

## Estudo da usinagem com ferramentas cerâmicas de $\text{Si}_3\text{N}_4$ revestida com diamante

### *Machining study with $\text{Si}_3\text{N}_4$ ceramic cutting tools with diamond coating*

José Vitor Candido de Souza<sup>1,2</sup>

Olivério Moreira de Macedo Silva<sup>3</sup>

João Paulo Barros de Machado<sup>1a</sup>

Emerson Augusto Raymundo<sup>2</sup>

Wilson Gomes da Silva<sup>4</sup>

Luiz Alberto dos Santos<sup>5</sup>

Artigo  
Original

Original  
Paper

#### Palavra chave:

Ferramentas de  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Revestimento de  
diamante

Usinagem

Velocidade de corte

Ferro fundido  
cinzento.

#### Resumo

A crescente evolução das indústrias automobilísticas vem estimulando cada vez mais a competitividade no mercado. Alguns fatos são determinantes para o sucesso dessas empresas, como, a redução da poluição, design, melhoria do tempo de vidas das peças, redução de custo de manufaturas, entre outros. Para tal melhoria, as empresas tiveram como necessidade, investimentos em pesquisas e equipamentos. Um dos processos mais difícil é a usinagem dos blocos de motores, que normalmente são fabricados de ferro fundido cinzento (GCI), ferro fundido vermicular (CGI), e outros que apresenta baixa usinabilidade, promovendo elevado gasto com ferramentas, além de tempos improdutivos utilizados para trocas das ferramentas e averiguação. A necessidade vigente, dessas indústrias tem levado, e motivado pesquisas em desenvolvimento e revestimento de ferramentas cerâmicas. Entre as ferramentas mais promissoras para usinagem das ligas utilizadas nos blocos de motores estão as ferramentas cerâmicas de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Essas ferramentas oferecem uma combinação única de propriedades, como resistência mecânica à altas temperaturas, resistência a ataque químico e abrasão, leveza, dentre outras. Neste trabalho serão utilizadas ferramentas cerâmicas à base de ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) revestidas com diamante pelo processo CVD no torneamento do ferro fundido cinzento nas velocidades de corte de 180, 240, 300 e 360 m/min., com avanço variando de 0,12 à 0,40 mm/rot. e profundidade de corte constante de 1.0 mm. Os resultados mostraram que a  $V_c=300\text{m/min}$  e  $f=0,33\text{ mm/rot}$  promoverão importantes reduções das forças de corte, menor rugosidade da peça e comprimento de corte de 7883m. Esses resultados são promissores, e mostram a importância da otimização dos parâmetros da usinagem.

<sup>1</sup> INPE - S. J. Campos - SP – Prof. Colaborador/ <sup>1a</sup>Analista em C & T.

<sup>2</sup> UNIFOA - Professor.

<sup>3</sup> DCTA-IAE/AMR – S. J. Campos - SP – Pesquisador Sênior.

<sup>4</sup> Qualifer Ltda – Belo Horizonte - MG – Diretor comercial.

<sup>5</sup> USP-EEL Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, - Aluno de Mestrado.

**Abstract**

The growing evolution of the automobile industries is stimulating the competitiveness in the market. Some facts are decisive for the success of those companies, as, the reduction of the pollution, design, improvement of pieces lifetime, reduction of manufacture costs, among others. For such improvement, the companies had the need of investments in research and new equipments. The machining process of brake discs, exhaust manifolds, engine heads and diesel engine blocks, made of compacted graphite iron (CGI) and gray cast iron (GCI) has been classified as difficult-to-machine materials with high consumption of cutting tools, cooling lubricant during the machining operations, and others. The effective need, of those industries has been motivating researches in development and coating of ceramic tools. Among the most promising tools for machining of the alloys used in the engine blocks there are the Silicon Nitride ceramic cutting tools ( $Si_3N_4$ ). Those tools offer a combination of properties like, mechanical resistance on high temperatures, high chemical resistance and wear resistance, lightness, among others. In this work, it was used silicon nitride based ceramic cutting tools with diamond coating (CVD process), in turning of gray cast iron. The cutting speed were 180, 240, 300 e 360 m/min., feed of 0,12 to 0,40 mm/rev. and keeping the cutting depth constant and equal to 1 mm. The results showed that  $V_c=300$ m/min and  $f=0,33$  mm/rot will promote important reductions on machining cutting forces, lower workpiece roughness and cutting length of 7883 m. Those results are innovative, and show the importance of the optimization on the machining parameters.

**Keywords:**

$Si_3N_4$  cutting tool  
Diamond coating  
Machining  
Cutting speed  
Gray cast iron

**1. Introdução**

As ferramentas de materiais cerâmicos avançados constituem uma tecnologia em processo de amadurecimento com base em vigentes aplicações de alto potencial e promissor crescimento [1]. Os materiais cerâmicos avançados são inorgânicos, não metálicos, com microestruturas fina, pureza e complexa combinação de estruturas cristalinas, controlada pelos aditivos. Atualmente, para determinadas aplicações envolvendo alta temperatura, as ferramentas de metal duro, aço rápido e outras atingiram o seu limite devido à temperatura de fusão. Enquanto isso, as ferramentas cerâmicas vêm ganhando espaço, porque são umas das poucas opções que suportam a utilização em altas temperaturas e sem a presença de fluidos. Sua baixa densidade, inércia química e alta dureza oferecem um potencial adicional para estender os limites de desempenho acima do oferecido por outras ferramentas [2].

A busca por maior produtividade, e menor custo de fabricação, está impondo, o desenvolvimento de ferramentas de corte capazes de operar em velocidades cada vez mais altas e, conseqüentemente gerando temperaturas mais elevadas na interface peça/ferramenta [3].

Outro fator importante que justifica o emprego de ferramentas cerâmicas e novas

ferramentas revestidas diz respeito à redução na utilização de fluidos de corte. Essas ferramentas podem proporcionar uma adicional resistividade ao calor, mas não contemplam todos os outros benefícios do fluido de corte, tais como, remoção do calor gerado no corte, que pode afetar a peça de trabalho, redução do atrito, remoção do cavaco da região de corte, proteção da peça contra a oxidação e outras reações indesejáveis, dentre outros [4].

Os custos com usinagem nos EUA é estimado em mais de U\$100 bilhões/ano. Os custos com o uso de fluidos de corte é estimado em aproximadamente 16% dos custos de manufatura [4]. Conseqüentemente, a eliminação do uso de fluidos de corte, se possível, pode ser um significativo incentivo econômico. Os principais benefícios da usinagem a seco com ferramentas cerâmicas e outras ferramentas é mais do que apenas a redução de custos, dizem respeito também a um ambiente de manufatura saudável, segurança do trabalhador, proteção dos efeitos adversos das químicas e proteção do nosso precioso meio ambiente. Por um longo tempo, em função das limitações dos materiais para ferramentas disponíveis, o uso de fluidos de corte foi considerado parte integral essencial do sistema máquina/ferramenta [5].

As pesquisas em processos de fabricação com remoção de cavacos têm grande im-

portância, representando a classe de processos mais largamente empregada dentro da cadeia de fabricação de produtos no mundo moderno. A usinagem transforma em cavacos algo em torno de 10 % da produção mundial de materiais metálicos empregando milhões de pessoas. Entretanto ganhos de produtividade, em processos de usinagem, certamente causarão significativo impacto econômico [4].

### 1.1. Ferramentas de corte de materiais cerâmicos

Os materiais utilizados como ferramentas de cortes devem apresentar importantes propriedades como: dureza superior ao material a ser usinado, ausência de reações químicas durante o processo, estabilidade em altas temperaturas e resistência ao desgaste. As ferramentas cerâmicas normalmente apresentam parte desses requisitos, mas são frágeis aos impactos, devido a microestrutura heterogênea e aos baixos valores de tenacidade a fratura [5]. Melhorias das propriedades das ferramentas cerâmicas, certamente irão apresentar grandes avanços nos processos de usinagem. Até 1980 o mercado das ferramentas cerâmicas permaneceu quase estagnado, prevalecendo somente crescimento de outras ferramentas, tais como metal duro, cermets, etc. [6]. O uso de ferramentas cerâmicas estava relacionado com pequenos avanços no desenvolvimento de novos compósitos cerâmicos, modernidade das máquinas ferramentas, e possivelmente com o conservadorismo das equipes técnicas nas indústrias entre outros. Os pequenos avanços, pouca sensibilidade técnica e a falta de modernização das máquinas ferramentas quase sempre, levava as ferramentas cerâmicas a sofrerem fratura em partes de suas arestas [7]. Com os recentes avanços alcançados no desenvolvimento de materiais cerâmicos estruturais, as ferramentas cerâmicas passaram a integrar-se a família das mais importantes ferramentas nos processos de manufaturas, se destacando principalmente pela possibilidade de usinar a seco (sem o uso de fluidos refrigerante-lubrificantes). Nos últimos anos os revestimentos em materiais cerâmicos vieram agregar ainda mais melhoria as ferramentas cerâmicas, aumentando assim seu desempenho e reduzindo sua fragilidade [8]. Nos dias de hoje as ferramentas cerâmicas são

utilizadas nos processo de usinagem em altas velocidades. As ferramentas cerâmicas mais utilizadas são  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3+TiC$ ,  $SiAlON$ ,  $\beta-Si_3N_4$ ,  $Si_3N_4+SiC$ , CBN e outras cerâmicas [6]. As ferramentas de  $Si_3N_4$  tem apresentado alto potencial para usinagem de ligas de níquel, ferro fundido e ligas endurecidas, sem a necessidade de uso de fluidos de refrigeração/lubrificante, além de apresentar custo reduzido pela possibilidade de produção no Brasil reduzindo a sua importação [9 e 10].

## 2. Justificativas

Com o atual desenvolvimento das indústrias, crescem também as necessidades de desenvolvimentos de novos materiais e processos de fabricação. Dentre os mais importantes processos de fabricação, a usinagem possui uma parcela considerável no custo final dos produtos, sendo de grande importância o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte que possibilitem trabalhar com velocidades cada vez maiores e a um custo cada vez mais reduzido. Estrategicamente se faz importante o desenvolvimento de ferramentas de cortes a base de  $Si_3N_4$  no Brasil podendo em um futuro próximo ser utilizada comercialmente.

Espera-se que esse trabalho promova avanços no desenvolvimento de ferramentas de corte de materiais cerâmicos, com conseqüente melhoria da resistência mecânica, confiabilidade, redução de custo e melhora nos processos de fabricação.

Apesar de existir um mercado em plena expansão no campo da usinagem com ferramentas cerâmicas, no Brasil, não existem estudos relacionados à fabricação de ferramentas cerâmicas de  $Si_3N_4$  e sua aplicação prática, objetivo da presente proposta. Portanto as ferramentas cerâmicas são produzidas em sua totalidade no exterior, sendo estrategicamente interessante o domínio da tecnologia de fabricação desses produtos no Brasil. Desta forma, pode-se evitar, ou reduzir, a sua importação, criando um produto com tecnologia nacional que levava a redução de custo dessas ferramentas e dos processos de manufaturas.

### 3. Experimental

#### 3.1. Ferramenta de corte

As ferramentas de nitreto de silício utilizada nesse trabalho foram produzidas pelo processo de sinterização normal na temperatura de 1850 °C por 2 h, em atmosfera de nitrogênio. Foi utilizado uma composição de 84 wt%  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 7,0 wt%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 4 wt%  $\text{AlN}$  e 5 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Após sinterização os inserts foram caracterizados quanto a propriedades físicas e mecânicas utilizando principio de Archimedes

para densidade, difração de raios-X para análises das fases e método de indentação Vickers para obtenção de dureza e tenacidade a fratura. Posteriormente os inserts foram lapidados na geometria final de 12,7 x 12,7 x 4,76 mm, de acordo com a norma ISO 1832 pela empresa Qualifer Ltda. Os filmes de diamante foram depositados pelo processo CVD por 8 horas com o substrato a 800 °C, e temperatura do filamento de 2250 °C a uma pressão de 60 mbar, com fluxo de gás de 100 ml  $\text{min}^{-1}$  e a topografia do revestimento analisado por microscópio eletrônico.

A **Tabela 1**- Mostra as propriedades do substrato de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  utilizado para revestimento.

Ferramenta $\text{Si}_3\text{N}_4$	Densidade relativa (%)	Fases: $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4/\alpha\text{-SiAlON}$	Dureza Vickers (GPa)	Tenacidade à Fratura $K_{Ic}$ (MPa $\text{m}^{1/2}$ )	Dureza após revestimento (GPa)
Propriedades	98,56	72/28	18,41 ± 0,18	5,74 ± 0,12	N/A

N/A não avaliado

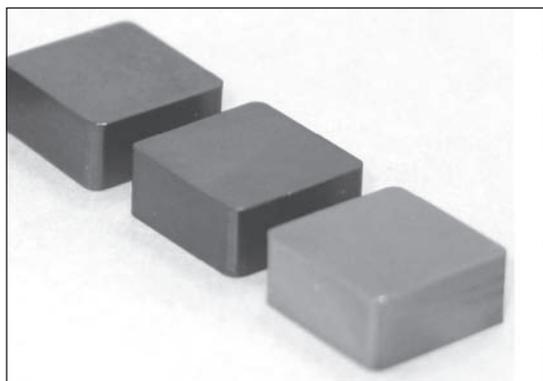


Figura 1- Substrato de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;

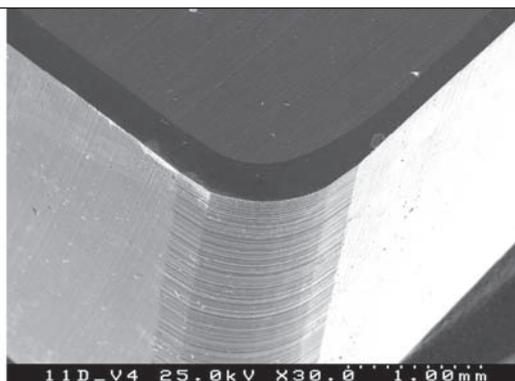


Figura 2 – Superfície de corte revestida com diamante

#### 3.2. Propriedades do ferro fundido cinzento

As barras de ferro fundido cinzento (GCI) utilizadas nos testes de usinagem foram adquiridas comercialmente. O ferro fundido cinzento foi caracterizado quanto a dureza, composição química e microestruturas, Figura 3.

As barras de ferro fundido cinzento apresentam dimensões média de 106 mm de diâmetro, 305mm de comprimento. As medidas de dureza dos materiais foram realizadas tomando como média cinco leituras. O ferro fundido cinzento apresentou dureza de, 209 ± 1,5 HB (Brinell hardness) e composição química de 3,04 wt % C, 2,58 wt % Si, 0,42 wt % Mn e Fe. Esse ferro fundido é utilizado nas indústrias automobilísticas [9].

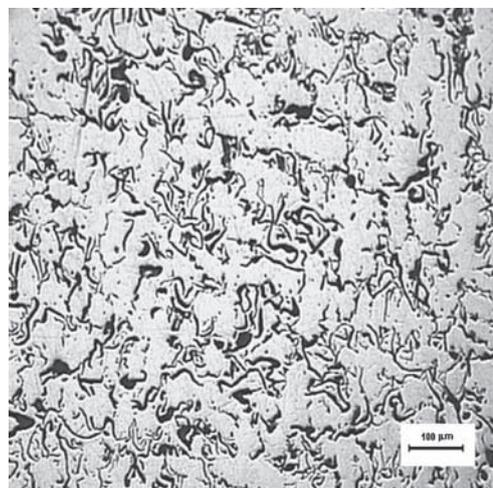


Figura 3- Micrografia do ferro fundido cinzento

### 3.3. Condições e equipamentos de usinagem

Os testes de torneamento foram realizados sem a presença de fluido lubrificante/refrigerante, em um torno de controle numérico (CNC - Romi, Mod. Centur 30D). As ferramentas foram fixadas em um suporte de ferramenta, tipo CSRNR 2525 M 12CEA, que é apropriado para ferramentas cerâmicas. Os parâmetros de usinagem utilizados foram baseados em literaturas e tiveram como base 3 réplicas de cada condições [11], conforme Tabela 2. Para análise dos desgastes das ferramentas foram utilizados, uma lupa com aumento de

8X, para inspeção visual durante os testes, e posteriormente um “microscópio” estereoscópico e conforme necessidade microscópio eletrônico de varredura (MEV). As medidas de rugosidades superficial das peças foram realizadas a cada passe, com três leituras defasadas de 120°, utilizando um rugosímetro marca Mitutoyo Surftest 402 series 178. Para medida de temperatura foi utilizado um pirômetro de radiação infravermelho fixado no carro porta ferramenta, a uma distancia de aproximadamente de 20 cm da interface ferramenta/peça, com analisador digital (LED). Utilizou para medida das forças um dinamômetro fixado ao carro porta ferramenta (Kistler).

**Tabela 2-** Condições de usinagem do ferro fundido cinzento.

Condições	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/rot)	$a_p$ (mm)
A	180	0,12	1,00
B	240	0,12	1,00
C	300	0,12	1,00
D	360	0,12	1,00
E	300	0,23	1,00
F	300	0,33	1,00
G	300	0,40	1,00

## 4. Resultados e discussões

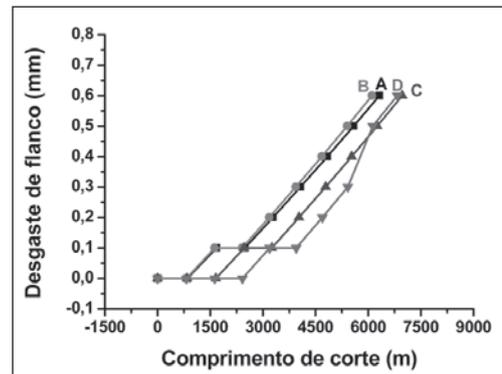
Os resultados obtidos nesse trabalho apresentam importantes avanços na usinagem do ferro fundido cinzento com ferramentas cerâmicas de  $Si_3N_4$  revestidas com diamante. A micrografia utilizada nos resultados representa, os tipos de desgaste ocorridos para todas as condições, sendo selecionada a condição de maior comprimento de corte (F), conforme descrito no resumo.

### 4.1. Desgaste da ferramenta revestida com diamante na usinagem do GCI

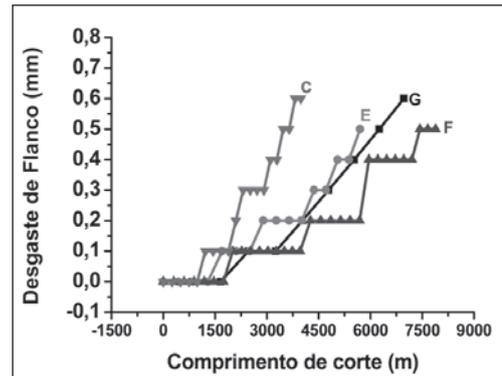
Os desgastes ocorridos em uma ferramenta podem ser devido as vários fatores. Tecnicamente podemos dizer que a ferramenta de  $Si_3N_4$  revestida com diamante em seu início do processo de corte não apresentou diferenças de desgaste podendo considerar

que a ação de corte é estável em seu início. Entretanto com o passar do tempo essa dinâmica tende a mudar ,passando por estágios críticos, com possíveis retiradas de partículas de diamante da superfície revestida, promovendo transformações no comportamento tribológico na interface ferramenta/peça. Nesse trabalho observou que o desgastes da ferramenta de  $Si_3N_4$  revestida com diamante é muito sensível aos parâmetros de usinagem utilizados. Para todas as condições a ferramenta não apresentou desgaste excessivo em seu início, sendo esse variando em função dos parâmetros adotados. Esse comportamento é devido à diferença de dureza existente entre o diamante e o ferro fundido cinzento. Mas com o passar do tempo e/ou comprimento de corte, tem-se início a uma reação entre o diamante da ferramenta e o carbono da peça, o que promove retirada de partículas de diamante e/ou pedaços do revestimento pelo processo de delaminação.

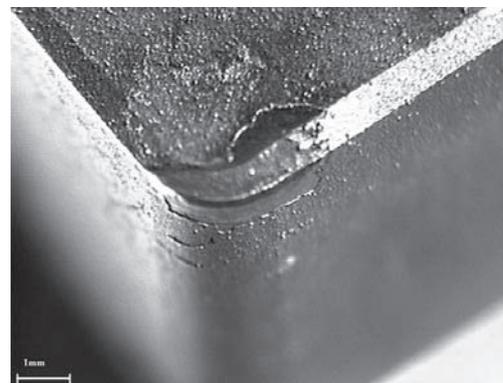
Analisando todas as condições utilizadas nesse trabalho podemos observar que ao longo do tempo há existência de delaminação do revestimento na região de corte. Entretanto na condição, onde utilizou  $V_c=300\text{m/min}$  e  $f=0,33\text{mm/rev}$ , a ferramenta apresentou menor desgaste de flanco, em função do comprimento de corte. Isso pode ser atribuído ao equilíbrio dos parâmetros de corte utilizado, que promove uma melhor concentração de calor na interface ferramenta/peça. Nessa condição também ocorre delaminação da aresta de corte, mas provavelmente os pequenos pedaços delaminado seguem o fluxo do cavaco, e como há uma estável delaminação a superfície da ferramenta sem revestimento (substrato) promove a ação de corte do material. Com a inserção do substrato na ação do corte formou-se uma proteção lateral na forma de um arco de calor que inibe a saída do calor permitindo uma maior concentração na interface. Esse arco confina uma maior quantidade de grafite nessa região, auxilia na deformação da peça e promove um melhor deslizamento entre a ferramenta e a peça. Isso permite uma melhor acomodação ferramenta/peça, e promove maior tempo de vida e menor rugosidade, conforme Figura 4, 5 e 6. Nessas figuras, podemos observar que a ferramenta apresentou desgaste moderado e progressivo durante os testes. No ponto (A) da figura 6, podemos concluir que o desgaste ocorreu de maneira gradativa. Sendo assim podemos dizer que a reatividade entre o diamante e o material usinado foi retardada, mas também ocorreu. Para todas as condições de corte utilizada observou-se que os desgastes são em função dos parâmetros de corte utilizados, sendo a velocidade de corte o parâmetro que mais influencia. Os avanços promoveram importantes variações de desempenho da ferramenta, estando todas as condições resumidas à acomodação ferramenta/peça que pode diminuir a vibração e promover uma melhor estabilidade do sistema. Figura 4, mostra o desgaste de flanco em função do comprimento de corte para diferentes velocidades, enquanto que a Figura 5, mostra desgaste de flanco em função do comprimento de corte para diferentes avanços e a Figura 6, mostra o desgaste de flanco ocorrido na ferramenta.



Figuras 4 – Desgaste de flanco x Comprimento de corte para diferentes velocidades.



Figuras 5 – Desgaste de flanco x Comprimento de corte para diferentes avanços.

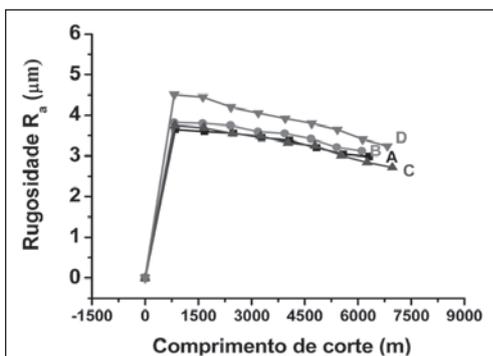


Figuras 6 – Fotografias das ferramentas revestidas com diamante após usinagem  $V_c=300\text{m/min}$  e  $f=0,33\text{mm/rev}$ .

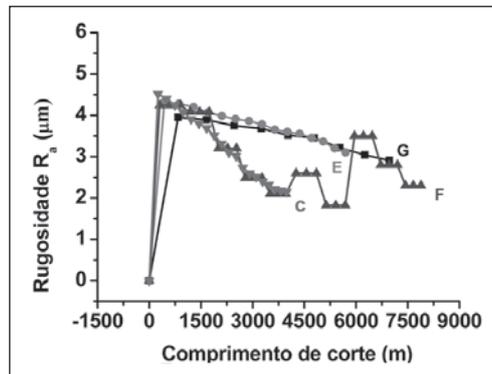
#### 4.2. Rugosidade superficial

Os resultados de rugosidade superficial ( $R_a$ ) da ferramenta revestida com diamante na usinagem do ferro fundido cinzento mostram uma tendência da ação da rugosidade com o desgaste de flanco. Na Figura 7, mostra a variação da rugosidade com a variação das velocidades de corte. Podemos observar que os valores de rugosidades são altos no início e após esse período tende a reduzir. Esses resultados são devido ao calor gerado na interface

entre a ferramenta e a peça que possivelmente promove a dissolução do grafite na região da interface ferramenta/peça promovendo um melhor deslizamento entre a peça e a ferramenta, conforme no item 4.1. O fenômeno de dissolução do grafite e sua proteção na aresta de corte ocorrem primeiramente antes, de haver uma reação entre o grafite e o material da peça. De acordo com os resultados obtidos nesse trabalho a intensidade de fenômeno esta diretamente relacionada aos parâmetros de usinagem utilizados. Nesse trabalho a  $V_c=300$  m/min e  $f=0,33$  mm/rot., é a condição a qual promove uma sequência importante de fatores benéficos e maléficos na usinagem de ferro fundido cinzento com ferramentas cerâmicas revestidas. Nessa condição possivelmente a primeiro, a dissolução do grafite, proteção da aresta de corte, e depois o início do processo de reatividade entre o diamante e o material da peça usinado. Na Figura 8, podemos observar que a melhor condição foi quando do uso de  $f=0,33$  mm/rot. Entretanto podemos observar que nessa condição houve mudanças bruscas no comportamento da rugosidade. Primeiramente essa mudança ocorreu devido ao início de corte de uma nova peça, e segunda variação é possivelmente ser em função do momento onde ocorreu a delaminação do diamante, que provavelmente promoveu ação de atrito de três corpos. Devido à presença de grafite dissolvido sobre a superfície da peça, as irregularidades promoveram intensos vales e picos aumentando a rugosidade da peça, mas não atingindo totalmente a peça usinada. Após esse passo a ferramenta tendeu a reduzir a rugosidade. Isso evidencia fatos já citado acima onde após a retirada do carbono, o grafite aloja na superfície do substrato e início uma nova ação de lubrificação e proteção.



Figuras 7 – Rugosidade  $R_a$  x Comprimento  $L_c$  para diferentes velocidades.



Figuras 8 – Rugosidade  $R_a$  x Comprimento  $L_c$  para diferentes avanços.

### 4.3. Forças de cortes

As forças de cortes em processos de usinagem têm fundamental importância. A princípio, nem a direção, nem o sentido das forças de usinagem são conhecidas, tornando-se impossível medi-la, e conhecer melhor as influências de diversos parâmetros em seu valor. Então, não se trabalha com a força de usinagem propriamente, mas com suas componentes segundo as direções conhecidas [12].

Na Figura 9, podemos observar que as forças de corte aumentam em função do aumento da velocidade até o valor de 240 m/min. e reduzem para velocidade de corte de 300 m/min. sendo a partir dessa velocidade tornam a aumentar outra vez. Para  $V_c=300$  m/min. os valores de forças de corte são menores possivelmente pelo aumento do calor gerado na zona de cisalhamento que promove uma redução na resistência do material, facilitando assim o processo de usinagem, além de auxiliar na dissolução do grafite, transformando em um fluido pastoso, conforme item 4.2.

A Figura 10 mostra a influência do avanço, nas três componentes da força de usinagem para as condições de corte testadas. De uma forma geral, o aumento do avanço causa um aumento nas forças de usinagem. A força de corte aumenta de forma quase que direta com o aumento do avanço, enquanto que a força passiva aumenta com o avanço, porém tende a reduzir no avanço de 0,33 mm/rot. Isso é devido a um possível e ideal aporte de calor na interface da ferramenta com a peça que auxilia na deformação do material e transforma o grafite em fluido pastoso reduzindo as forças nessa região. De uma maneira geral o aumento desses valores com o aumento do avanço

é justificado pelo aumento da seção de corte, exigindo assim mais potência para cisalhar o material na zona de corte. Porém, quando o avanço cresce, o aumento da força de corte não é diretamente proporcional ao aumento do avanço, já que ocorre uma redução na pressão específica de corte.

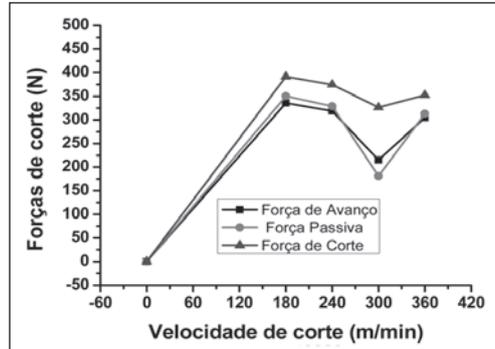


Figura 9– Influência da velocidade de corte nas forças de usinagem.

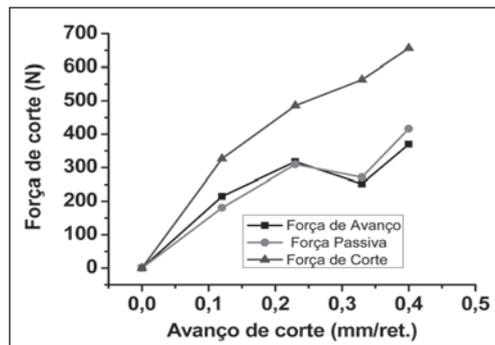


Figura 10– Influência do avanço nas forças de usinagem.

## 5. Conclusões

Esse trabalho mostrou que o sucesso de um processo de usinagem depende diretamente dos parâmetros de usinagem utilizados, o que torna de suma importância um melhor entendimento do processo.

A utilização de diferentes velocidades de corte é indicada no sentido de promover redução dos esforços de corte, porém os resultados mostraram que esse é um parâmetro de grande sensibilidade, sendo juntamente com o avanço mecanismo que definem o sucesso da ferramenta de nitreto de silício revestida com diamante.

Os resultados de forças de corte convergem com os resultados de rugosidade superficial e desgaste de flanco. Isso é devido ao melhor aporte de calor existente na interface ferramenta/peça para  $V_c=300$  m/min e  $f=0,33$

mm/rot. o qual permite que o grafite possa agir primeiro como fluido pastoso, para depois reagir com o material da peça.

Os resultados obtidos nesse trabalho são únicos e converge com recente publicação do autor [13].

## 6. Referencias

1. OKADA, A., Automotive and industrial applications of structural ceramics in Japan, **Nissan Research Center**, Nissan Motor Co., Ltd., Yokosuka 237-8523, Japan, 2007.
2. SOUZA, J.V.C., et al.,  $\alpha$ -SiAlONs Cutting tool Development, characterization and Application in Machining of Compacted Cast Iron, 7 th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology, Udine (Italy), June, 2005.
3. LANNA M.A., BELLO A. A. L, SOUZA, J.V.C, Avaliação das tensões e deformação em ferramentas cerâmicas de nitreto de silício, Anais 48º Congresso Brasileiro de Cerâmicas, Brazil, 2004.
4. EZUGWU, E.O., Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, V. 45, 2005, pp.1353-1367.
5. YECKLEY, R., Ceramic grade design, *Kennametal Comprehensive Application Engineering Guide*, vol. 12, Kennametal University, Latrobe, PA (2005) pp. 2–12.
6. OKADA, A., Challenges of ceramics for structural application, **Bull. Ceram. Soc. Jpn.** 40 (2005), pp. 259–275 [in Japanese].
7. MALÈRE, E. P. **Análise comparativa de ferramentas cerâmicas na usinagem de ferros fundidos e aços endurecidos**, Dissertação mestrado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2006.

8. DORÉ, C.; BAGETTI, J. H.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L. EBRESSIANI, A. H. A., avaliação do desempenho de ferramentas de cerâmica  $Al_2O_3+Y_2O_3+NbC$  na usinagem de ferro fundido vermicular, anais COBEF 2007.
9. SOUZA, J.V.C., et al., Usinagem de Ferro Fundido Vermicular com Pastilhas Cerâmicas a Base de Nitreto de Silício. **Máquinas e Metais**, v. 470, p. 140-152, 2005.
10. BHATTACHARYYA, S. *et al.*, The performance of ceramic tool materials for the machining of cast iron, **Wear** **135** (1989), pp. 147–159.
11. SOUZA, J.V.C., et al., Novos avanços na usinagem do ferro fundido cinzento utilizando ferramentas cerâmicas desenvolvidas com tecnologia nacional. In: IV Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2007, São Pedro. Anais do IV COBEF. São Paulo: USP, 2007. v. 1. p. cd-rom.
12. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C. E COPPINI, N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Metais**, segunda edição, Artliber, 2000.
13. SOUZA, J.V.C., NONO, M.C.A., RIBEIRO, M.V., MACHADO, J.P.B., SILVA, O.M.M. Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. **Materials & Design**, v.30, p. 2715-2720, 2009.

---

**Endereço para Correspondência:**

José Vitor Candido de Souza  
*vtor@las.inpe.br*  
INPE  
Av. dos Astronautas, 1.758  
S. J. Campos - SP  
CEP. 12.245-970