Si_3N_4 para velocidades de corte de 2000 e 4000 m/min (ampliação 300 x).⁽³⁾

Aliada à difusão ocorre a presença de sollicitação mecânica e térmica cíclicas. Embora o material seja bastante tenaz e tenha boa condutividade térmica quando comparado a outras cerâmicas, isso leva a falha catastrófica com destruição da aresta de corte, sem que haja aparecimento de V_b pronunciado. Para contornar este problema técnicas de monitoramento das condições de corte através de sensores vêm sendo constantemente aprimoradas.⁽⁸⁻⁹⁾ A análise acústica do processo é uma ferramenta importante e de implementação mais simples do que a medição direta de vibração e esforços de corte, porém em ambas a interpretação dos resultados necessita de conhecimentos específicos. O acompanhamento da evolução do desgaste pode ainda ser verificado através do acabamento superficial e a avaliação das marcas de desgaste na face da ferramenta, o que é mais simples de ser verificado em ambiente fabril.

É indispensável o ajuste preciso do posicionamento dos inserts (“pré-set”), a fim de garantir o menor batimento possível, pois cada 0,01 mm de batimento pode levar a redução de 50% na vida da ferramenta.⁽²⁾ Para identificação de desgaste é apropriado o monitoramento do acabamento superficial da peça, uma vez que os microlascamentos causam as chamadas marcas em forma de pente e aumento na rugosidade⁽³⁾ nas operações de acabamento.

As sollicitações do gume de corte podem ser reduzidas com aumento do avanço por face f_z . Ensaios realizados com outras classes de material cerâmico⁽¹⁰⁾ demonstram que este comportamento se mantém também no torneamento HSC, evidenciando a característica do material. Ainda no tocante ao desgaste, diferentemente do que ocorre na usinagem convencional, não foi percebida influência do ângulo de saída γ .⁽³⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os recursos utilizados e suas características são resumidos na Tabela 1:

Tabela 1. Recursos utilizados e especificações técnicas

Recurso	Especificação
Máquina	Centro de usinagem Thyssen NBH 350 Fuso: máx. 10000 Rpm - 46 kW Curso: X = 1800; Y = 1600 e Z = 1400 mm Avanço: máx. 30 m/min - 25 kN - 0,4g
Corpo de prova	Segmento curvo R = 600 mm, C = 900mm, largura 40 - 78 mm Material: ferro fundido GG25 dureza 188 a 212 Hb - forno a indução
Durômetro portátil	Modelo Equotip fabricante Proceq
Ferramenta de corte	Inserto cerâmico Si3N4 - código TNCN 1204 AN 690 - Sandvik Geometria: raio de quina 2,5 mm, $\gamma = -7^\circ$, $K_r = 45^\circ$ e inclinação -4°
Suporte ferramenta	L260.3.100M-10, diâmetro 100 mm, z =14 - Sandvik Raio de corte (pré-set) = 53,67 mm
Pré-set	Modelo REDO VQ 00052 - Zoller
Alicate amperímetro	Modelo Campmeter 36 - Fluke
Rugosímetro	Surftest 211 - Mitutoyo (ganho 0,8 mm)
Termômetro	Infravermelho modelo Raynger ST - Raytec

Inicialmente foram executados ensaios para avaliar se a ferramenta suportaria as condições de corte e se a máquina teria potência suficiente. Como a potência constitui parcela importante nos custos de produção buscou-se através da medição direta da potência de corte verificar o seu comportamento à medida que a velocidade de corte foi aumentando. Para determinação da potência consumida foi utilizada a medição direta de corrente elétrica na entrada dos acionamentos a cada condição ensaiada. Medidas foram feitas durante a execução do programa em vazio (I_0) e em corte efetivo para calcular a corrente líquida consumida no corte. Os valores da potência líquida foram calculados a partir destes valores medidos segundo a equação:

$$P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\varphi) \cdot \eta \quad (1)$$

, onde P é a potência mecânica disponível, φ é o fator de potência do motor e η é o rendimento. Para o acionamento em questão (tipo PWM) o fator de potência pode ser desconsiderado. O rendimento mecânico é considerado ao diminuir a potência consumida em vazio da potência em corte podendo ser eliminado da equação. Assim temos:

$$P_{liq} = P_o - P \quad \text{ou,} \quad P_{liq} = U \cdot (I - I_0) \cdot \sqrt{3} \quad (2) \text{ e } (3)$$

A potência teórica consumida durante o corte está diretamente relacionada com a taxa de remoção de material, ou seja, volume de material removido na unidade de tempo. A equação 4 abaixo, quantifica esta relação:

$$P_t = E_c \cdot Q \quad (4)$$

, onde P_t é a potência teórica consumida durante o corte, E_c é a energia específica de corte ($1,61 \text{ J} / \text{mm}^3$ para o ferro fundido cinzento) e Q é a taxa de remoção de material em mm^3 / min .⁽¹¹⁾ Foram calculados os valores de potência de corte segundo as teorias clássicas de Kronenberg e Kienzle,⁽¹²⁾ entretanto os valores calculados divergiram muito das medições, não sendo apropriados para cálculos nas faixas de velocidades empregadas.

Para verificar o comportamento de usinagem em relação à velocidade de corte, na primeira fase dos testes a profundidade de corte A_p e o avanço por dente f_z foram mantidos constantes em 3 mm e 0,15 mm respectivamente (Tabela 2). Como o corpo de prova apresentava duas regiões com larguras de corte diferentes (40 e 78 mm) foram medidos os valores de corrente máxima (I_{max}) na região de 78 mm e corrente mínima (I_{min}) na região de 40 mm. Obtendo-se das equações 2 e 3 os valores de P_{min} (em 40 mm) e P_{max} (em 78 mm). Os valores da potência teórica (P_t) foram obtidos com a equação 4, sendo P_{tmin} a potência teórica na largura fresada 40 mm e P_{tmax} a potência em 78 mm. Os resultados dos cálculos são apresentados na Figura 4.

Na segunda fase, os testes foram realizados com variação de A_p , f_z e V_c para verificar sua influência no processo (Tabela 3). Foi medida a temperatura do corpo de prova ao final de cada passe com termômetro infravermelho. Para evitar interferência na emissividade do material e a rápida dissipação do calor, a usinagem foi sem refrigeração em todos os ensaios. O objetivo da medição de temperatura da peça foi verificar sua variação na região de transição HSC e comprovar sua diminuição ao passar para o regime de alta velocidade.⁽⁵⁾ A transferência para ao cavaco de maior parte do calor gerado foi analisada pela observação de mudança no mecanismo de formação e conseqüente mudança de forma e tamanho do cavaco, além de verificação de coloração diferente. A medição de rugosidade foi executada somente a título de

comparação, pois por se tratar de um processo de desbaste grosseiro, o objetivo não foi a obtenção de melhor acabamento superficial. A observação do acabamento teve por objetivo principal a verificação da ocorrência de vibração durante a usinagem, o que poderia levar a quebra prematura da ferramenta.

3 RESULTADOS

3.1 1ª Etapa – Testes Preliminares

Os valores medidos e valores teóricos calculados através das equações 1 a 4 são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2. Valores de potência (Pmax e Pmin) obtidos através da medição de corrente de alimentação dos acionamentos principais (eixos e fuso). Profundidade de corte $A_p = 3$ mm e avanço por fca $f_z = 0,15$ mm. (Ptmin e Ptmax são as potências teóricas de corte)

Vc (m/min)	f (mm/min)	n (Rpm)	lo (A)	lmin (A)	lmax (A)	Pmin (kW)	Pmax (kW)	Ptmin (kW)	Ptmax (kW)
250	1670	795	5,5	16	22	6,91	10,86	5,38	10,48
400	2670	1273	5,8	22	35	10,66	19,22	8,61	16,79
600	4007	1909	6	30	48	15,80	27,64	12,91	25,17
800	5342	2547	6	36	56	19,75	32,91	17,22	33,58
1000	6678	3180	5,5	43	70	24,68	42,45	21,50	41,93
1200	8014	3816	6,3	53	87	30,74	53,12	25,80	50,32

Na Figura 4 são resumidos os resultados da primeira fase de ensaios, onde se observa o comportamento da potência efetiva de corte P com o aumento da velocidade de corte.

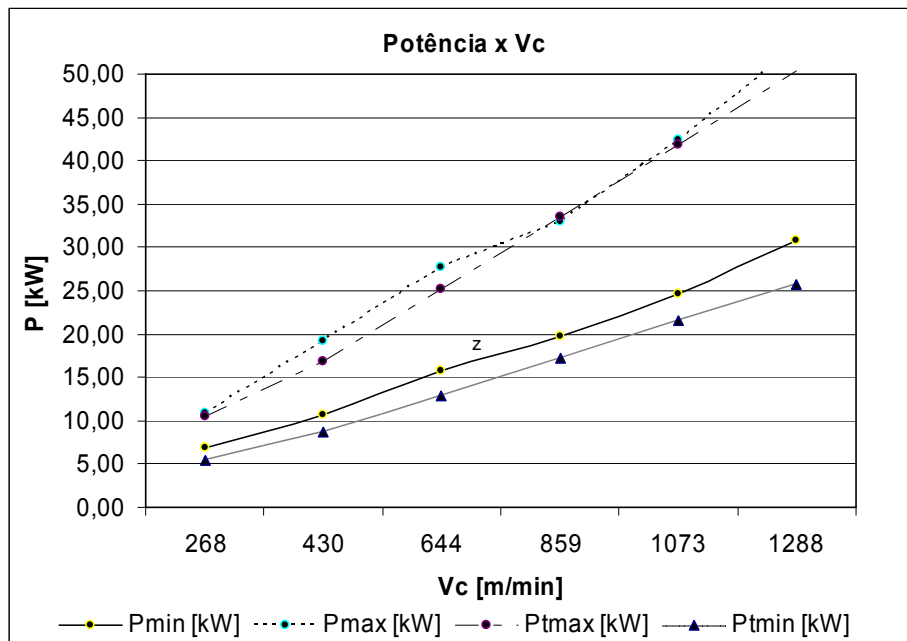


Figura 4. Gráfico de variação da potência em relação à velocidade de corte. Pmax/min indicam os valores para larguras máxima e mínima de corte. O sufixo t remete aos valores teóricos máximos e mínimos.

A ligeira mudança no comportamento da potência de corte entre as velocidades de 600 e 800 m/min, demonstrada na Figura 4, coincide com a faixa de transição (750 m/min) indicada por Schulz.⁽³⁾ Outro resultado obtido nesta fase foi confirmar que o sistema máquina / ferramenta suportou bem as condições de corte, possibilitando a execução dos ensaios da segunda fase, onde foi aumentada a velocidade de corte e a taxa de remoção de material. O Si₃N₄ se mostrou bastante tenaz, suportando as condições de corte interrompido e velocidades empregadas sem demonstrar marcas macroscópicas de desgaste.

3.2 2ª Etapa – Variação de Parâmetros e Avaliação de Resultados

Na segunda etapa foram executados novos testes, a fim de avaliar as influências dos outros parâmetros de corte. Foram utilizadas combinações de V_c , A_p , e f_z e medidos os valores de corrente elétrica máxima, segundo o procedimento descrito no item 3. A Tabela 3 resume os parâmetros empregados na 1ª e na 2ª etapa e a Figura 5 apresenta o resultado dos cálculos para as duas etapas:

Tabela 3. Parâmetros de corte empregados durante os ensaios e valores de rugosidade e temperatura obtidos na fase 2

V_c (m/min)	Etapa	f_z (mm/dente)	A_p (mm)	R_a (μm)	T (°C)
268	1	0,15	3	-	-
430	1	0,15	3	-	-
644	1	0,15	3	-	-
	2	0,3	2	2,9	29
859	1	0,15	3	-	-
	2	0,3	2	1,8	28
1073	1	0,15	3	-	-
	2	0,3	2	2,4	29
1288	1	0,15	3	-	-
	2	0,3	2	2,3	29
	2	0,15	4	1,45	29
1931	2	0,3	2	2,7	29

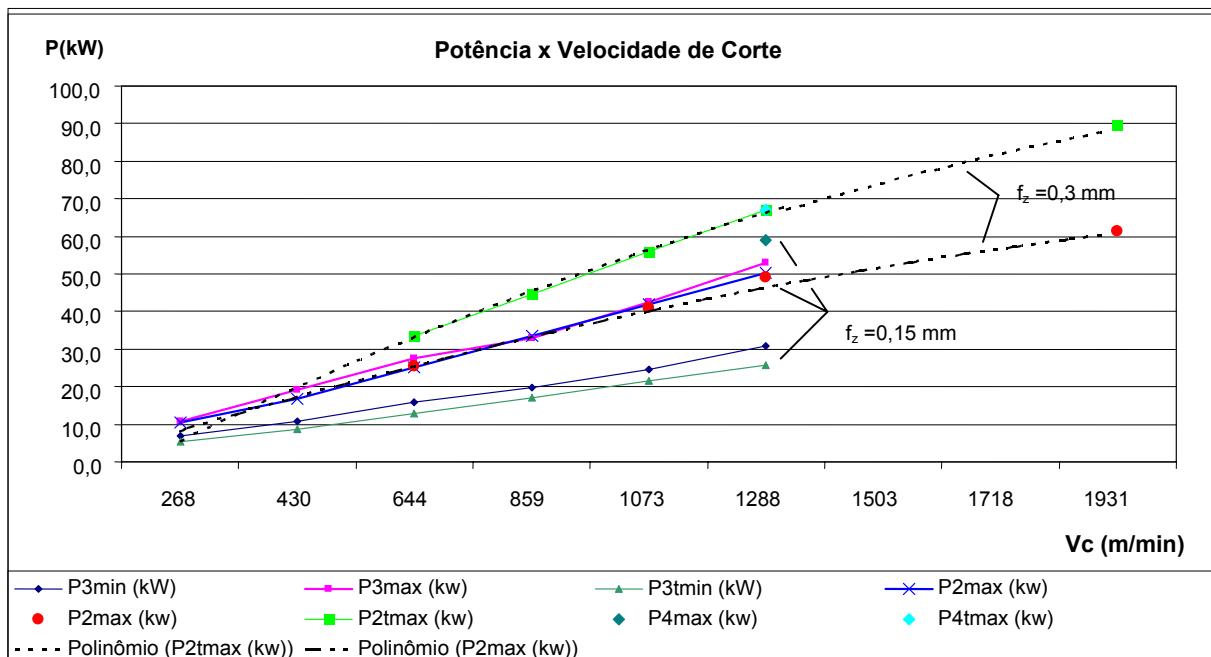


Figura 5. Gráfico de variação da potência em relação à velocidade de corte. P(x)max/min indicam os valores para profundidade de corte x máximo e mínimo respectivamente. O sufixo t remete aos valores teóricos máximos e mínimos.

A Figura 5 evidencia que diferença entre a potência teórica e a efetiva aumenta com a velocidade, indicando economia de energia e redução proporcional das forças de corte em altas velocidades. Isto explica a possibilidade da execução de ensaios a 1931 m/min sem sobrecarga do acionamento do fuso da máquina.

A temperatura da peça e a rugosidade superficial foram medidas ao final de cada passe. A rugosidade Ra é a média entre três leituras executadas em diferentes regiões da peça, com o ganho do rugosímetro ajustado em 0,8 mm. A tabela 3 mostra que não foi percebida influência dos parâmetros empregados na temperatura de corte e que nos resultados da medição de rugosidade não se percebe influência direta da velocidade. Não se pode evidenciar nos ensaios a presença dos benefícios do HSC em relação à temperatura e melhoria no acabamento.⁽¹³⁾

Foram coletadas amostras de cavacos em algumas condições de corte na tentativa de encontrar tais evidências, ou seja, através de mudanças no mecanismo de formação do cavaco ou coloração devido a temperaturas mais elevadas. A Figura 6 apresenta algumas amostras de cavacos obtidas nos ensaios:

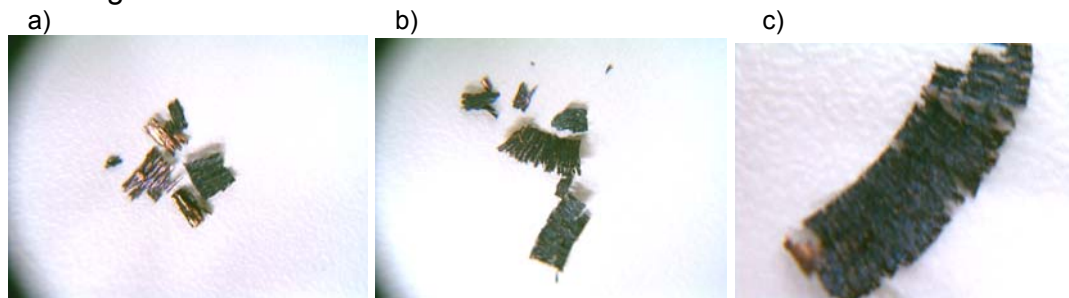


Figura 6. Cavacos de GG25 obtido a 644 (a), 1288 (b) e 1931 m/min (c), $f_z = 0,3$ mm, $A_p = 2$ mm.

Foi constatado que o cavaco gerado em velocidades maiores apresentou estrutura menos coesa e por isso mais leve e quebradiça, o que pode ser explicado pela redução do efeito de caldeamento das lamelas descrita por Schulz.⁽³⁾ O cavaco curto não possibilita distinguir macroscopicamente alteração nos mecanismos de formação do cavaco e em sua geometria. Percebeu-se somente centelhamento intenso durante a usinagem a partir de 1073 m/min, confirmando visualmente o aumento da temperatura do cavaco sem alteração da temperatura da peça.

4 CONCLUSÕES

A aplicação das técnicas HSC no equipamento e condições de ensaio foi satisfatória. Melhores resultados foram obtidos na faixa entre 1100 e 1900 m/min, pois a potência consumida no corte em velocidades mais elevadas foi menor que o valor teórico, indicando melhor rendimento do processo à medida que a velocidade de corte aumenta. Não foi percebida melhora no acabamento superficial provavelmente devido ao desbalanceamento da ferramenta ao trabalhar com rotações acima do especificado pelo fabricante. O ferro fundido GG25 apresentou comportamento bastante distinto em relação a materiais dúcteis como aço ou alumínio, não sendo possível a identificação das mudanças no comportamento do cavaco. A ferramenta de Si_3N_4 apresentou boa estabilidade em corte interrompido e em larguras de corte variáveis. Não foi verificado desgaste prematuro nos insertos, o que valida a aplicabilidade do Si_3N_4 nas condições ensaiadas. Porém é necessário o acompanhamento durante maiores tempos para otimização da vida. Também é necessário o aprimoramento de ferramentas simples para monitoramento do processo durante a produção. Serve como sugestão para trabalhos futuros: o desenvolvimento de técnicas mais apuradas e diretas para acompanhamento da evolução do desgaste da ferramenta, evitando horas de ensaios preliminares para determinação das condições ótimas de trabalho na utilização de ferramentas mais nobres.

Agradecimentos

Ao sr. Cláudio Przybycien, programador de CNC da empresa Trützschler, pelo apoio prestado na execução dos ensaios. À empresa Trützschler Ind. e Com. de Máquinas Ltda., por ceder os recursos necessários.

REFERÊNCIAS

- 1 KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren Band 1 – Drehen, Fräsen, Bohren (VDI Buch)**. 7ª Ed. Berlin: Springer Verlag, 2002.
- 2 CAVICHIOLLI et. al, Francisco de Assis: **Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica**; São Paulo; Érica, 2003.
- 3 SCHULTZ, Herbert: **Hochgeschwindigkeitsfräsen metalischer und nichtmetallischer Werkstoff** – München, Wien: Hanser, 1989.
- 4 SANDVIK-COROMANT. **Catálogo de Fresamento**. 2003
- 5 TOH, C.K: Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Dublin, v. 167, p. 110-118, Elsevier, 2005;
- 6 SANDVIK-COROMANT. **Fabricação de moldes e matrizes – catálogo de aplicação**.
- 7 DEONÍSIO, C. C. C. et al.: Produzindo ferramentas de conformação em HSC. **Mundo da Usinagem**, ed. especial, p. 10-15, 2001.
- 8 HABER, Rodolfo E. et al.: An investigation of tool-wear monitoring in a high-speed machining process. **Sensors and Actuators A**, v. 166, p. 539-545, Elsevier 2004.
- 9 TOH, C.K: Vibration analysis in high speed rough and finish milling hardened steel. **Journal of Sound and Vibration**, v. 278, p. 101-115, Elsevier 2004.
- 10 SUDO, Tadeu Tomio; BRAGHINI Jr., Aldo; COELHO, Reginaldo Teixeira: O desgaste de ferramentas na usinagem de FoFo cinzento a alta velocidade. **O Mundo da Usinagem**, ed Jan., pág. 27 – 31, 2001.
- 11 DEVRIES, Warren R.: **Analysis of material removal processes**. New York, Springer Verlag, 1992.
- 12 STEMMER, Caspar Erich: **Ferramentas de corte I**. 3ª ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.
- 13 SILVA, Fábio Ricardo da: **O processo de fresamento na zona de transição entre as velocidades convencionais e a alta velocidade**. 1998. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998