

## ESTUDOS PRELIMINARES DA USINAGEM NO FERRO FUNDIDO CINZENTO COM FERRAMENTAS A BASE DE $\text{Si}_3\text{N}_4$

CÓDIGO 21160

**Resumo.** Sabendo - se da importância da usinagem no processo de fabricação de peça para as indústrias, principalmente as industrias automobilísticas, esse trabalho segue uma rota não convencional nos trabalhos encontrados em usinagem. Nesse trabalho desenvolvemos uma pastilha cerâmica a base de nitreto de silício, aditivado com itria e nitreto de alumínio, após vários testes com composições, objetivando uma busca de dureza e tenacidade que nos levássemos a testes promissores de usinagem. Com a composição  $\text{Si}_3\text{N}_4=82,86$ ,  $\text{AlN}=10,63$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3=6,51$ , foi alcançado o objetivo com dureza  $H_v= 21\text{GPa}$  e tenacidade  $K_{ic}=5,30$ , geometria quadrada  $12 \times 12 \times 6$ , chanfro de  $20^\circ\text{C}$  e espessura do chanfro  $0,08\text{mm}$ . O objetivo desse trabalho foi à construção das pastilhas e utiliza-las em testes de torneamento do ferro fundido cinzento. Nesse trabalho ficou evidenciado que essa ferramenta possui comportamento único quando usinamos ferro fundido cinzento.

**Palavra chave:** Usinagem, ferro fundido cinzento, cerâmicas, adesão.

### 1. INTRODUÇÃO

Sabendo-se da aplicabilidade dos materiais cerâmicos, conforme Lanna, et al.2003, esse trabalho seguiu uma rota não convencional para testes de usinagem. Fazendo uso da necessidade de desenvolvimento de novas ferramentas para usinagem, esse trabalho visou a construção das ferramentas, caracterizações e posterior realização de testes práticos para justificar suas propriedades e assim ampliar o caminho para desenvolvimento de ferramentas cerâmicas futuras. As justificativas que levaram, ao desenvolvimento dessa ferramenta cerâmica à base de nitreto de silício é por esse ser um material cerâmico muito utilizado para aplicações estruturais em altas temperaturas, devido a sua combinação de propriedades termomecânicas, além dos materiais cerâmicos ter como seu principal campo de aplicação a usinagem do ferro fundido cinzento, onde o cavaco de característica curta não tende a causar difusão na ferramenta (Edwards, 1993; Diniz, 1999). A aplicabilidade deste no ferro fundido cinzento se justifica por esse ser um material muito usado na indústria automotiva entre outras devido a suas propriedades e baixo custo. Portanto mesmo sendo um material considerado comum, as indústrias ainda buscam uma melhoria na sua usinabilidade com finalidade de cada vez mais reduzir custos.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Material da peça

O ferro fundido cinzento utilizado nesse trabalho possui composição nominal em peso, Tab. (1). Este material muito utilizado na fabricação de bloco de motores, devido a sua resistência a choque térmico, vibração, e a alta temperatura.

Tabela 1. Composição química do ferro fundido cinzento em %

Composição	C	S	P	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Mo
	3,04	0,11	0,068	2,58	0,42	0,05	0,07	0,02	0,005

Propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido cinzento (Technical Articles, 2000; ASM, 1996; Guesser, 1997; Hick, 2000).

Resistência à tração [MPa] 235  
Módulo de elasticidade [GPa] 110  
Resistência à fadiga [MPa] 100  
Condutividade térmica [W/(mK)] 48  
Dureza [HB] 200  
Limite de escoamento 0,2% 160

A associação das propriedades salientadas anteriormente faz deste material uma excelente opção para aplicações em blocos de motores, além de outras aplicações como: discos de freios, escapamentos, coletores, turbinas, entre outras, demonstrando a sua grande importância nas indústrias manufatureiras. (Oathout 1978, Sergeant 1978, Cooper 1978; Dawson 1994c.; Guesser 1997; Marquard et al. 1998; Dawson et al.; 1999 ; Mocellin, 2002).

### 2.2 Material da ferramenta de corte

Nesse teste de usinagem foram usadas pastilhas cerâmicas à base nitreto de silício derivado da composição 82,86 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 10,63 AlN e 6,51 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com geometria quadrada, seguindo o código ISO SNGN 120608 (Sandvik, 1994).

A sinterização dos compactos foi executada em forno com resistência de grafite, sob atmosfera de N<sub>2</sub>. O ciclo de sinterização utilizado é apresentado a seguir:

- 0 a 1000°C com taxa de 15°C/min, sob vácuo
- 1000°C a 1750°C com taxa de aquecimento de 25 °C/min, e pressão de 0,1MPa de N<sub>2</sub>.
- 1750°C, isoterma de 30 minutos, sob 1,5 MPa
- 1750°C a 1900 °C, com taxa de 25 °C/min, 1,5 MPa de N<sub>2</sub>
- 1900 °C, isoterma de 60 minutos, a 1,5 MPa.
- Resfriamento com taxa de 25°C/min.

Os corpos-de-prova, previamente compactados uniaxial e isostaticamente, a frio, foram colocados em um cadinho de grafite, envolvidos por uma mistura composta de 70 % de nitreto de silício (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) e 30 % de nitreto de boro (BN), denominada “camada protetora”, visando minimizar a perda por dissociação e, também, evitar a oxidação do nitreto de silício (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>).

## 2.3 Teste de usinagem

Os testes de usinagem foram executados em um torno CNC, marca Romi, modelo Centur 30D, rotação máxima 4000 RPM, potencia de 10CV, do Laboratório de Estudos da usinagem (LEU – DEMAR).

Os testes realizados com estas ferramentas foram executados sem o uso de fluido de corte.

A temperatura de corte na interface peça-ferramenta foi medida utilizando um pirômetro de radiação infravermelho modelo Cyclops-52, fabricado pela Minolta-Land, na interface ferramenta cavaco sem interferência humana.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão demonstrados os resultados de análise por microscopia eletrônica, densidade relativa, microdureza, e tenacidade a fratura, além dos resultados obtidos no processo de usinagem. As apresentações dos resultados preliminares serão dadas em forma de gráficos, onde serão demonstrados o desgaste VB em função do comprimento de corte ( $l_c$ ), temperatura em função do comprimento de corte e rugosidade em função do comprimento de corte.

### 3.1 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Após as amostras sinterizadas, foram lixadas, polidas e submetidas a ataque químico de sais fundidos (1:1 de NaOH-KOH) por 15 min, a 500°C, para revelação microestrutural. A análise da morfologia de grãos da amostra sinterizada foi efetuada utilizando-se de um microscópio eletrônico de varredura modelo LEO 1450VP.

Visando à melhoria da imagem obtida e facilidade na interpretação dos resultados, as amostras foram recobertas com um filme de ouro, para tornar a superfície condutora.

O aspecto dessa composição, Fig. (1), indica uma microestrutura majoritariamente de grãos com alta razão de aspecto (relação comprimento/diâmetro), indicando que os parâmetros de sinterização utilizados foram eficientes para obtenção de uma microestrutura de grãos de alfa-SiAlON alongados, em detrimento de microestrutura de alfa-SiAlON equiaxiais, comuns neste tipo de material cerâmico. Estes aspectos microestruturais favorecem o aumento da tenacidade à fratura deste cerâmico devido, principalmente ao mecanismo de deflexão das trincas, por possuir grãos muito mais alongados, conforme citado por Santos 2001.

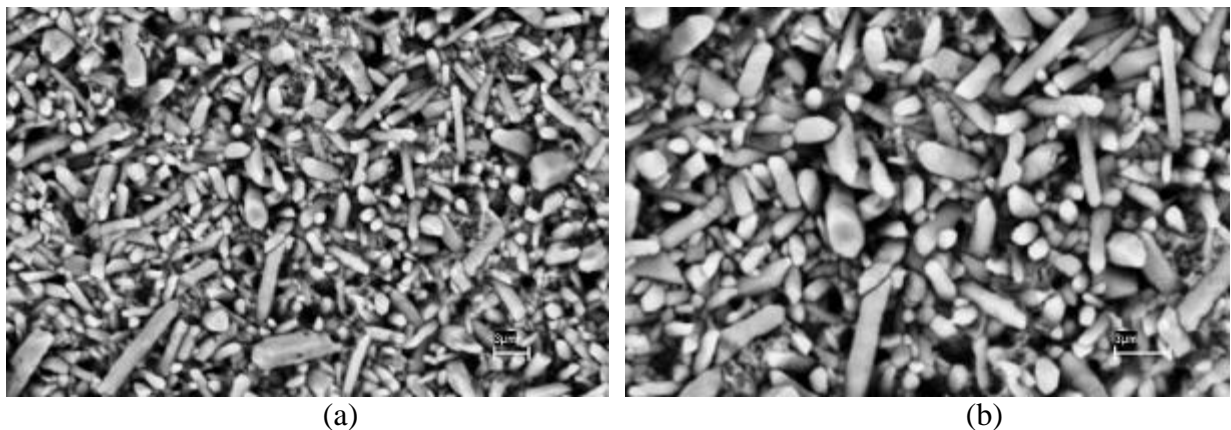


Figura 1. Microestrutura da pastilha: a) SNYA - 15 - 5000x. b) SNYA - 15 - 8000x

### 3.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas da pastilha são representadas pela microdureza Vickers e tenacidade à fratura, ambos obtidos pelo método de indentação, submetidos impressões com indentador piramidal com variações de carga variando de 0,5Kg, 1Kg, 1,5Kg, 2Kg, onde essa variação permitiu uma análise detalhada de dureza, sendo tomada como padrão a maior carga, por gerar menor dureza.

A uniformidade na medição da microdureza confirma os dados da análise microscópica observando valores de dureza que variaram em media de 24,1 GPa , 22,4 GPa , 21,3 GPa e 20 GPa, devido à formação de alfa-Sialon, que possui dureza cerca de 25% maior que o alfa-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> e devido a redução da quantidade de fase intergranular (mais macia que a fase alfa- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) no sistema.

Os resultados de microdureza e tenacidade à fratura da composição estudada são demonstrados na Tab. (2).

Tabela 2. Propriedades da ferramenta.

Composição	Densidade Relativa (%)	Dureza <sub>(2000kg)</sub> (GPa)	Tenacidade à fratura – K <sub>IC</sub> (Mpa.m <sup>1/2</sup> )	Tamanho médio de grãos (µm)
SN (15 vol.%)	98,1	20,0	5,3	0,68

Detalhes da geometria e da aresta de corte da ferramenta são mostrados na fig. (2).

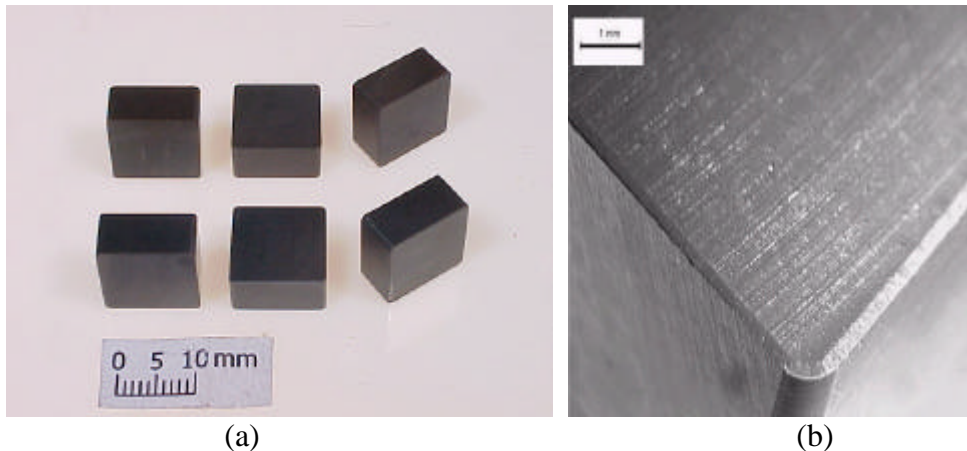


Figura 2. Vista geral da ferramenta à base de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

### 3.3 Testes de usinagem

Os testes foram realizados em etapas diferentes de usinagem fixando o avanço de 0,3mm/volta e variando a velocidade (150, 230 e 400m/min) e profundidade (1, 2, e 3mm). Para cada aresta da ferramenta utilizou um conjunto de parâmetros, processando gráficos com quatro curvas. Na Figura (3) é descrito o comportamento do desgaste da ferramenta, utilizando velocidade de corte variáveis de 150, 230, 400, 400m/min, profundidade de corte variável de 1, 2, e 3mm. Nessas velocidades de corte, a ferramenta apresenta um comprimento de corte 600m por temperatura e desgaste de flanco 0,20 mm, com velocidade de 150 m/min. Ficou evidenciado não existir mecanismo preponderante de desgaste, para as condições utilizadas, demonstrando que o aumento da velocidade de corte diminui o desgaste da ferramenta, onde nem mesmo com o aumento da profundidade de corte de 2mm para 3mm observou-se influencia no desgaste VB. Esse fato se justifica devido ao fato de haver uma acomodação natural entre a ferramenta e a peça, além de estar dentro da temperatura de dissolução do floco de grafite conforme citado por Fang et al 1998. Um fator importante nesses testes preliminares é que com o aumento da velocidade de corte, o desgaste diminui mantendo-se constante. Nota-se que nos ensaios com maior velocidade de corte o desgaste por abrasão foi mínimo, Figs. (4c) e (4d), entretanto, nos ensaios com menor velocidade de corte o desgaste por abrasão e lascamento foi mais severo, Figs. (4a) e (4b). Para a medida do desgaste de flanco durante os testes foi utilizada uma lupa graduada com aumento de oito vezes para medida manual da progressão do desgaste. A caracterização dos tipos de desgaste foi realizada com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura e posterior utilização do software Scion Image para análise das imagens.

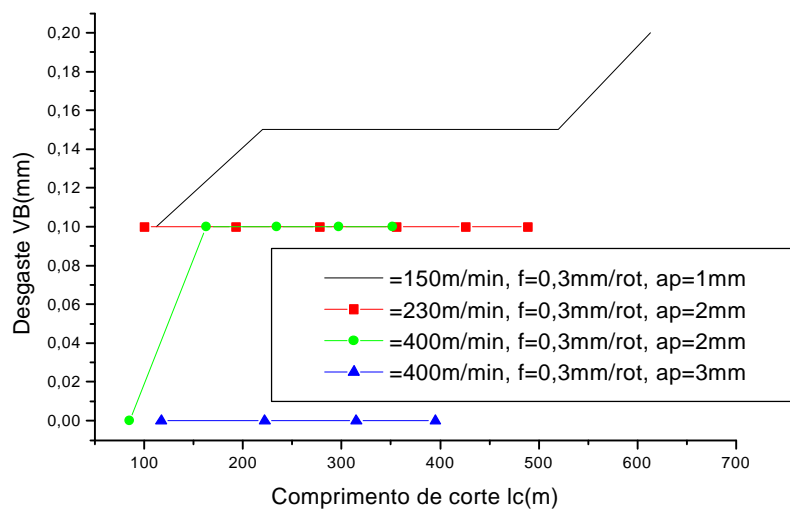


Figura 3. Desgaste de flanco em função do comprimento de corte.

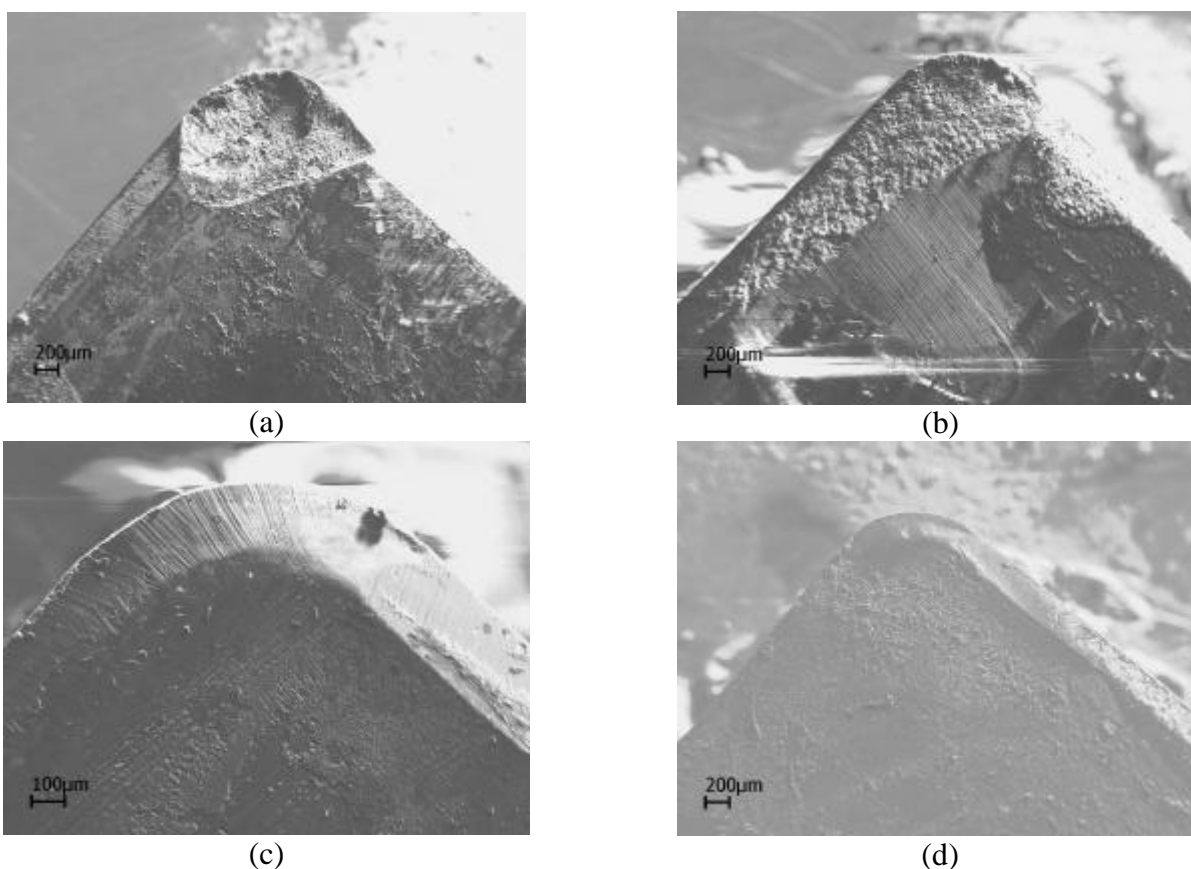


Figura 4. Desgaste das ferramentas

- a)  $V_c=150$  mmin,  $a_p=1$  mm; b)  $V_c=230$  mmin,  $a_p=2$  mm  
 c)  $V_c=400$  mmin,  $a_p=2$  mm; d)  $V_c=400$  mmin,  $a_p=3$  mm

A variação dos parâmetros de corte tiveram grande influência no aumento da temperatura de corte onde a condição mais severa ( $v_c = 400$  m/min e  $a_p = 3$  mm) atingiu valores maiores de temperatura da ordem de  $200^\circ\text{C}$  quando comparado com a condição de corte pouco severa ( $v_c = 150$  m/min e  $a_p = 1$  mm), fig. (5a), porém observa-se uma pequena variação na temperatura em cada condição em particular. Nota-se, entretanto, que a influência dos parâmetros de corte tiveram influência aleatória na rugosidade.

O comportamento do desgaste em relação à variação da severidade dos ensaios não foi o esperado, pois tradicionalmente há um aumento nas taxas de desgaste com o aumento da severidade da operação (aumento da velocidade e da profundidade de usinagem). Entretanto, conforme pode ser observado pelo gráfico de variação da temperatura as maiores temperaturas foram medidas para as condições mais severas, possivelmente isto pode ter causado uma ligeira diminuição nos níveis de dureza e por conseguinte nos níveis da tensão de cisalhamento propiciando uma condição de corte mais favorável, conforme pode ser comprovado por meio do gráfico de variação da rugosidade, já que os menores níveis de rugosidade foram obtidos para as condições ditas mais severas.

Vale destacar que para a maioria das condições de corte as temperaturas medidas apresentaram pouca variação no seu valor, porém com uma ligeira tendência de queda da temperatura, entretanto para a condição de  $400$  m/min e profundidade de usinagem de  $2$  mm observa-se um pico no valor de temperatura por volta dos  $200$  m de comprimento de corte, que refletiu também no valor da rugosidade para este momento, isto poderia ser causado pela presença de alguma heterogeneidade do material que provocaria um aumento nos esforços de corte neste instante.

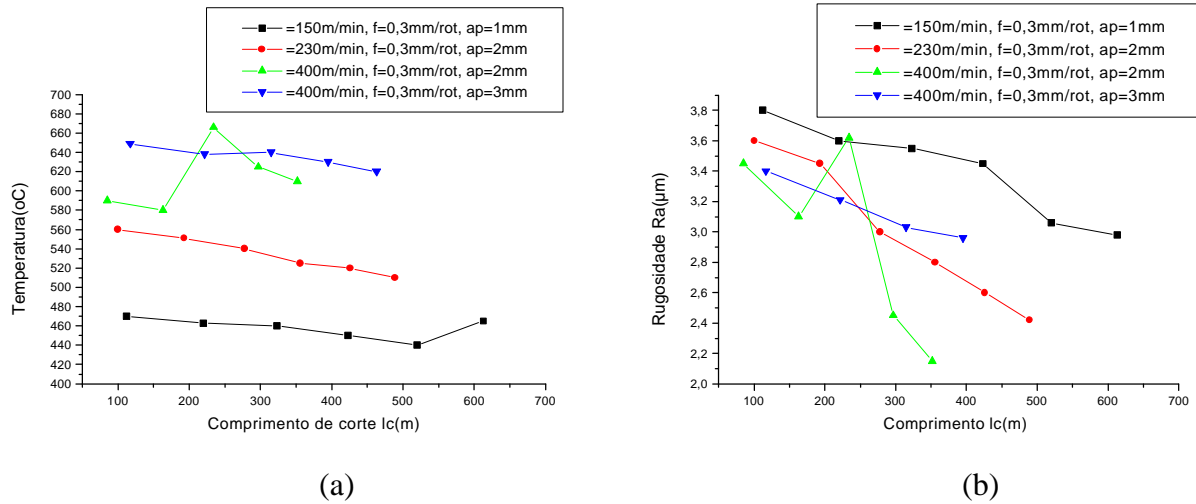


Figura 5. a) Temperatura em função do comprimento de corte;  
b) Rugosidade em função do comprimento de corte.

#### 4. Conclusões

O objetivo desse trabalho foi alcançado, o qual foi proposto o desenvolvimento de ferramenta cerâmica a base de nitreto de silício, através de uma composição estabelecida fabricando assim pastilhas com alta dureza e boa tenacidade a fratura e microestrutura que nos permitiu conduzir testes promissores de usinagem do ferro fundido cinzento.

Esse trabalho possibilitou grandes avanços em projetos de desenvolvimentos de ferramentas permitindo obter através dessa composição e seus parâmetros adotados, cerâmicas com fase alfa-Sialon, com grãos alongados, justificando aos parâmetros de sinterização utilizados. Essa composição levou a obtenção de alta densificação, observando que esses resultados levaram a testes promissores de usinagem. Ficou evidenciado nesse trabalho que ferramentas a base de nitreto de silício possuem excelente qualidade para aplicação em trabalhos de usinagem de ferro fundido cinzento. Este desempenho é demonstrada através de gráficos, nos quais quando se aumenta a velocidade de corte há uma diminuição no desgaste da ferramenta e conseqüentemente nos níveis de rugosidade da peça. Este comportamento singular poderia ser explicado em parte pelo aumento da temperatura causado pelo aumento da severidade da operação possibilitando uma diminuição na dureza e naturalmente na resistência do material favorecendo assim a ocorrência de menores taxas de desgaste, pois a operação de corte foi facilitada.

#### 5. AGRADECIMENTOS

A FAPESP e à CAPES pelo apoio financeiro.

#### 6. REFERENCIAS

- ASM. **Speciality Handbook: Cast Irons**. Estados Unidos: ASM International, 1996, p. 33-267.
- COOPER, K. P.; LOPER Jr., C. R. Some Properties of Compacted Graphite Cast Iron. **AFS Transactions**, v. 86, p. 241-248, 1978.
- DAWSON, S. et al. The effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron. In: **COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING**

- DAWSON, S. **Mechanical and Physical Properties of Compacted Graphite Iron at Elevated Temperatures**. SinterCast S.A, Switzerland, Fev.1994a.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. São Paulo: MM Editora, 1999.
- EDWARDS, R. **Cutting tools**. 1º Edição. Editora University Press Cambridge.1993.
- Fang, L.; Gao, Y.; Si, S.; Zhou, Q., Effect of graphitized cast irons hardness on wear of ceramics. *Wear* v. 221 p. 55-60, october 1998.
- GUESSER, L. W.; GUEDES, L. C. **Desenvolvimentos Recentes em Ferros Fundidos Aplicados à Indústria Automobilística**. In: IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA, São Paulo, 1997.
- HICK, H.; LANGMAYR, F. All star cast. **Engine Tecnology International**, Germany, p. 40-42. jan/2000.
- Lanna, M.A.; Silva, C.R.M.; Souza, J.V.C. properties of silicon nitride sintered at normal pressure
- MARQUARD, R.; HELFRIED, S.; McDONALD, M. Crank it up: New materials create new possibilities. **Engine technology international**, v. 2, p. 58-60, 1998.
- MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. Florianópolis, 2002a. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- OATHOUT, R. R. Compacted Graphite Iron for Diesel Engines Castings. **Metal Progress**. v. 113, nº 5, p. 54-58, mai. 1978.
- SANDVIK. Tool Wear. In: Modern metal cutting a practical handbook. 1ª ed. Sweden: Tofters Tryckeri AB, 1994.
- SANTOS, C., Dissertação de mestrado, 2001, 100p, FAENQUIL, Lorena-SP
- TECHNICAL ARTICLES. Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron Disponível em: [http://www.castingsource.com/tech\\_art\\_graphite.asp](http://www.castingsource.com/tech_art_graphite.asp). Acesso em: 29 ag. 2000.
- WORKSHOP, 1999, Bad Nauheim. **Anais** Bad Nauheim: 1999.

## **PRELIMINARY STUDIES IN MACHINING OF GRAY CAST IRON WITH CUTTING TOOLS THE SILICON NITRIDE BASE(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>).**

**ABSTRACT.** *Knowledge of the importance of machining process in part manufacture to industrials, mainly at automobile industrias this work follows a not conventional route in literature specially machining. In this work we develop a ceramic tablet of the silicon nitride base, and used as sintering additives:yttrium oxide and aluminium nitride, after tests divers in compositions, objectifying a search of hardness and fracture toughness that given ours the tests promising in machining. The composition have been prepared with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>=82,86, AlN=10,63, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=6,51, where were reached the objective with hardness 21GPa and fracture toughness 5,30, and have gone produce tablets in shape geometry square 12x12x6, chanfer 20°C and chanfer width 0,8 mm. The objective this work was to the construction of tablets and tests in the gray cast iron, where in preliminary tests have had an excellent performance. In this work has been evidence that this cutting tool is owner behavior only in machining of gray cast iron.*

Keywords: Machining, gray cast iron, ceramics, adhesion.