

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DA FERRAMENTA À BASE DE β -Si₃N₄ EMPREGADA NA USINAGEM DO FERRO FUNDIDO CINZENTO E DA TEXTURA DA PEÇA USINADA

Adriana Ana Pereira, adrianap@emc.ufsc.br¹

Lourival Boehs¹

Wilson L. Guesser^{2,3}

Conrado M. Afonso^{4,5}

Bráulio A. Soares⁶

Cássio L.F. Andrade⁷

Rhander Viana⁸

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitário, Trindade, EMC 88010-970, Florianópolis, SC, Brasil

²Engenharia Metalúrgica, Tupy Fundições, R. Albano Schmidt 3400, 89206-900, Joinville, SC, Brasil.

³Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Joinville, SC, Brasil.

⁴Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, R. Giuseppe Máximo Scolfaro, 13083-970 Campinas, SP, Brasil.

⁵Universidade São Marcos (USM), Av. José Losano de Araújo, s/n, 131400-000 Paulínia, São Paulo, Brasil

⁶Divisão de Metrologia de Materiais, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Duque de Caxias, RJ, 25250-020, RJ, Brasil.

⁷Engenharia de Manufatura, Tupy Fundições, R. Albano Schmidt 3400, 89206-900, Joinville, SC, Brasil

⁸Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, 38408-902, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo.

A usinagem do ferro fundido cinzento é caracterizada pela flutuação nas componentes da força de usinagem como resultado da presença da grafita na matriz do referido material. Avaliar como a força de usinagem se comporta à elevada velocidade de usinagem e como a flutuação nas componentes da referida força afetam a integridade da ferramenta de corte à base de β -Si₃N₄ e a textura da peça usinada são os objetos dessa pesquisa. As componentes da força de usinagem foram medidas e relacionadas com a textura da superfície usinada e a integridade da ferramenta de corte. A textura da superfície apresenta um padrão característico de um corte com vibração. Os principais parâmetros medidos são: $R_a = 0,28 \pm 0,03 \mu\text{m}$ e $W_t = 0,61 \pm 0,17 \mu\text{m}$. Trincas intragranulares, em ângulos de 33 a 44 graus, foram observadas na ferramenta de corte. A força resultante de usinagem a 600 m/min foi de 719N e formou com o plano contendo a força passiva (F_p) e de avanço (F_f), um ângulo de 40 graus estando, portanto, compreendida no intervalo do ângulo de fratura medido na ferramenta de corte.

Keywords: ferro fundido cinzento, usinagem, β -Si₃N₄, força de usinagem.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos apresentam uma grande vantagem em relação a outros materiais, quando utilizados como ferramentas de corte, devido à elevada dureza, baixa condutividade térmica, boa estabilidade química, ótima dureza à quente e principalmente boa resistência ao desgaste. Essas propriedades combinadas permitem que as pastilhas de cerâmica sejam usadas como ferramentas de corte em velocidades de usinagem elevada. Entre as cerâmicas empregadas como ferramenta de corte destaca-se à base de β -Si₃N₄.

As cerâmicas à base de β -Si₃N₄ encontram principal aplicação, com ferramentas de corte, na usinagem dos ferros fundidos. A elevada afinidade química entre os átomos de ferro e de silício limita o seu emprego na usinagem dos aços. Devido à natureza covalente das ligações químicas entre os átomos de Si e N, o escorregamento e o cisalhamento são extremamente restrito dentro do grão de β -Si₃N₄. A ausência praticamente total de escorregamento tem como consequência o baixo limite de resistência à tração.

Na usinagem, a presença da grafita lamelar na microestrutura do ferro fundido cinzento, Fig. (1a), favorece um corte intermitente devido à fragmentação do cavaco, Fig. (1b), resultando numa flutuação nas componentes da força de usinagem. Como a força de usinagem se comporta a elevada velocidade de usinagem e como a flutuação nas componentes da referida força afetam a integridade da ferramenta de corte à base de β -Si₃N₄ e a textura da superfície usinada são os objetos dessa pesquisa.

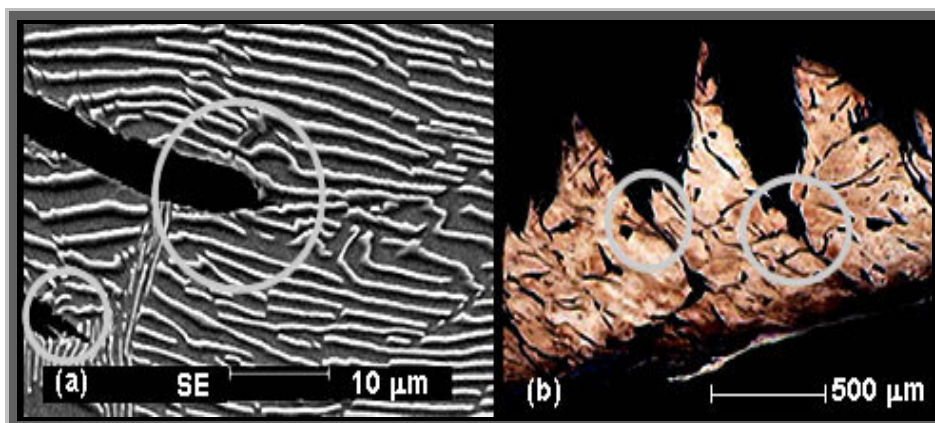


Figura 1: (a) Efeito concentrador da grafita na matriz do ferro fundido cinzento e (b) fragmentação do cavaco (Pereira, 2005).

2. METODOLOGIA

O material utilizado nesta pesquisa é o ferro fundido cinzento FC 250, com dureza de 239 HB e limite de resistência à tração de $279,7 \pm 2,12$ MPa. O número de células eutéticas, por cm^2 , é de $134,67 \pm 50,34$. O material é formado por uma matriz perlítica, Fig. (2b) contendo grafita tipo A, predominantemente, grafitas tipos C e E (interdendrítica), Fig. (2a).

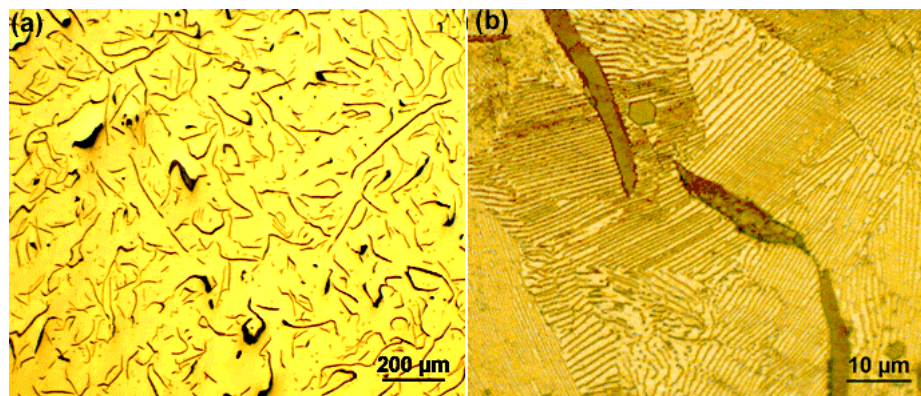


Figura 2 – Microestrutura do ferro fundido cinzento formada por grafita tipo A, predominantemente, grafita tipo C e interdendrítica (a) em uma matriz perlítica (b).

A quantidade e o comprimento dos veios de grafita afetam o mecanismo de formação do cavaco, na usinagem do ferro fundido cinzento, e conseqüentemente afetam o comportamento das componentes da força de usinagem. Dessa forma é importante a quantificação desses elementos. O ferro fundido usado nessa pesquisa tem $333,67 \pm 86,16$ partículas de grafita/ mm^2 e a distribuição do comprimento da grafita, segundo a norma VDG P441, é ilustrada na Figura (3).

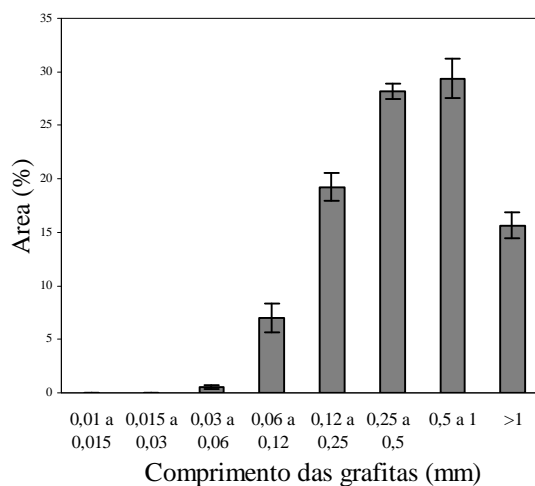


Figura 3 – Histograma da distribuição do comprimento dos veios de grafita segundo a norma VDG P441.

2.1 . Ensaio de usinagem

O ensaio de usinagem foi desenvolvido pelo processo de torneamento externo longitudinal com pastilhas à base de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, classe CC6090, ISO SNGA 120408 T02520, fornecida pela empresa Sandvik. A micrografia de uma pastilha à base de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ observada num microscópio eletrônico de transmissão é mostrada na Figura (4). A pastilha foi montada em um suporte DSSNL 2525M12 com um ângulo de direção do gume da ferramenta de 45 graus. Os parâmetros de corte empregados são: velocidade de corte de 600 m/min, $f = 0,2$ mm e $a_p = 2$ mm. Os estudos foram realizados para um comprimento de corte de 1600 mm.

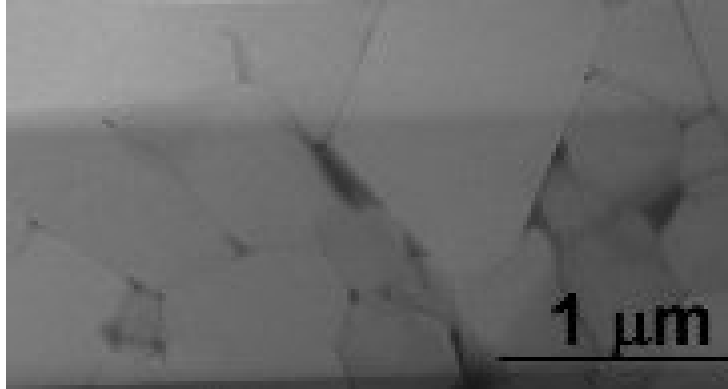


Figura 4 – Microestrutura da ferramenta à base de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$.

Os corpos de prova foram previamente preparados com a remoção de uma camada externa de 4 a 10 mm, dependendo da qualidade da superfície fundida, eliminando os defeitos de fundição. Na superfície do corpo de prova voltada para o contra-ponta foi feito um chanfro de 45° (igual ao ângulo de direção do gume da ferramenta) para reduzir o impacto de entrada do material da peça sobre a face da pastilha. Os ensaios foram desenvolvidos a seco para evitar choque térmico na pastilha de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$.

2.2 . Sistema de Medição das Componentes da Força de Usinagem

Para medição das três componentes da força de usinagem, quais sejam: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p), foi usada uma plataforma piezelétrica (dinamômetro), amplificadores de carga e sistema de aquisição automático de dados. Em seguida, esses dados foram processados em um microprocessador e apresentados na forma de gráficos. Na Figura (5a) é mostrado um esquema da disposição dos componentes do sistema de medição de forças utilizados para a realização dos experimentos.

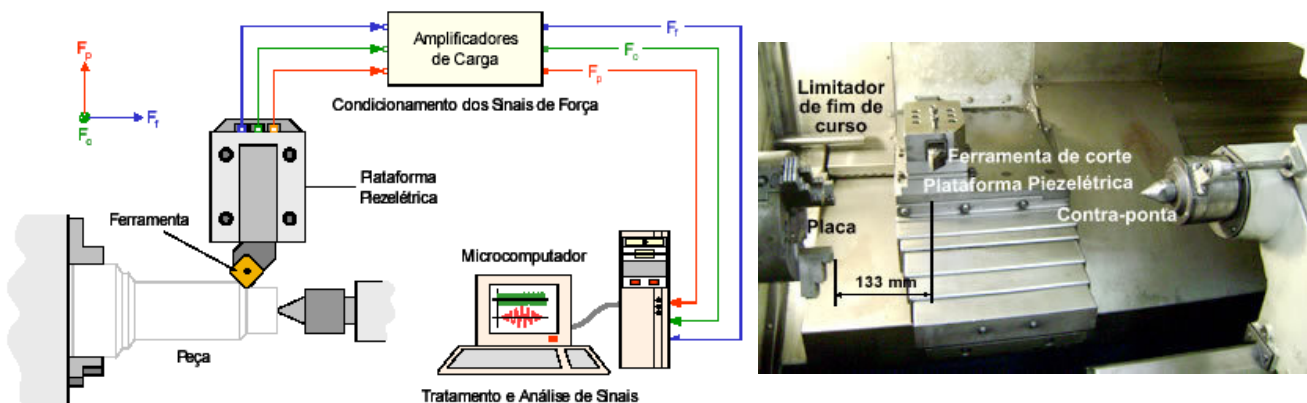


Figura 5 - (a) Esquema do sistema de medição das forças no torneamento (Mangoni, 2004).
(b) Instalação da plataforma piezelétrica no torno CNC Romi® Cosmos 20-U.

O sinal de força produzido durante o processo de torneamento é captado pela plataforma piezelétrica (dinamômetro). Em seguida esses sinais são amplificados por amplificadores de sinais que os remetem a um analisador de sinais. No analisador Hewlett Packard HP (Data Aquisição) o sinal amplificado é transformado em gráfico, mostrando em tempo real o comportamento das componentes de força (F_c , F_f , e F_p) durante o processo de torneamento.

Para captação das componentes de forças (F_c , F_f e F_p) produzidas durante o processo de usinagem, uma plataforma piezoeétrica Kistler®, modelo 9257, Fig. (4b), foi usada. As vantagens da plataforma piezoeétrica (dinamômetro) são: separação das três componentes de força, altíssima rigidez e insensibilidade quanto à variação de temperatura e umidade.

Para amplificação das três componentes de força (F_c , F_f e F_p) gerados na plataforma piezoeétrica (dinamômetro) foram utilizados três amplificadores de carga, modelo 5011 do fabricante Kistler. Para conversão dos sinais analógicos em digital foi empregado o analisador de sinais *Data Acquisition*, modelo 3497 A.

Para aquisição dos pontos, adotou-se uma constante de tempo de $\Delta t = 4$ ms para o cálculo dos valores de tensão elétrica VRMS via MATLAB. Assim, para o intervalo de tempo Δt , o sistema calcula a média quadrática de $n = 200$ pontos no intervalo estipulado, gerando um ponto a cada 4 ms. O fator de escala (S) dos amplificadores de carga foi ajustado para $S = 2$ mm, isto significa dizer que 1 V de sinal equivale a 200 N. Após a configuração do sistema, as curvas das forças em função do tempo puderam ser geradas.

O início e o final dos sinais de medição de força plotados no gráfico (Força x Tempo) não coincidem com o início e fim do processo de usinagem. Por essa razão, os sinais de força obtidos precisaram ser tratados para determinar os valores médios das forças.

2.3. Caracterização da integridade da ferramenta de corte e da textura da superfície da peça usinada

Para obtenção da amostra de seção transversal da ferramenta de corte à base de β - Si_3N_4 empregada na usinagem do ferro fundido cinzento a 600 m/min a ser examinada no TEM, foi empregada a técnica de feixe de íons focalizados. O processo de preparação da amostra por essa técnica é descrito resumidamente a seguir.

O β - Si_3N_4 é um material não condutor. Para evitar o carregamento de elétrons durante a preparação da amostra no FIB, uma camada de ouro foi depositada sobre a superfície da ferramenta de corte. A fim de preservar as características da integridade da superfície da amostra, uma camada de platina foi depositada, conforme indicado na Figura (6a). Adjacente a essa camada, duas cavidades retangulares foram produzidas em torno da área de interesse, Figura (6b). As cavidades são suficientemente largas e profundas de forma que a amostra possa ser removida com auxílio do manipulador, Figura (6c), e transferida para um *grid* com dimensões específicas para ser observada no TEM, Figura (6d). A última etapa envolvida na preparação da amostra por FIB constituiu em remover sucessivas camadas laterais da lâmina de β - Si_3N_4 até a obtenção de uma amostra suficiente fina que possibilitasse a passagem do feixe de elétrons através da amostra, durante sua análise no microscópio eletrônico de transmissão. Após a completa preparação, a amostra foi removida do FIB e examinada num microscópio eletrônico de transmissão JEOL 2100 operando a 200 kV.

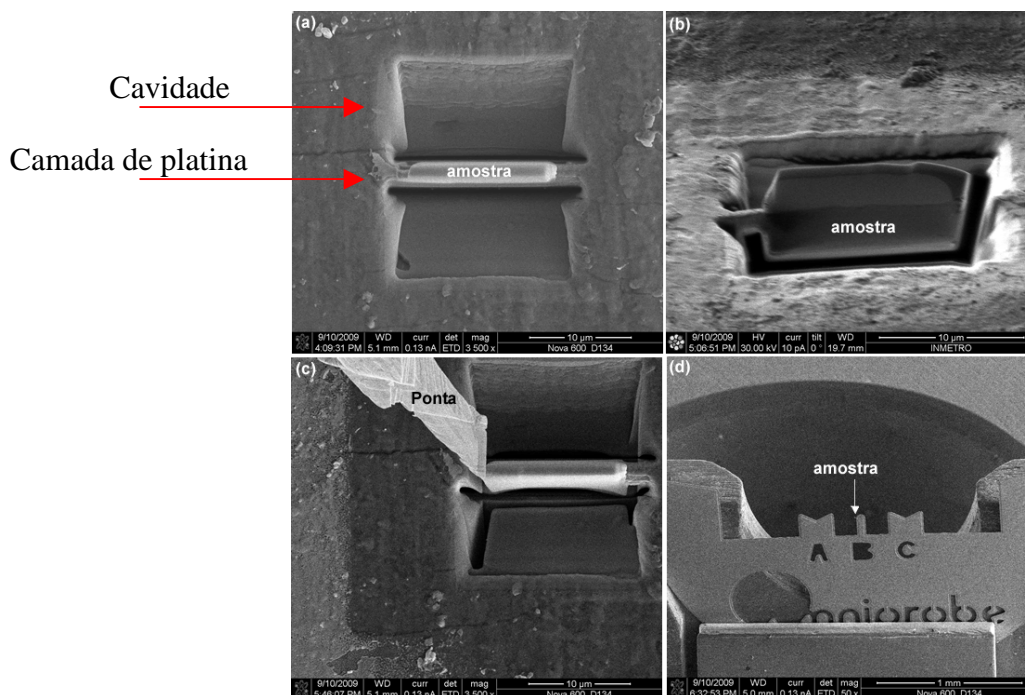


Figura 6 – Preparação da amostra de seção transversal da ferramenta por FIB. (a) Camada de platina e as duas cavidades adjacentes a amostra. (b) Vista lateral da amostra parcialmente separada da ferramenta. (c) Remoção da amostra do interior da ferramenta de corte. (d) Amostra fixada no *grid* e pronta para ser observada no TEM.

Para caracterização da textura da superfície da peça usinada foi utilizado um rugosímetro Perthometer S8P 4.51 que consiste de um sensor de ponta de diamante com um ângulo de 60° e raio de 3 mm.

3. RESULTADOS

Os valores das componentes da força de usinagem no torneamento do ferro fundido cinzento FC25 com pastilha à base de β - Si_3N_4 a 600 m/min são apresentados na Figura (7) e na Tabela (1).

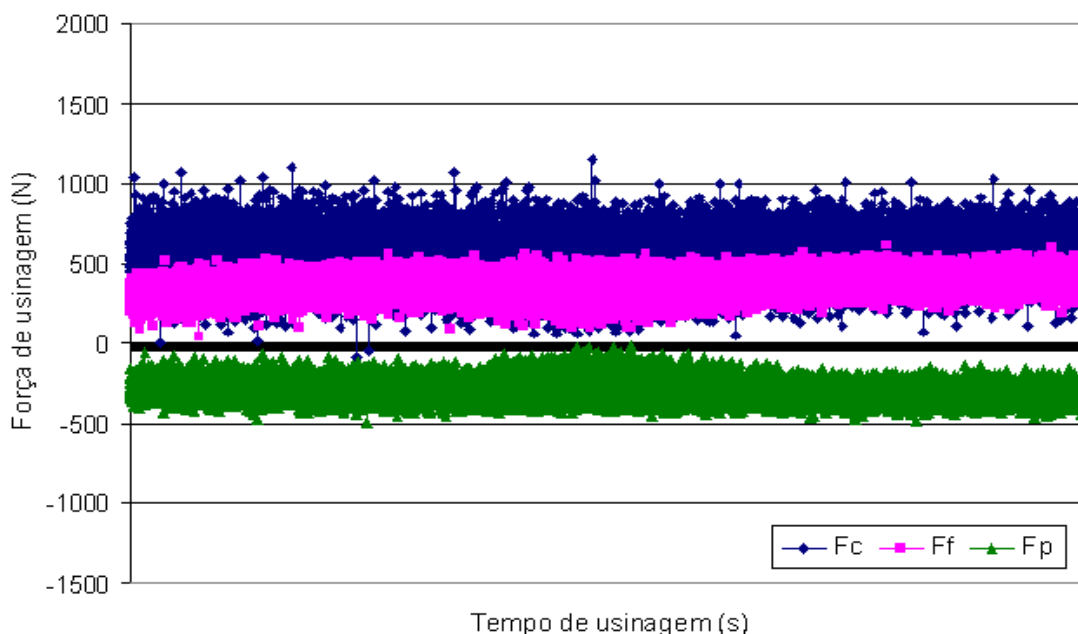


Figura 7 – Componentes da força de usinagem. (Tempo de aquisição = 50 s, frequência de aquisição = 1 Hhz)
($V_c = 600$ m/min, $a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm, β - Si_3N_4 classe 6090 – Sandvik)

Da análise da Figura (7) e da Tabela (1) observa-se que a componente da força de usinagem com maior flutuação é a força de corte. A flutuação da força de corte é proveniente do próprio mecanismo de formação do cavaco (Ferraresi, 1982). Na usinagem do ferro fundido cinzento, a presença da grafita lamelar promove a iniciação de micro-trincas na região primária de cisalhamento. Dependendo da dimensão da grafita, esta trinca pode se estender ao longo de um trecho apreciável no plano de cisalhamento, promovendo a fratura do cavaco em intervalos muito frequentes (Marwanga et al. 2000; Trent, 1991), conforme observado na Figura (7). Para a cerâmica, a vibração é um dos fatores de redução da vida da ferramenta. Essa, mesmo que de pequena intensidade, produz microlascamentos no gume, reduzindo a durabilidade das ferramentas de materiais frágeis. O acabamento da superfície da peça também é comprometido devido à vibração (Stemmer, 1995).

Tabela 1 – Valor das componentes da força de usinagem (N)

	F_c	F_f	F_p
média	540	370	- 295
desvio padrão	127	61	53

O aspecto do cavaco obtido na usinagem do ferro fundido cinzento com pastilha à base de β - Si_3N_4 revela que o mesmo é formado pelo mecanismo de arrancamento, Fig. (8a) e (8b). Segundo Stemmer (1990), nessas condições a força de corte é essencialmente dinâmica, variando em função do tempo. Cresce no início do corte, devido à resistência do material da peça, e diminui após o rompimento do cavaco. Em seguida, cresce com o início da formação de um novo cavaco, repetindo dessa forma o ciclo de formação do cavaco, e resultando na flutuação da força de usinagem.

A grafita, com pouca resistência, encontra-se inserida na matriz de forma interconectada e com muitas ramificações, Fig. (2a), dentro de uma célula eutética (AFS, 2003). As pontas vivas, Fig. (1a), e as interconexões das grafitas resultam em áreas com alta concentração de tensão e caminhos propensos ao aparecimento de fraturas durante a usinagem (apud Marwanga et al. 2000), conforme observado na imagem obtida da superfície inferior do cavaco, Fig. (8b).

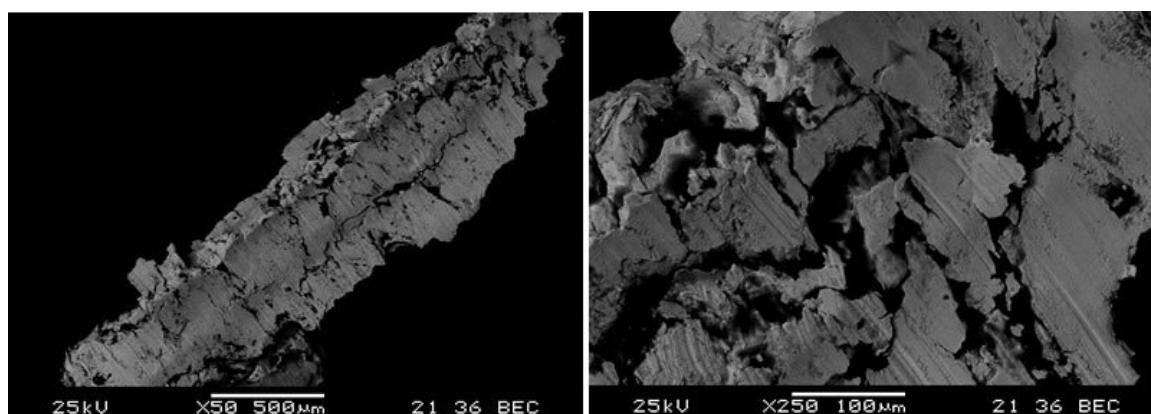


Figura 8 – Aspecto do cavaco (a) e da superfície inferior do cavaco (b) produzido na usinagem do ferro fundido cinzento a 600 m/min.

A flutuação nas componentes da força de usinagem, Fig. (7), resultam em vibrações que comprometem a integridade da ferramenta de corte, especialmente das ferramentas de cerâmica, e a textura da superfície da peça usinada. Na figura (9) perfis de rugosidade da superfície usinada, obtidos em 4 regiões diferentes, são mostrados. Os valores dos principais parâmetros de rugosidade são apresentados na Tabela (2). De forma complementar a caracterização da textura da superfície usinada, perfis de ondulação também foram obtidos em quatro regiões diferentes e são apresentados na Figura (10). Os principais parâmetros de ondulação foram quantificados e são apresentados na Tabela (2).

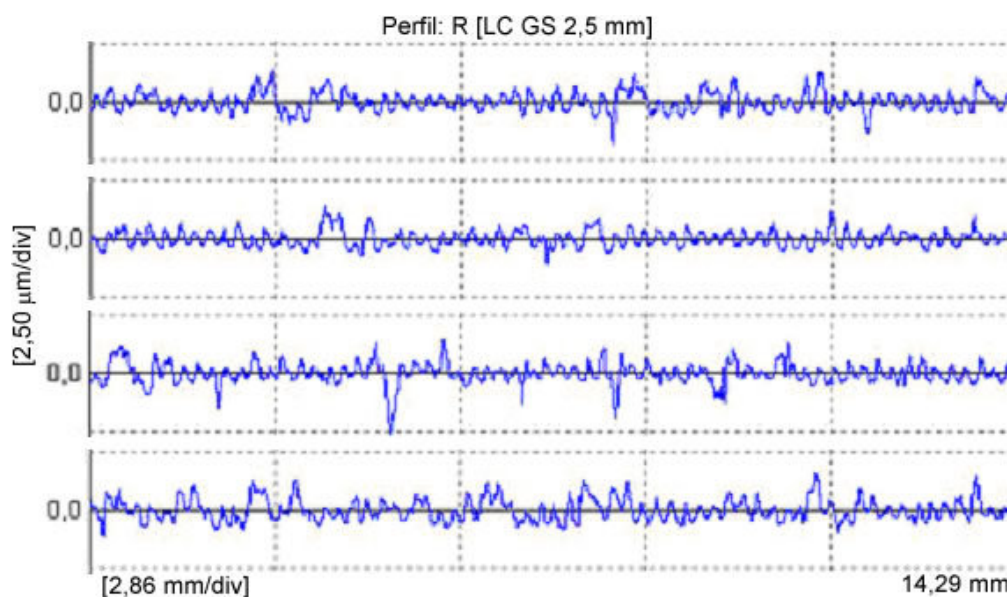


Figura 9 – Perfil de rugosidade da superfície do corpo de prova usinado a $V_c = 600$ m/min ($a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm, Si_3N_4 classe 6090 – Sandvik)

Tabela 2 – Parâmetros de rugosidade e de ondulação da superfície do corpo de prova usinado.

	média	Desvio padrão		média	Desvio padrão
Ra (μm)	0,28	$\pm 0,03$	Wa (μm)	0,12	$\pm 0,02$
Rq (μm)	0,37	$\pm 0,05$	Wq (μm)	0,15	$\pm 0,03$
Rz (μm)	2,15	$\pm 0,47$	Wt (μm)	0,61	$\pm 0,17$
Rmax (μm)	2,87	$\pm 0,94$	Wp (μm)	0,18	$\pm 0,03$
Rt (μm)	3,04	$\pm 0,82$			

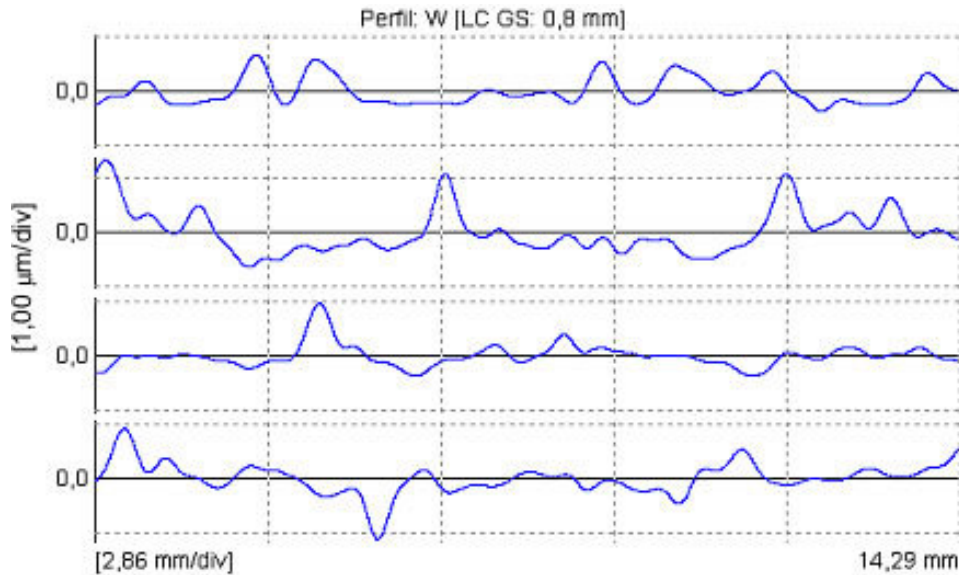


Figura 10 - Perfil de ondulação da superfície do corpo de prova usinado a $V_c = 600$ m/min ($a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm, Si_3N_4 classe 6090 – Sandvik)

O perfil de rugosidade, Fig. (9), e ondulação, Fig. (10), obtidos são compatíveis com o modelo de textura proposto por Marwanga et al. (2000), Fig. (11d). Inicialmente a ferramenta comprime o material da peça promovendo a formação de uma trinca em frente à ferramenta, Fig. (11a). Na região deformada, em frente à ferramenta, e na superfície usinada da peça, microtrincas são formadas, Fig. (11b). Essas fraturas irregulares, resultantes do processo de formação do cavaco, Fig. (11c), na usinagem do ferro fundido cinzento, dão origem a flutuação nas componentes da força de usinagem, Fig. (7), e a uma superfície irregular, rugosa e ondulada, Fig. (9) e (10).

Conforme explicado anteriormente, o mecanismo de formação de cavaco na usinagem do ferro fundido cinzento conduz a uma flutuação nas componentes da força de usinagem como resultado da presença da grafita na matriz do referido material. Como essa flutuação afeta a integridade da ferramenta de cerâmica é o assunto tratado a seguir.

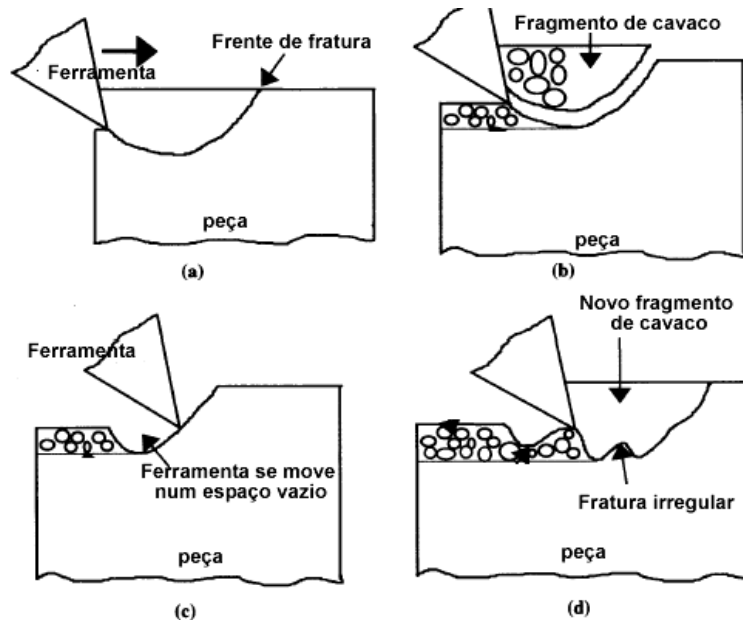


Figura 11 – Mecanismo de formação do cavaco na usinagem do ferro fundido cinzento e o aspecto da textura da superfície obtida (Adaptado de Marwanga et al. 2001)

A fim de se observar a integridade da ferramenta de cerâmica à base de $\beta-Si_3N_4$ empregada na usinagem do ferro fundido cinzento a 600 m/min, uma amostra perpendicular à face e paralela ao gume principal foi obtida, Fig. (12a), de acordo com o método apresentado na Figura (6).

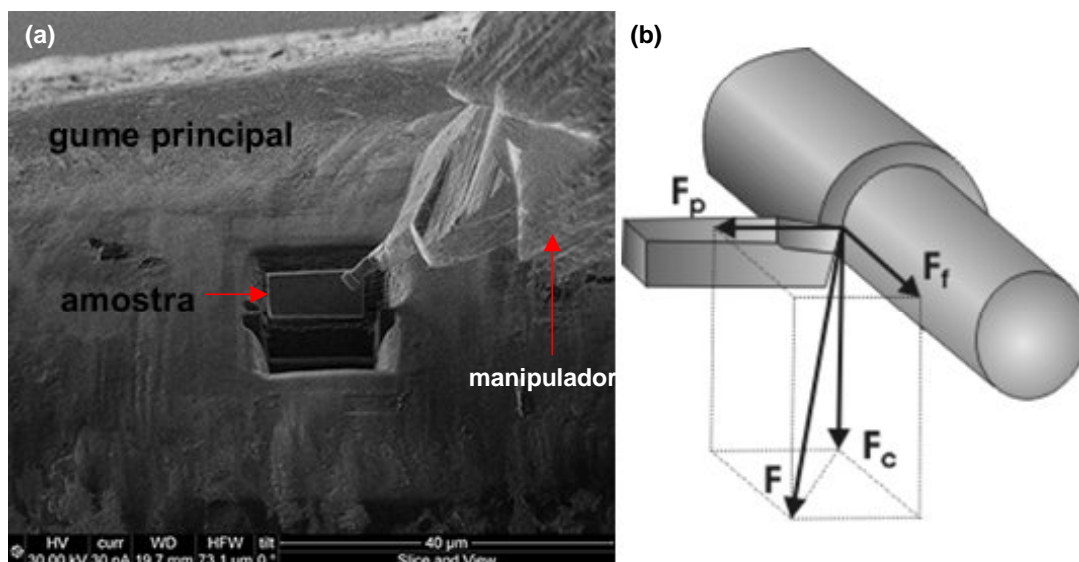


Figura 12 – (a) Amostra da seção transversal removida da ferramenta. (b) Componentes da força de usinagem.

A integridade da superfície da amostra da seção transversal da ferramenta obtida pelo método de feixe de íons focalizados, Fig. (12a), e analisada no TEM é apresentada na Figura (13). A micrografia da amostra obtida revela fraturas intragranulares em ângulos de 33 a 44 graus. Sobre a superfície da ferramenta observa-se também uma camada de material do corpo de prova aderida.

As fraturas observadas nos materiais cerâmicos podem ser intergranulares e intragranulares. As fraturas intergranulares são observadas em temperatura ambiente e as fraturas intragranulares são observadas em elevadas temperaturas (Zanotto et al. 1991). A formação de fraturas intragranulares observadas na Figura (13) é coerente com o reportado na literatura, haja vista a elevada temperatura desenvolvida no processo de usinagem.

Nas cerâmicas contendo ligantes na sua microestrutura, é reportado na literatura (Chen et al. 2000; Rouxel, 2001) que a fratura a elevadas temperaturas acontecem preferencialmente na fase intergranular. Entretanto, da análise da Fig. (13), observa-se que as fraturas desenvolveram-se no interior dos whiskers de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$.

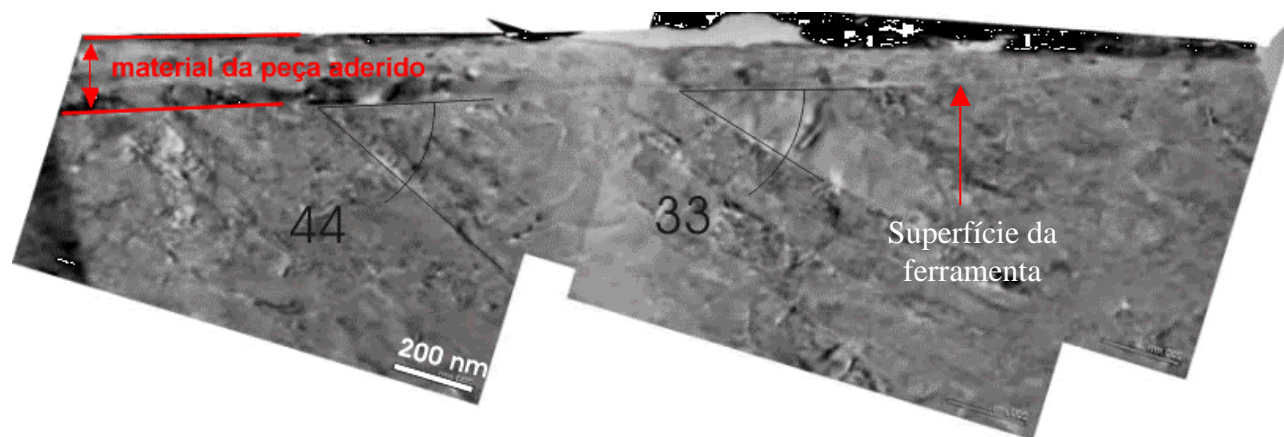


Figura 13 – Integridade da superfície da pastilha à base de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ empregada na usinagem do ferro fundido cinzento FC25 a 600 m/min observada no TEM.

A força resultante de usinagem (F), indicada na Fig. (12b), é de 719N e forma com o plano contendo as forças passiva (F_p) e de avanço (F_t), um ângulo de 40 graus. Portanto, o ângulo calculado a partir das componentes da força de usinagem medidos por meio da plataforma piezométrica instaladas no torno está compreendido no intervalo dos ângulos de fratura medidos na amostra da seção transversal da ferramenta, Fig. (13).

Imagens mais detalhadas das fraturas desenvolvidas na pastilha à base de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ na usinagem do ferro fundido cinzento a 600 m/min são apresentadas na Figura (14). Detalhes em alta resolução – HRTEM da trinca indicada na Figura (14a) é mostrado na Figura (14b).

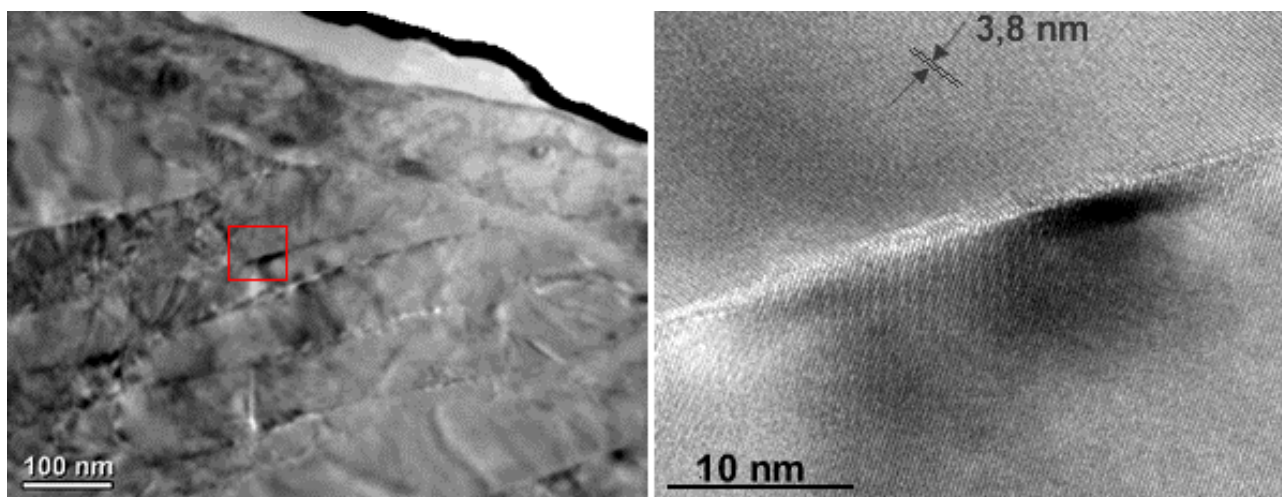


Figura 14 – (a) Fraturas desenvolvidas na ferramenta empregada na usinagem do ferro fundido. (b) Imagem em alta resolução da trinca indicada em (a).

Embora a ferramenta à base de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ seja empregada com sucesso na usinagem dos ferros fundido cinzento, fica claro a partir da análise da seção transversal da ferramenta, por meio da microscopia eletrônica de transmissão, que a flutuação nas componentes da força de usinagem, como resultado da presença da grafita na matriz do ferro fundido cinzento, compromete a integridade da ferramenta de corte.

A flutuação das componentes da força de usinagem no torneamento do ferro fundido cinzento é menor quanto maior a velocidade de corte. Essa observação explica em parte o melhor desempenho das ferramentas de cerâmica a elevada velocidade de corte.

Além das fraturas intragranulares é possível observar outro mecanismo de alteração da integridade da ferramenta. Embora não seja possível afirmar, pode-se sugerir, da análise da Figura (15), que maclas são formadas no material da ferramenta como resultado da ação das componentes da força de usinagem. O espaçamento entre as possíveis maclas é de aproximadamente 5,5 nm, conforme indicado na Figura (15).

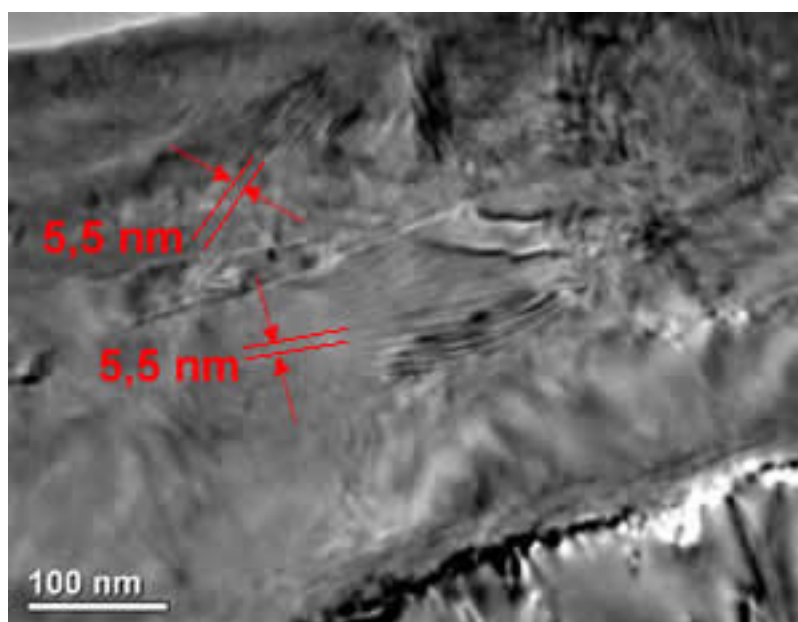


Figura 15 – Maclas na ferramenta empregada na usinagem do ferro fundido cinzento.

Os teste estáticos (Belmonte et al. 2007; Gogotsi, 2003) e dinâmicos realizados com o intuito de entender o mecanismo da fratura nas cerâmicas à base de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ a temperatura ambiente (Hoffmann, 1995) ou a elevada temperatura (Chen et al. 2000; Hoffmann, 1995), não simulam o agressivo ambiente ao qual a ferramenta é exposta na usinagem do ferro fundido a elevada velocidade de corte. Por isso, as alterações observadas na ferramenta de corte à base de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ empregada na usinagem do ferro fundido cinzento a 600 m/min não encontram subsídio nos resultado disponíveis na literatura.

4. CONCLUSÃO

Frente ao exposto conclui-se que:

A flutuação nas componentes da força de usinagem, como resultado do mecanismo de formação do cavaco na usinagem do ferro fundido cinzento, conduz ao comprometimento da integridade da ferramenta de corte. Trincas intragranulares, em ângulos de 33 a 44 graus, são observadas nos whiskers de β -Si₃N₄. Embora não se possa afirmar, sugere-se que maclas espaçada a 5 nm também são observadas na ferramenta como resultado dos esforços de corte.

A força resultante de usinagem é de 719N e forma com o plano contendo a força passiva e de avanço, um ângulo de 40 graus estando, portanto, compreendida no intervalo do ângulo de fratura medido na ferramenta de corte.

A textura da superfície apresenta um padrão característico de um corte com vibração. Os principais parâmetros medidos são: Ra = 0,28 ± 0,03 µm e Wt = 0,61 ± 0,17 µm.

O desenvolvimento de ferramentas de cerâmica, empregadas na usinagem do ferro fundido cinzento, deve levar em consideração a natureza cíclica de formação do cavaco e da flutuação das componentes da força de usinagem, a fim de minimizar o comprometimento da integridade da ferramenta de corte na usinagem do referido material.

Embora a microscopia eletrônica de transmissão não seja comumente empregada no estudo dos mecanismos de desgaste desenvolvidos nas ferramentas de corte, os resultados apresentados mostram ser essa uma ferramenta indispensável nesse tipo de estudo, haja vista a resolução desse tipo de microscópio. O pouco emprego dessa técnica se explica, em boa parte, pela enorme dificuldade em se obter amostras de regiões específicas e em manter as características da integridade da superfície da ferramenta pela técnica convencional de preparação de amostras para o TEM, que nesse trabalho foi superada pelo emprego do método de feixes de íons focalizados.

5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) da Universidade Federal de Santa Catarina pelo suporte financeiro e à empresa Tupy Fundições Ltda. pelo apoio técnico e fornecimento de matéria-prima utilizados neste trabalho. À Sandvik pelo fornecimento das ferramentas de corte e ao Sr Aldeci pelo apoio técnico. Ao C2NANO – Centro de Nanociência e Nanotecnologia Cesar Lattes/MCT pelo suporte técnico.

6. REFERÊNCIAS

- American Foundry Society. Iron Castings Engineering Handbook. AFS, p. 95-131. 2003.
- Belmonte et al. 2007, "Mechanical properties and contact damage behavior in aligned silicon nitride materials", J. Am. Ceram. Soc. 90 (2007) 1157 – 1163.
- Chen et al., 2000, "Mechanisms of High-Temperature Fatigue in Silicon Carbide Ceramics", Fatigue and Fracture Behavior of High Temperature Materials.
- Ferraresi, D. 1982, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Edgard. Blucher.
- Mangoni, C., 2004, Determinação Teórico-experimental de Forças e Análise Dinâmica por Elementos Finitos no Fresamento Frontal de Peças com Baixa Rigidez. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- Gogotsi, G.A. 2003, "Fracture toughness of ceramics and ceramic composites", Ceramics International 29 (2003).
- Hoffmann, M.J. 1995, "Relationship between microstructure and mechanical properties of silicon nitride ceramics", Pure & Appl. Chem, vol. 67, pp. 939-946.
- Marwanga et al. 2001, "Influence of Graphite Morphology and Matrix Structure on Chip Formation During Machining of Continuously Cast Ductile Isons". AFS Transactions, p. 651-662.
- Rouxel, T., 2001, "High Temperature Mechanical Behavior of Silicon Nitride Ceramics". Journal of the Ceramics Society of Japan 109, 889-897, 2001.
- Stemmer, C. E. 1995. "Ferramentas de Corte I". Florianópolis: Editora da UFSC
- Pereira, A.A., 2005, "Influência do Enxofre na Microestrutura, nas propriedades Mecânicas e na Usinabilidade do Ferro fundido Cinzento FC 25" - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Trent, E. M. 1991, Metal Cutting. 3. ed. London: Butterworth Heinemann, p.13-262, 1991.
- Zanotto et al. 1991, "Propriedades Mecânicas de Materiais Cerâmicos: Uma Introdução", Cerâmica, 37 (247).
- Chen et al. 2000, "Mechanisms of High-temperature fatigue in silicon carbide ceramics", Fatigue and Fracture Behavior of High Temperature Materials.

7. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.

Abstract. *The machining of grey cast iron is characterized by fluctuation in the machining force components as a result of the presence of graphite in the matrix of the material. To evaluate how the machining force behaves at high speed machining and as the fluctuation in the components of that force affect the integrity of the β -Si₃N₄ based cutting tool and texture of the workpiece are the object of this research. The machining force components were measured and related to the machined surface texture and integrity of the cutting tool. The surface texture shows a pattern characteristic of a cutting vibration. The main parameters measured are: Ra = 0.28 ± 0.03 µm, Wt = 0.61 ± 0.17 µm. Intragranular cracks at angles 33-44 degrees, were observed in the cutting tool. The resultant machining force at 600 m/min was 719N and formed with the plane containing the passive force (Fp) and feed force (Ff), an angle of 40 degrees.*

Keywords: *grey cast iron, machining, β -Si₃N₄, machining force, surface integrity.*