

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Thiago de Souza Barbosa

**Análise dos desgastes da ferramenta cerâmica (Si_3N_4)
na usinagem de ferro fundido nodular**

Taubaté – SP

2017

Thiago de Souza Barbosa

**Análise dos desgastes da ferramenta cerâmica (Si_3N_4) na
usinagem de ferro fundido nodular**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia, da Universidade de
Taubaté para obtenção do Título de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: M. Ivair Alves dos Santos

Taubaté – SP

2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

B238a Barbosa, Thiago de Souza
 Análise dos desgastes da ferramenta cerâmica (Si₃N₄)
 na usinagem de ferro fundido nodular. / Thiago de Souza
 Barbosa. - 2017.
 36f. : il; 30 cm.
 Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) –
 Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia
 Mecânica e Elétrica, 2017
 Orientador: Prof. Me Ivair Alves dos Santos,
 Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.
 1. Torneamento. 2. Ferro fundido nodular. 3. Insertos
 de Si₃N₄. 4. Tipos de desgaste. I. Título.

Thiago de Souza Barbosa

**Análise dos desgastes da ferramenta cerâmica (Si₃N₄) na
usinagem de ferro fundido nodular**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia, da Universidade de
Taubaté para obtenção do Título de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: M. Ivair Alves dos Santos

Data: 27-10-2017

Resultado: Aprovado

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ivair Alves dos Santos

Universidade de Taubaté

Assinatura 

Prof. _____

Universidade de Taubaté

Assinatura 

RESUMO

A demanda de produtos que executem funções de maneira precisa e segura motiva o desenvolvimento de materiais. Devido as suas características de abrasividade, dureza e resistência ao trabalho a quente, o material ferro fundido tem sido desenvolvido em ligas especiais para serem utilizados em cilindros de laminação. Porém, essas características dificultam os processos de usinagem, principalmente na usinagem pesada, onde se remove grandes quantidades de material de uma única vez. Para isso o uso dos parâmetros de corte adequados na usinagem se tornam necessários para não gerarem desgastes indesejados dos insertos e ferramentas, que podem gerar problemas de qualidade e até sucateamento, levando a um aumento no custo do produto final. Nesse trabalho serão apresentados os resultados encontrados em um inserto cerâmico a base de nitreto de silício (Si_3N_4), com comprimento de 39,5mm, largura 20mm, altura 12,7mm e raio de ponta de 2,0 mm. Esse inserto será caracterizado quanto à densidade relativa, microdureza, tenacidade à fratura e fases presentes. Os estudos foram realizados pela usinagem por torneamento em um cilindro de laminação de ferro fundido nodular com diâmetro de 540mm, velocidade de corte ($V_c=5,0\text{mm}$; $9,0\text{mm}$ e $12,0\text{mm}$). A avaliação dos resultados foi em função das avaliações com gráficos, micrografias dos desgastes de flanco (V_b), a rugosidade superficial (R_a) e o comprimento de corte (L_c).

Palavra Chave: Torneamento; Ferro fundido nodular; Insertos de Si_3N_4 ; Tipos de desgaste.

ABSTRACT

The evolution of materials has been motivated by the demand for products that functions accurately and securely. Due to its characteristics of abrasiveness, hardness and resistance to hot work, the cast iron material has been developed in special alloys to be used in rolling cylinders. However, these characteristics hamper machining processes, especially in heavy machining, where large amounts of material are removed at a single time in specific cases. For this purpose the use of cutting parameters in the machining becomes necessary to avoid generating excessive and / or premature wear of the inserts and tools, which can cause problems of quality and even scrap, generating an increase in the cost of the final product. In this work the results will be presented of a ceramic insert based on silicon nitride (Si_3N_4), with Length 39.5 mm, width 20 mm, height 12.7 mm and tip radius 2.4 mm. This insert will be characterized as the relative density, micro hardness, fracture toughness and present phases. The machining tests by turning were performed on a 540 mm nodular cast iron rolling cylinder, velocity ($V_c = 5.0, 9.0$ and 12.0 mm). The results were evaluated according to the micrographs of the cutting edge of the inserts (V_b), the roughness (R_a), the cutting length (L_c) and performing evaluations with graphs.

Keywords: Turning; Ductile iron; Tools Si_3N_4 ; Types of wear.

LISTA DE SIMBOLOS

Si_3N_4	Nitreto de silício
Fe_3C	Carboneto de ferro (Cementita)
Ni_3C	Carboneto de níquel
Al_2O_3	Óxido de alumínio (Alumina)
Ni	Níquel
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Mn	Manganês
C	Carbono
S	Enxofre
P	Fósforo
Ti	Titânio
V	Vanádio
Mo	Molibdênio
Al	Alumínio
Si	Silício
Fe	Ferro
Fof	Ferro fundido
HB	Dureza Brinell (Kgf/mm ²)
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers (Kgf/mm ²)
σ_t	Tensão de deformação (Mpa)
π	Pi
RPM	Rotação por minuto
V_c	Velocidade de corte (m/min)
f	Avanço (mm/rot)
a_p	Profundidade de corte (mm)
d	Diâmetro de torneamento (mm)
n	Número de rotações por minuto (RPM)
L_c	Comprimento de corte (mm)
V_b	Desgaste de flanco
Ra	Rugosidade
μm	Mícron

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivo	9
1.2 Justificativa	9
1.3 Delimitação	10
1.4 Estrutura do trabalho	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Ferros fundidos	11
2.2 Tipos de ferro fundido	12
2.2.1 Ferro fundido nodular perlítico	12
2.2.2 Ferro fundido nodular ferrítico-perlítico	12
2.2.3 Usinabilidade dos Ferros Fundidos	12
2.3 Usinagem	13
2.4 Cavaco	14
2.5 Parâmetros de corte e seus efeitos na usinagem	15
2.6 Torneamento	15
2.7 Usinagem sem fluido de corte	16
2.8 Ferramentas de corte a base de materiais cerâmicos	17
2.9 Ferramentas cerâmicas a base de nitreto de silício (SiAlON)	18
2.10 Propriedades dos insertos cerâmicos	18
3 METODOLOGIA	21
3.1 Tipo de pesquisa	21
3.2 Procedimentos técnicos	21
3.3 Materiais	21
3.4 Composição química	22
4 DESENVOLVIMENTO	23
4.1 Maquinário	23
4.2 Insertos cerâmicos	23
4.3 Parâmetros de usinagem	24
4.4 Métodos de ensaio	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1 Análises dos tipos de desgastes	26
5.2 Mecanismos de desgaste	28
5.3 Efeito da temperatura	29
5.4 Rugosidade superficial	31
6 CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A engenharia moderna atualmente se vê com a grande necessidade de desenvolver novos materiais que devem apresentar níveis maiores de resistência mecânica, tenacidade, entre outras características mecânicas que atendam as necessidades das indústrias. Com o surgimento e desenvolvimento desses novos materiais, se faz também necessário o desenvolvimento da parte ferramental, de insertos e parâmetros de usinagem que garantam a usinagem desses materiais desenvolvidos aliados à qualidade, custo baixo e produtividade.

Isso tem se tornado um grande desafio para os fabricantes de cilindros de laminação, onde são exigidas tolerâncias dimensionais e geométricas cada vez menores, aliados a níveis de dureza cada vez maiores, colocando então grandes desafios para as usinagens das fábricas de cilindros, das oficinas de calibração e reusinagem das laminações que os utilizam (MALÉRE, 2006).

O torneamento de desbaste de peças de grandes dimensões exige maquinário e estrutura de grande porte e toda uma rotina de trabalho diferenciada, o que inclui a utilização de ponte rolante para o manuseio das peças.

Uma das principais alternativas empregadas pela tecnologia atual no processo de usinagem é a otimização dos parâmetros de usinagem de acordo com a seleção adequada do inserto a ser utilizado. Para isso, deve-se considerar as características do revestimento, a geometria do inserto e o material que será usinado (TELES, 2007).

Assim a qualidade das superfícies dos cilindros usinados se torna muito importante. Tensão e temperatura elevada geradas ao longo da usinagem podem induzir alterações na microestrutura, microdureza, gerar trincas superficiais, crateras, dobramento, inclusões, tensões residuais na peça acabada (TRICARD, 1994).

O aumento considerável na dureza superficial conhecido como encruamento superficial, que é quando a estrutura do material se deforma plasticamente durante algum processo de usinagem, esse um exemplo dessas alterações na microestrutura (ROSE, 1999).

O procedimento utilizado foi à realização da usinagem por torneamento de desbaste com diferentes parâmetros de corte adotados, a ferramenta utilizada foi um inserto cerâmico à base de nitreto de silício (Si_3N_4). Dentre os parâmetros de corte

pode-se destacar a velocidade de corte, velocidade de avanço e a profundidade de corte. Essas três grandezas da usinagem estão diretamente ligadas ao volume usinado por unidade de tempo, e a qualidade do produto solicitado. Assim a escolha desses parâmetros é essencial para a eficiência em qualquer etapa de usinagem (FERRARESI, 1977).

Adicionalmente, buscam-se relações entre essas variáveis mencionadas com os resultados da rugosidade, dureza superficial, microdureza, calor gerado e desgastes dos insertos utilizados nos testes. Investigar se os mecanismos de desgastes estão correlacionados com os parâmetros de usinagem utilizados, colaborando principalmente na elaboração de um padrão coerente na usinagem por torneamento com altas taxas de remoção para um cilindro de ferro fundido especial, contribuindo com a melhoria do processo e diminuir custos: com insertos e ferramentas, melhorando seu rendimento; otimização no tempo gasto na usinagem devido da troca de insertos e calços; energia, entre outros insumos.

1.1 Objetivo

O principal objetivo desse estudo é analisar quais são os mecanismos de desgaste no inserto à base de Nitreto de Silício (Si_3N_4), no processo de torneamento de desbaste com altas taxas de remoção, tendo como variáveis os parâmetros de usinagem: velocidade de corte e profundidade de corte. Adicionalmente, buscam-se relações entre esses parâmetros mencionadas com os resultados da rugosidade, dureza superficial, microdureza, calor gerado e desgastes dos insertos usados para a realização da usinagem.

1.2 Justificativa

Investigar se mecanismos de desgastes dos insertos tem uma correlação com os parâmetros de usinagem utilizados, verificando a viabilidade no uso das fórmulas dos parâmetros teóricos encontrados na literatura, contribuindo principalmente na elaboração de um padrão real e coerente de usinagem por torneamento para um cilindro de material ferro fundido nodular, em um cenário específico, a fim de otimizar o processo e diminuir custos: com insertos, uma vez que o seu rendimento será mais

aproveitado; suportes; redução do tempo de usinagem decorrente da troca de insertos e calços; retrabalho, entre outros custos.

1.3 Delimitação

O estudo será realizado para empresas onde o processo de usinagem de torneamento se faz presente, podendo a ideia ser ajustada e aplicada a outros ramos da usinagem para peças de ferro fundido com o uso de insertos cerâmicos.

1.4 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho se divide em:

- o capítulo 1 apresenta o objetivo; justificativa; delimitação e estrutura do trabalho.
- o capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica com os principais conceitos e características dos ferros fundidos e processo de usinagem de torneamento e insertos cerâmicos;
- o capítulo 3 apresenta a máquina utilizada, descrição dos materiais, instrumentos e métodos utilizados neste trabalho;
- o capítulo 4 apresenta como os resultados e discussões obtidos nos testes foram analisados;
- no capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

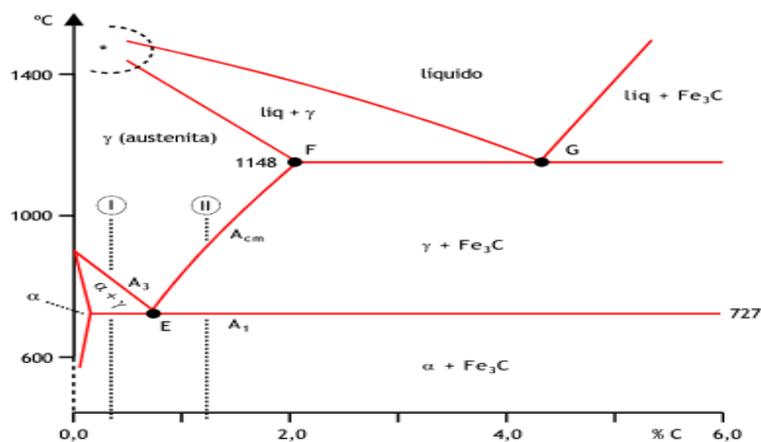
No presente capítulo são apresentadas a composição e diferentes classes dos ferros fundidos; conceitos de usinagem e seus parâmetros de corte; classes e propriedades dos insertos cerâmicos.

2.1 Ferros Fundidos

De acordo com os elementos de liga utilizados na sua fabricação ou dos tipos de tratamentos térmicos utilizados, os ferros fundidos podem apresentar várias propriedades mecânicas, podendo ser aplicado em diversos setores da indústria. Isso faz com que os ferros fundidos sejam os materiais mais utilizados juntamente com dos aços (CHIAVERINI, 1990).

Os ferros fundidos são ligas ferrosas que possuem teores de carbono acima de 2,14%, na prática, grande parte dos ferros fundidos contém entre 3% e 4,5 %, bem como a adição de elementos de liga. Analisando-se o diagrama de equilíbrio da Figura 1 para o sistema ferro-carbono observamos que as ligas dentro das faixas de composições fundem-se totalmente em temperaturas consideravelmente mais baixas do que os aços, conseqüentemente o gasto com energia também é mais baixo (JUNIOR, 2009).

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.



Fonte: MSCPF (2017)

2.2 Tipos de Ferro Fundido

Segundo Chiaverini (1990), atualmente a indústria metal mecânica utiliza os seguintes tipos de ferro fundido como os mais utilizados: Ferro Fundido Cinzento; Ferro Fundido Branco; Ferro Fundido Mesclado; Ferro Fundido Maleável; Ferro Fundido Nodular; Ferros Fundidos Especiais.

2.2.1 Ferro Fundido Nodular Ferrítico

Suas microestruturas são constituídas de nódulos de grafita numa matriz ferrítica, com características de alta permeabilidade magnética e alta tenacidade. Pode ser utilizado no estado bruto (logo após fusão), mas para garantir propriedade de ductilidade e tenacidade se faz necessário passar por um processo de tratamento térmico de recozimento (JUNIOR, 2009).

2.2.2 Ferro Fundido Nodular Ferrítico-Perlítico

Normalmente utilizados na condição bruta de fusão, estes são os mais utilizados. Constituído de uma matriz ferrítica e perlítica, ao redor dos nódulos de grafita distribuídos geralmente encontra-se pequena porcentagem de grafita. Esse material apresenta um baixo custo aliado a uma boa usinabilidade (JUNIOR, 2009).

2.2.3 Usinabilidade dos Ferros Fundidos

Usinabilidade é a propriedade que relaciona a maior ou menor facilidade de um material ter uma parte removida pelos processos de usinagem usuais, como torneamento, fresamento, furação, retífica etc (CHIAVERINI, 1990).

A usinabilidade não tem uma definição exata, como números ou classes por exemplo. Pode-se entender que usinabilidade apresenta o grau de facilidade que um tipo de material oferece quando é usinado, bem como os tipos de desgastes que a ferramenta sofre e por fim a formação de cavacos. A ação de corte da ferramenta durante a usinagem sem problemas à vida útil/estimada do inserto, gera uma boa usinabilidade do material. Entende-se então que o grau de usinabilidade de um material é definido quando comparamos o comportamento de dois materiais diante

dessa facilidade ou não na hora de passarem por algum processo de usinabilidade. Como exemplo, a usinabilidade de um aço carbono é melhor do que a de um aço rápido (HSS) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

De uma forma geral, os ferros fundidos cinzentos e nodulares são tidos como materiais de menor dureza e resistência (BOEHS; AGUIAR; FERREIRA, 2000).

A ocorrência e a distribuição e interação dos elementos de liga definem a usinabilidade dos ferros fundidos, bem como a taxa de resfriamento utilizada. A microestrutura do material é tida como um dos mais importantes fatores que influenciam a vida de um inserto/ferramenta (SORELMETAL, 2000).

Vejamos alguns desses elementos de liga utilizados na fabricação de ferro fundido: Carbono, Silício, Fósforo, Alumínio, Antimônio, Boro, Cromo, Cobre, Molibdênio, Telúrio, Estanho, Titânio, Vanádio e Nióbio (SORELMETAL, 2000).

Steadita é dura e quebradiça, influenciando de maneira prejudicial à usinabilidade (SORELMETAL, 2000).

Manganês pode ser benéfico e prejudicial ao mesmo tempo, pois, este elemento aumenta a temperabilidade, mas durante a solidificação a segregação nos contornos de grãos pode ser suficientemente alta para produzir contração, carbonetos e austenita instável. Estes defeitos microestruturais e a dificuldade em homogeneização diminuem a usinabilidade e reduzem as propriedades mecânicas (SORELMETAL, 2000).

2.3 Usinagem

A demanda de novos materiais que atendam as necessidades das indústrias move as pesquisas e desenvolvimento de novos materiais de vários tipos de ligas diferentes, capazes de garantir as propriedades mecânicas necessárias, e esse aumento nas propriedades mecânicas influencia diretamente nos processos de usinagem pelos quais esses materiais irão passar (GOMES, 2006).

Quanto aos métodos, podemos citar os estudos referentes ao meio no qual se realiza a usinagem e os facilitadores desta, como por exemplo, os lubrificantes de alto desempenho. Na evolução das ferramentas e insertos, a cobertura das pastilhas por um material que lhe confira melhor resistência ao desgaste tem-se mostrado uma importante alternativa para otimizar a vida da ferramenta. Para alcançar

maiores taxas de remoção tem-se diferentes geometrias, o que influi diretamente na formação do cavaco e determinação das forças de corte (FERRARESI, 1977).

A usinagem é um processo empregado na produção de peças de geometria complexa e de alto controle dimensional, através da remoção do material pela ferramenta, obtendo-se a forma e a dimensão projetada. O material removido da peça chama-se cavaco, e é característico por sua forma irregular. A facilidade com que se retira este material da peça se dá em função de sua usinabilidade. Segundo Ferraresi (1977) dentre os fatores que agem na usinagem temos a geometria e material da ferramenta de corte; meio no qual se realiza a usinagem (gasoso, líquido ou sólido); estabilidade do conjunto máquina-ferramenta-peça; parâmetros de corte: Rotações por Minuto (RPM); Velocidade de Corte (V_c); Avanço (A_v), Profundidade de Corte (A_p) e tipo de material da peça a ser usinada.

Devido à dificuldade em se atribuir uma unidade específica à usinabilidade, em função principalmente do grande número de variáveis envolvidas neste processo, os estudos neste intuito não têm avançado significativamente, observando-se muitas vezes poucas informações sobre os parâmetros utilizados e a dificuldade para se reproduzir tais testes. Além dos aspectos tecnológicos, a usinabilidade também implica em considerações econômicas, tais como produtividade e custos de produção. Com a intenção de padronizar o processo de produção, é comum as empresas manterem um controle com base nos dados reais obtidos na produção, principalmente, para prever a vida das ferramentas, pois interferem diretamente nos custos dos processos (FERRARESI, 1977).

2.4 Cavaco

Cavaco é o material removido da peça submetida aos processos de usinagem. Podemos fazer analogia ao ato de descascar uma laranja, onde a laranja é a peça, a faca é a ferramenta de corte e a casca, o cavaco gerado. O cavaco, dependendo das condições de usinagem e do material da peça, pode ser classificado quanto ao tipo e forma (FERRARESI, 1977).

2.5 Parâmetros de corte e seus efeitos na usinagem

A vida da ferramenta é grandemente influenciada pelas condições de usinagem. Os principais fatores que influenciam na forma como as ferramentas se desgastam são principalmente a velocidade de corte, seguida do avanço e por último pela profundidade de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

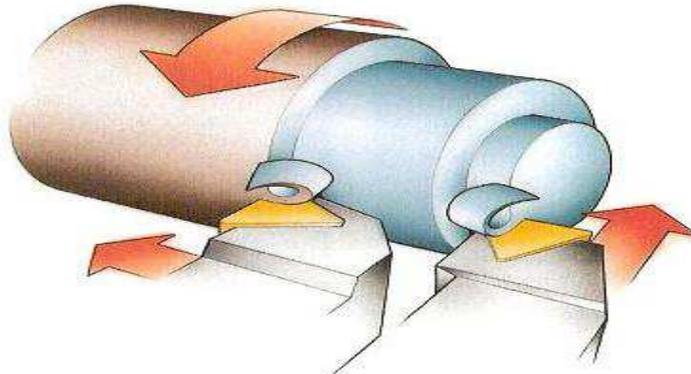
O aumento da velocidade de corte gera um crescimento de energia (calor) e propaga esse calor para ponta da ferramenta que permanece com a mesma área de contato ferramenta-peça, com isso esse parâmetro passa a ser o que mais influencia no desgaste da ferramenta. O aumento do avanço também aumenta o calor no processo, porém, também aumenta a área da ferramenta e recebe esse calor.

Comparando com os parâmetros anteriores, a influência da profundidade de corte é menor, já que ao ser aumentada, ela não meche com a energia destinada ao corte por unidade de área, nem com a velocidade de remoção do cavaco, somente faz com que um volume maior seja retirado (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). Existem também outros fatores que interferem na vida da ferramenta como: Geometria, composição e dureza da ferramenta, fatores metalúrgicos e processo de obtenção do material da peça e características da máquina ferramenta.

2.6 Torneamento

A usinagem por torneamento é um método destinado à conseguir superfícies de revolução utilizando uma ferramenta de corte. Enquanto a peça gira em torno do eixo principal da máquina, a ferramenta se desloca simultaneamente numa trajetória coplanar com o referido eixo. O torneamento pode ser retilíneo (quando a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea) ou curvilíneo (quando a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea). A Figura 2 mostra a ferramenta e a peça durante o processo de torneamento (TELES, 2002).

Figura 2 – Ilustração do deslocamento da ferramenta.



Fonte: Teles (2002)

Segundo TELES (2002) existem dois tipos de torneamento:

- torneamento de desbaste, onde pode-se usar máquinas convencionais para pré-acabamento ou peças que não exigem pequenas tolerâncias dimensionais;
- torneamento de acabamento, entende-se como operação de acabamento a etapa onde a peça terá suas dimensões finais, geralmente são usados tornos CNC para acabamento.

A velocidade de corte na usinagem é dada pela velocidade tangencial ou periférica através da equação (COPPINI, 2006)

- (V_c) Velocidade de corte (m/min);
- (d) Diâmetro torneado (d) (mm);
- (n) Número de rotações por minuto (rpm).

2.7 Usinagem sem fluido de corte

A usinagem de materiais, em geral, sem uso de fluidos de corte, tem se tornado cada vez mais frequente. Para isso, se faz necessária algumas condições, como material da peça e material da ferramenta. Em relação ao material da ferramenta, a usinagem a seco vem aumentando devido ao desenvolvimento de novas classes de insertos e ferramentas tais como o metal duro com novas camadas duras de cobertura, principalmente as de TiCN, TiAlN e AlTiN. Também o cermet e a cerâmica, sendo que essas duas últimas não devem ser utilizadas com fluido refrigerante devido a baixa resistência ao choque térmico (DINIZ, 2006).

As vantagens da usinagem a seco são: custo menor, meio ambiente saudável, melhor segurança do trabalhador, proteção contra efeitos químicos, isenção de sistema de bombeamento, isenção de coleta e filtração, não necessidade de armazenamento, etc (NARUTAKI, 1997).

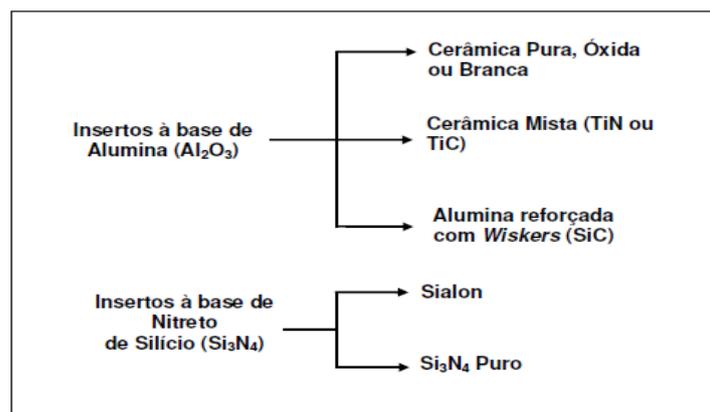
2.8 Ferramentas de corte a base de materiais cerâmicos

As ferramentas de corte exercem importância fundamental, tanto no aspecto econômico, quanto no resultado obtido na peça (tolerância dimensional e acabamento superficial) (BOEHS; AGUIAR; FERREIRA, 1986).

As principais propriedades que um material para ferramenta deve possuir são alta dureza (principalmente a quente), boa resistência ao desgaste, alta resistência mecânica, boa estabilidade química, não ter afinidade com o material a usinar e boas propriedades térmicas (BOEHS; AGUIAR; FERREIRA, 1986).

As ferramentas de corte de materiais cerâmicos podem ser fabricadas com arestas definidas. Os óxidos, carbetos e nitretos são usados como materiais na fabricação das referidas ferramentas de corte por possuírem elevada dureza, excelente estabilidade química e alta resistência à compressão em temperaturas elevadas ($> 1000^{\circ}\text{C}$). Esses materiais cerâmicos estão divididos em dois grandes grupos em função do material utilizado como matriz – óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) ou nitreto de silício (Si_3N_4), a Figura 3 apresenta como estes materiais se diferem entre si de acordo com suas características e propriedades.

Figura 3 - Divisão de materiais cerâmicos para ferramentas de corte



Fonte: SANDVIK (2000).

2.9 Ferramentas cerâmicas a base de nitreto de silício (SiAlON)

As ferramentas de óxidos metálicos ou cerâmica, como são também designadas, possibilitam velocidades de corte excepcionalmente elevadas, a ponto de poderem ser empregadas somente quando as máquinas operatrizes oferecem condições de rigidez e potência que permitam tais velocidades (FERRARESI, 1977).

Os compostos carbono-carbono, ferros fundidos e as ligas a base de níquel (Inconel, Incaloy) são os materiais mais indicados para ser usinada com ferramentas a base de Si_3N_4 . As taxas de remoção de material com as ferramentas de Si_3N_4 são muito superiores as possíveis como ferramentas convencionais. Esse tipo de ferramenta é utilizado na usinagem desses materiais, com alta velocidade de corte, nas indústrias automobilísticas, aeronáutica, aeroespaciais e outras (LANNA, 2004).

O nitreto de silício mantém estável sua dureza até a temperatura de 1200°C , sendo importante nos processos de usinagem com altas velocidades de corte, onde as temperaturas podem chegar a 1200°C e assim reduzir a resistência dos metais (MOSTAGHACI, 1996).

Um dos produtos desse grupo são os Sialons, nome que tem origem nos símbolos dos elementos que o formam, que são, Si, Al, O e N. Esse material tem mostrado excelentes resultados na usinagem de ligas a base de níquel (Inconel, Incaloy), ferros fundidos e aços endurecidos. Os Sialons são ótimo em termos de dureza a quente e resistência ao choque térmico e são bons com relação à tenacidade, porém é péssimo com relação à estabilidade química (JACK, 1986).

2.10 Propriedades dos insertos cerâmicos

a) Resistência às reações químicas

Devido à incidência de altas temperaturas na interface cavaco–ferramenta e ferramenta–peça, o desgaste da ferramenta ocorre geralmente devido à difusão, mecanismo que normalmente não é observado em temperaturas inferiores. Para temperaturas mais baixas, o mecanismo de desgaste predominante, passa a ser a abrasão (BALDONI; BUJAN, 1988).

Neste aspecto, a alumina é o componente ideal para os insertos cerâmicos devido à sua inatividade química. Os insertos à base de nitreto de silício e a alumina reforçada com whiskers (carboneto de silício – SiC) são os mais reativos com o

cobalto e com o ferro. A reatividade do carboneto de silício com materiais ferrosos parece ser a razão pela qual os insertos de $Al_2O_3 + SiC$ possuem baixo desempenho nas aplicações em aços endurecidos, onde o desgaste predominante é o de cratera (COSTA, 1993).

A aplicação do material da ferramenta depende do tipo de material a ser usinado, das condições de corte e das condições da máquina-ferramenta. A capacidade em atender a estes requisitos é função direta de suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e térmicas, e estas por sua vez são dependentes da composição química, da micro-estrutura e do processo de fabricação (PEREIRA; CORREA; PIVATO, 2005).

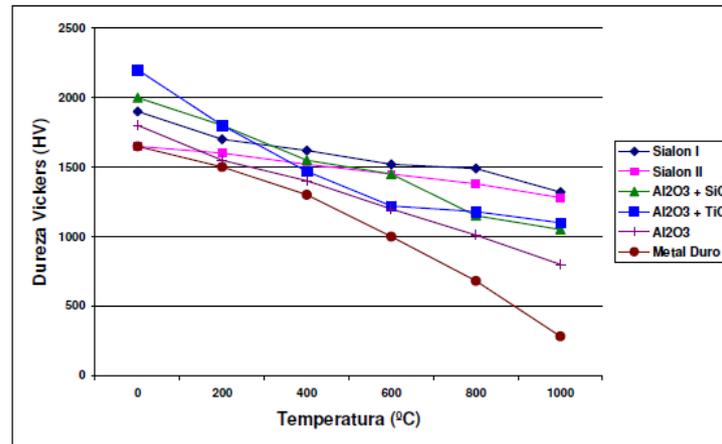
b) Resistência ao choque térmico

Para os insertos cerâmicos, observa-se que a resistência ao choque térmico é inversamente proporcional ao coeficiente de expansão térmica e diretamente proporcional à condutividade térmica do material. Situações que envolvam alterações bruscas de temperatura como corte interrompido ou utilização interrompida de fluido refrigerante pode causar fraturas nos insertos cerâmicos. Os insertos à base de nitreto de silício (Si_3N_4) são os mais resistentes ao choque térmico, fato este, que se deve à sua boa condutividade térmica, e baixo coeficiente de expansão (EZUGWU; WALLBANK, 1987).

c) Dureza

A dureza a frio da aresta de corte deve ser geralmente três vezes maior que a dureza da peça. Portanto, para tornear aços cuja dureza seja superior a 60 HRC (aproximadamente 760 HV), seria necessária uma ferramenta com dureza superior a 2200 HV. Porém, o fato de alguns insertos cerâmicos não apresentarem dureza ideal na temperatura ambiente, não deve ser considerado isoladamente, pois a dureza a quente do material da ferramenta e da peça, variam de acordo com o par, ferramenta – peça. Na Figura 4 é mostrada a variação da dureza com relação à temperatura para determinados materiais (NAKAYAMA; ARAI; KANDA, 1988).

Figura 4 - Valores da dureza com relação à temperatura para determinados materiais.



Fonte: Komanduri; Samanta (1989).

d) Resistência mecânica

As cerâmicas geralmente falham devido à fratura frágil, apresentando uma deformação plástica reduzida antes da ruptura. A ruptura ocorre devido à propagação catastrófica de um defeito (trinca) quando sujeito a tensões suficientemente altas. Os insertos cerâmicos apresentam alta resistência à compressão, que varia muito pouco com relação à temperatura, (EZUGWU; WALLBANK, 1987). Porém é pouco resistente ao choque.

3 METODOLOGIA

No presente capítulo são apresentados os materiais do corpo de prova que foi usinado, os insertos cerâmicos utilizados para o torneamento, métodos e análises realizadas no cilindro, equipamentos de inspeção e medição utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 Tipo de pesquisa

O trabalho teve como base uma pesquisa quantitativa, onde por meio do teste realizado foram obtidos dados utilizados para análise e desenvolvimento de gráficos bem como fotos demonstrando os tipos de desgastes encontrados nos insertos.

3.2 Procedimentos técnicos

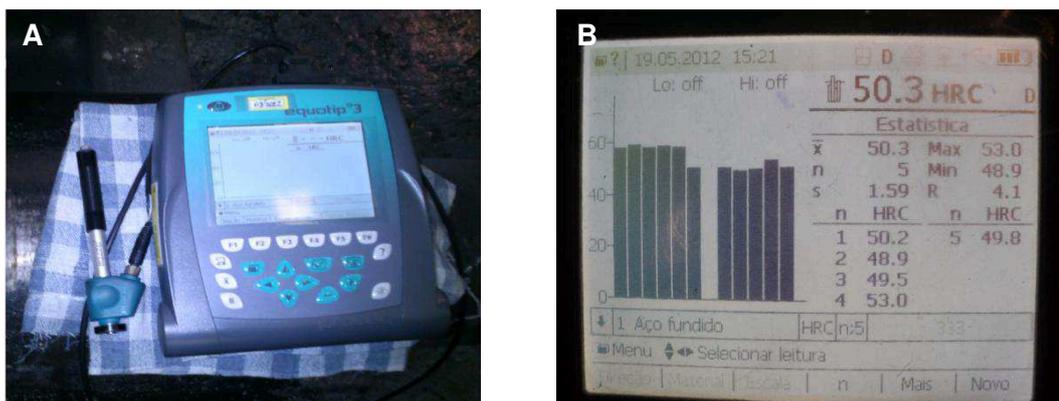
O trabalho foi desenvolvido a partir de uma situação real em uma fábrica de cilindros, onde diante do problema de encruamento superficial surgiu a ideia dos testes que geraram informações importantes para empresa.

3.3 Materiais

Os testes foram realizados em um cilindro de ferro fundido nodular perlítico especial fabricado por processo de fundição estática em molde de areia e coquilha, com diâmetro de 540 mm e comprimento de 1350 mm.

Esse material foi caracterizado quanto à dureza bruta, apresentando 50,3 HRC (Figura 5B) para essa medição foi utilizado durômetro da marca EQUATIP 3 (Figura 5A).

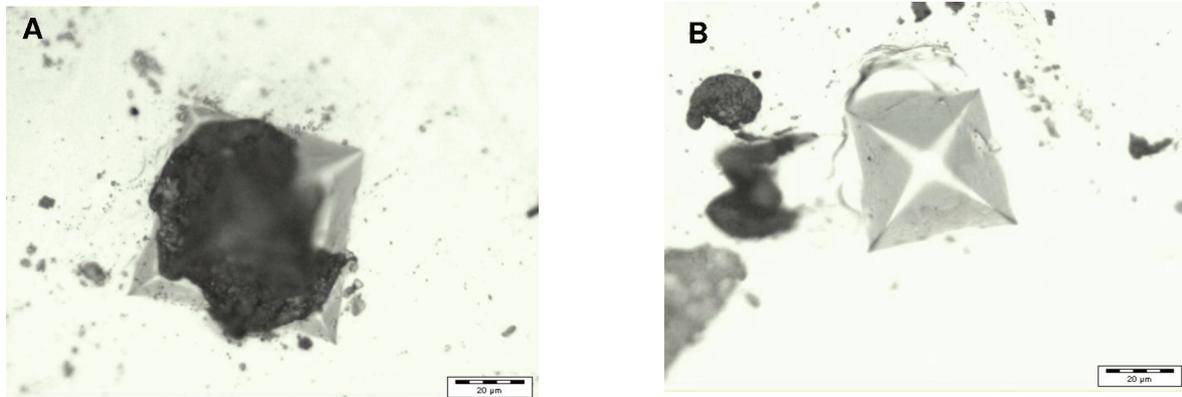
Figura 5 – A: Durômetro 3; B: Tela do durômetro com valor encontrado.



Fonte: Próprio autor

A microdureza foi comparada entre as estruturas da matriz e grafita do ferro fundido perlítico especial, o valor da microdureza do nódulo de grafita (Figura 6A) foi de 25,2 HRC e a microdureza da matriz perlítica especial (Figura 6B) foi de 59,2 HRC. Podemos verificar que a matriz perlítica apresenta mais que o dobro da dureza da grafita.

Figura 6 – A: Microdureza do nódulo de grafita, B: Microdureza da matriz perlítica especial.



Fonte: Próprio autor

3.4 Composição química

A composição química do material é confirmada com a literatura referente à norma ASTM A 536, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do ferro fundido nodular perlítico especial.

Material FoFo Nodular Perlítico	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	MIN.
	3,2	1,25	0,3	2,2	0,4	0,3	—	—	
	3,5	1,9	0,55	3,3	1,05	0,6	0,9	0,025	MAX.

Fonte: Próprio autor

4 DESENVOLVIMENTO

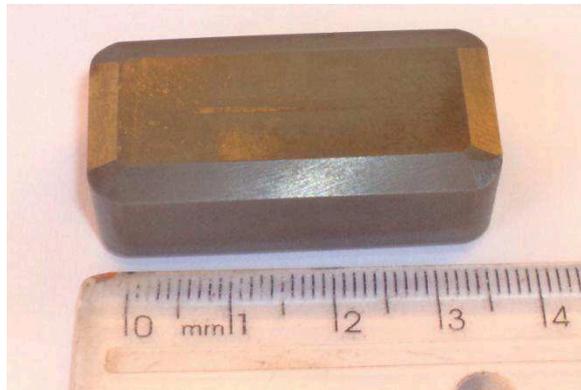
4.1 Maquinário

O processo de usinagem foi realizado a seco e a máquina utilizada foi um torno Romi UT 29 CN - MCS, Mod. Proteo- TMS32-G, RPM máximo 320 e potência do motor 100 CV.

4.2 Insertos cerâmicos

Os insertos cerâmicos utilizados tem a especificação LNU 6688 T são à base de Si_3N_4 . Esses insertos apresentam geometria de 12,7 x 20 x 39,5 mm, raio de ponta de 2,4mm e densidade relativa $\geq 98\%$, dureza de 17,50 Gpa e tenacidade à fratura de $5,60 \text{ Mpa m}^{1/2}$ (Figura 7).

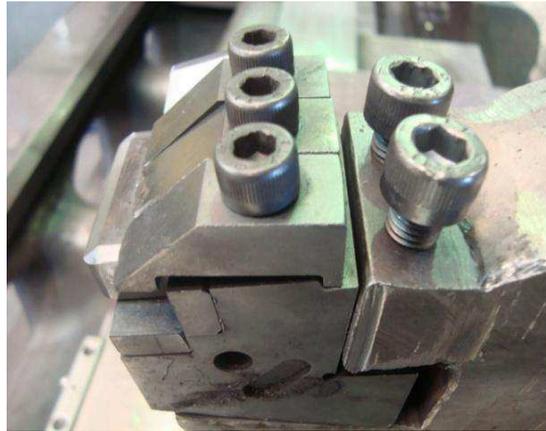
Figura 7 – Inseto a base de Si_3N_4 .



Fonte: Próprio autor

Os insertos foram fixados em um suporte (figura 8) desenvolvido especialmente para uso desse tipo de inserto para usinagem com grande quantidade de material removido e o ângulo do castelo utilizado para todos os parâmetros de usinagem foi de 25° , com objetivo de obter uma melhor distribuição da taxa de remoção do material na aresta de corte do inserto.

Figura 8 – Suporte do inserto para usinagem.



Fonte: Próprio autor

4.3 Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem foram definidos em função das condições de trabalho em campo, e esses parâmetros levam em consideração as altas taxa de remoção de material em uma usinagem pesada, os avanços também foram adotados de maneira a avaliar uma crescente na elevação do mesmo. Para os testes, a V_c (m/min) e RPM foram constantes, devido todos os passos serem realizados partindo do mesmo diâmetro. O a_p (mm) e f (mm/rot) foram variados, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de usinagem usada no processo de torneamento.

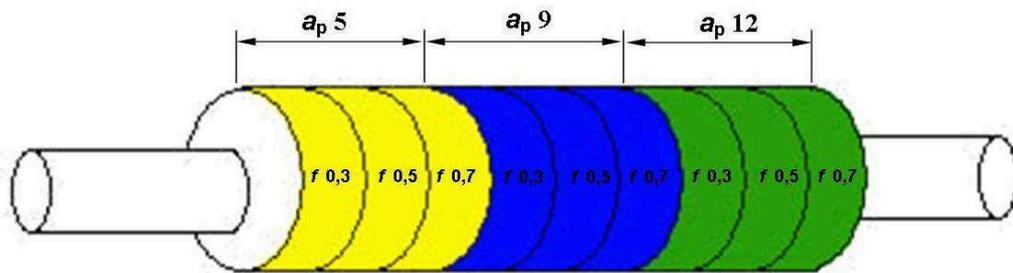
Condições	V_c (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)
A	105	0,3	5
		0,5	
		0,7	
B	105	0,3	9
		0,5	
		0,7	
C	105	0,3	12
		0,5	
		0,7	

Fonte: Próprio autor

4.4 Métodos do ensaio

O corpo de prova foi dividido em nove partes iguais, sendo assim o comprimento de usinagem (l_u) para cada variável foi de 150 mm, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Desenho esquemático do corpo de prova.



Fonte: Próprio autor

A medição da rugosidade superficial da peça foi feita com um rugosímetro da marca Mitutoyo (Surftest 402 series 178), realizou-se três medições a 120° em cada variável.

Foram retiradas amostras para as análises da microdureza e microestrutura em cada variável e análises dos desgastes dos insertos feitas nesse trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

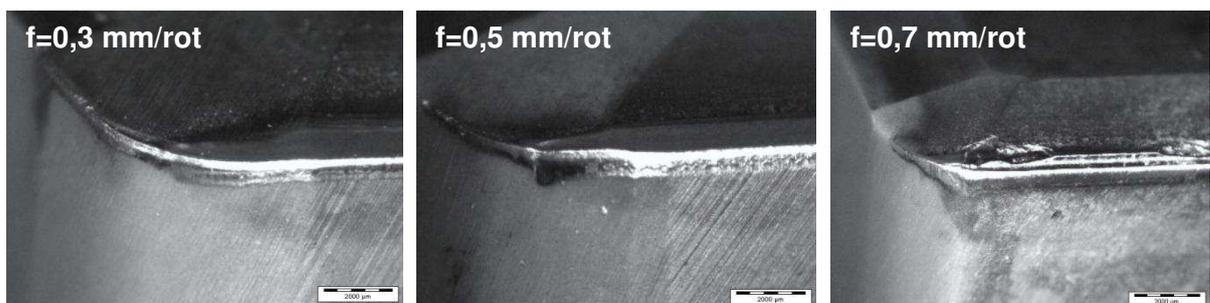
5.1 Análises dos tipos de desgastes

Analisando as Figuras 10, 11 e 12 pode-se observar que os desgastes sofreram influência direta dos parâmetros utilizados, sendo que esses apresentam interferência nos resultados de rugosidade superficial das peças. Portanto a vida da ferramenta é avaliada em função do desgaste de flanco, fratura da aresta de corte e possíveis variações bruscas das rugosidades.

As ferramentas cerâmicas a base de Si_3N_4 mostraram que após os processos de usinagem para as condições conforme Tabela 2, estão demonstradas a seguir:

Na usinagem da condição **A** (Figura 10), houve a presença de desgaste de flanco e cratera, na condição de $f=0,3$ mm/rot, deformação plástica e lascamento na aresta de corte para $f=0,5$ mm/rot, enquanto que para $f=0,7$ mm/rot o desgaste predominante foi de flanco e lascamento na superfície de saída da ferramenta. Entretanto esses desgastes atuam de maneira diferente quando aumento do $a_p=9$ mm.

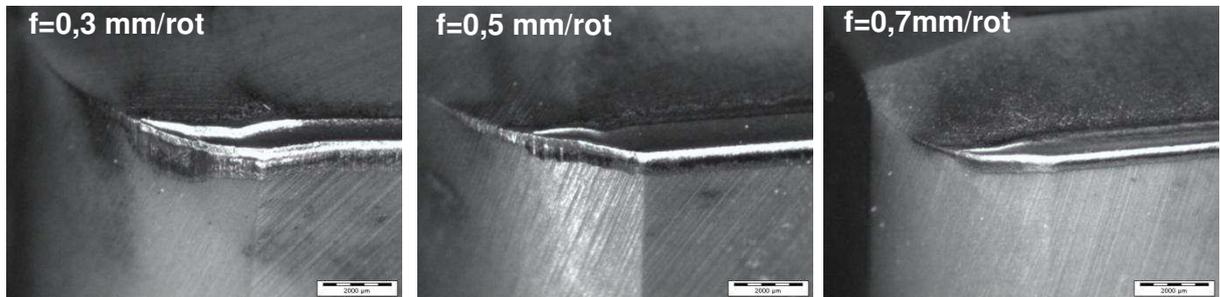
Figura 10 - Micrografia (mostrando os tipos de desgastes ocorridos nas condições A): $f= 0,3$ mm/rot, $f= 0,5$ mm/rot., $f= 0,7$ mm/rot.



Fonte: Próprio autor

Na usinagem para condição **B** (Figura 11), podemos observar que houve desgaste de flanco e cratera, mas foram menos agressivos em função do aumento de avanços.

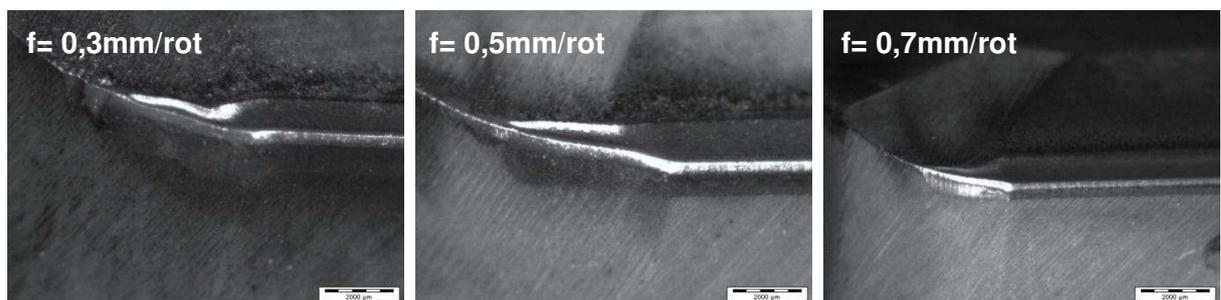
Figura 11 – Micrografia, (mostrando os tipos de desgastes ocorridos nas condições B): $f=0,3\text{mm/rot}$, $f=0,5\text{mm/rot}$, $f=0,7\text{mm/rot}$.



Fonte: Próprio autor

Na usinagem para condição **C** (Figura 12) pode ser observado que o desgaste de flanco e cratera foi atuante, porém com o aumento do avanço os mesmos reduziram a área de desgaste na ferramenta.

Figura 12 - Micrografia (mostrando os tipos de desgastes ocorridos nas condições C): $f=0,3\text{mm/rot}$, $f=0,5\text{mm/rot}$, $f=0,7\text{mm/rot}$.



Fonte: Próprio autor

Assim pode se dizer que o desgaste no flanco ocorre por abrasão, e acontece de maneira gradual não promovendo fratura abrupta. Nessas condições o desgaste abrasivo ocorre pela fraca adesão entre a ferramenta e a peça causando desgaste pela remoção mecânica do material da ferramenta. Quando as ligações atômicas da superfície da ferramenta são quebradas, as partículas são removidas junto com o cavaco. As crateras (cavidades) são criadas pela saída dos cavacos sobre a

superfície da ferramenta e são agravadas pelas altas temperaturas. Essas temperaturas na superfície de saída da ferramenta causam redução das resistências aumentando as tensões que são concentradas em uma pequena área na superfície da ferramenta, que por consequência permitem temperaturas elevadas pontuais que promovem retiradas de partículas causando as crateras. Isso interfere nos parâmetros tribológicos na interface ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, podendo ampliar ou reduzir os mecanismos de desgastes (abrasão, adesão, difusão). Na usinagem a seco a resistência da ferramenta e a profundidade de corte geraram uma maior concentração de calor na aresta de corte, que provavelmente promoveu a deformação do material durante o processo de corte. Nessa condição é possível comprovar a importância da temperatura na deformação e remoção do material, diminuindo a incidência sobre a superfície de saída e flanco da ferramenta.

5.2 Mecanismos de desgaste

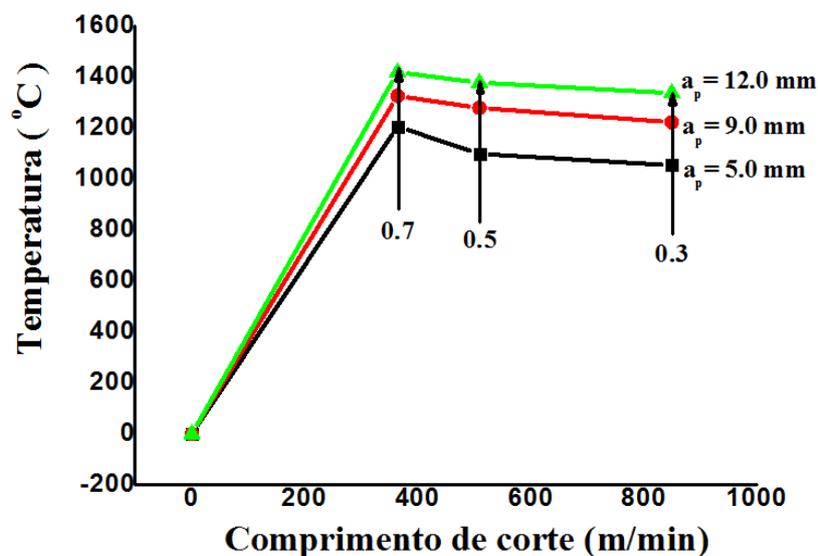
Durante os testes de usinagem do ferro fundido nodular, observou-se que para todas as condições utilizadas ocorreu abrasão na superfície de flanco da ferramenta e na superfície de saída ocorreram os mecanismos de desgaste mecânico e tribo-químico/mecânico. Analisando a Figura 10, para $f = 0,7\text{mm/rot}$ podemos observar a presença de lascamento no centro da cratera. Nessa região pode ocorrer fenômeno de captura, intensa deformação localizada, levando a deformação termoplástica de uma fina camada do material do cavaco. Isso leva ao implícito contato atômico no processo de captura, impulsionado por determinada área apropriada de contato, conhecida como zona de fluência do cavaco. Sob essas condições de corte a temperatura do corpo e as tensões normais aumentam com a velocidade e isso leva a dissolução de partículas da ferramenta, fato que se caracteriza pela rápida

formação de cratera na superfície de saída da ferramenta e conseqüente origina pequenas falhas em forma de lascas.

5.3 Efeito da Temperatura

A Figura 13 mostra a influencia da temperatura em função do comprimento de corte. A distribuição da temperatura na interface ferramenta/peça variam em função do avanço e profundidade de corte.

Figura 13 – Gráfico de temperatura da interface ferramenta/peça.



Fonte: Próprio autor

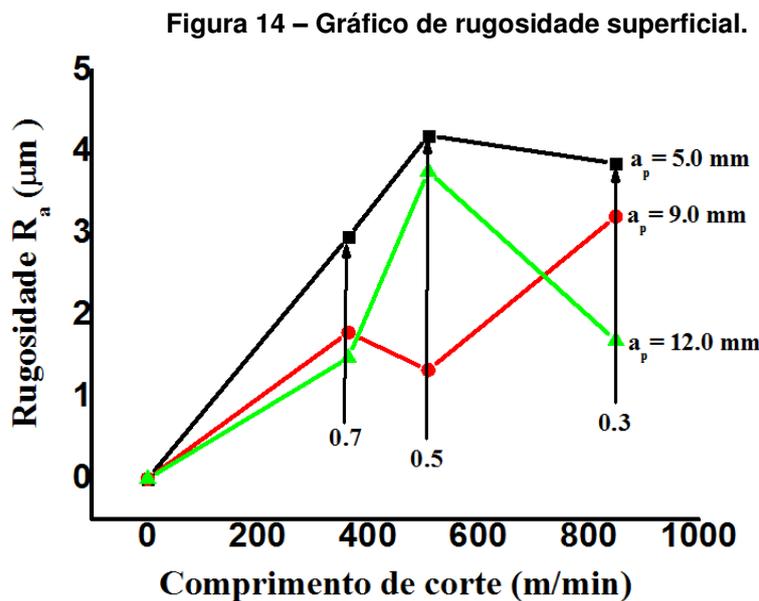
Pode ser observado que a temperatura na zona de deformação é mais elevada quando profundidade de corte é elevada comparado quando a profundidade de corte é pequena. A temperatura na interface de corte da ferramenta/peça aumenta cerca de 1054°C até 1206°C quando aumentado $f = 0,3$ até 0,7 mm/rot para uma a_p de 5 mm. Para a_p de 9 mm a temperatura varia de 1223°C até 1326 °C e para a_p de 12 mm a temperatura varia 1338 °C até 1419 °C. Em geral, o aumento de temperatura é afetado pelo aumento do avanço e profundidade do corte

conseqüentemente havendo um aumento da taxa de remoção do material e da energia de corte.

Sabe-se que existe uma deformação elástica por trás da aresta de corte e sob a face do flanco, enquanto há deformação compressiva à frente da aresta de corte. Os aumentos de tensão de tração, com a profundidade do corte, em si geralmente resultam em grave deformação uniforme em torno da aresta de corte. Além disso, a deformação plástica à tração atinge seu maior valor quando a_p de 12 mm em comparação com a_p de 5 mm. Durante o processo de corte, a deformação compressiva severa ocorre em torno da área à frente da aresta de corte. Por outro lado, a deformação elástica é normalmente gerada por trás da aresta de corte quando a aresta de corte passa pela superfície do material. Se o valor absoluto da deformação elástica é maior do que a da deformação de compressão previamente produzida pela aresta de corte pior é a superfície usinada (rugosidade). De acordo com a discussão acima, quanto maior a profundidade de corte mais profunda é a deformação elástica, portanto, a tensão de compressão residual será maior, podendo assim se obter maiores profundidades. Isto é porque quanto maior a profundidade de corte, mais profunda é a deformação plástica à tração atrás da ferramenta de corte com a superfície usinada. Portanto, de alta tensão de compressão residual e uma penetração mais profunda da tensão de compressão residual pode ser obtida ao cortar com elevado avanço e a_p . Pode ser visto que o $f = 0,70$ mm/rot e $a_p = 12$ mm, a temperatura da superfície pode atingir 1400 °C, que é próximo da temperatura de transformação de fase, para este material. Ao reduzir o $f = 0,50$ mm/rot e $a_p = 9,0$ mm, a temperatura da superfície cai para 1280 °C, cerca de 150 °C menor do que $f = 0,70$ mm/rot, e para um $f = 0,30$ mm/rot e $a_p = 5,0$ mm, a temperatura da superfície cai para 1054 °C.

5.4 Rugosidade superficial

A Figura 14 mostra a influência dos parâmetros utilizados na rugosidade superficial e que para cada profundidade de corte houve uma variação da rugosidade.



Fonte: Próprio autor

Percebe-se que a a_p teve uma influência significativa sobre a rugosidade da superfície usinada, os maiores valores de rugosidade de superfície são observados na $a_p = 5,0$ mm, isso devido a ferramenta ter pouca adesão à superfície usinada. Com a variação dos avanços pode-se observar uma rugosidade máxima de 3,45 Ra. Nas Figuras. 10, 11, 12 podem ser visto que o desgaste ocorreu predominantemente em duas regiões durante os testes: a superfície inclinada e a aresta de corte. O desgaste na superfície de inclinação não tem qualquer influência sobre a rugosidade da superfície usinada. No entanto, o desgaste na aresta de corte da ferramenta, influencia diretamente na rugosidade da superfície usinada, uma vez que a aresta da ferramenta está em contato direto com a superfície recém-usinada.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nos testes de torneamento do cilindro de ferro fundido nodular utilizando ferramentas a base de Si_3N_4 , verificou que os mecanismos de desgaste que operam nas ferramentas de Si_3N_4 são vários (abrasão, captura, dissolução, adesão e difusão) e que são dependentes da profundidade de corte utilizada, enquanto que os tipos de desgastes observados foram o desgaste de flanco e cratera.

Sendo as condições de torneamento muito agressivas no processo, a ferramenta a base de Si_3N_4 apresentou importantes resultados não apresentando falha catastrófica (fratura). Utilizado neste processo profundidades de corte variando em três faixas, notou o grau e o tipo de mecanismo de desgaste operante durante o processo de corte, e por consequência a rugosidade superficial da peça e temperatura na interface ferramenta/peça.

Considerando que o mesmo material do cilindro tem um comportamento diferente durante a usinagem e com base nos resultados dos desgastes dos insertos, um padrão de operação pode ser proposto para cada faixa média de remoção desse tipo de liga. Outro fator importante para estabelecer um padrão de usinagem é a garantia da estabilidade do conjunto ferramenta-peça, essa condição é fundamental para que os parâmetros possam ser aplicados de forma eficaz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALDONI, J. G.; BULJAN, S. J. T. (1988). **Ceramics for Machining. Ceramic Bulletin**, v. 67, No. 2, p. 381-387.

BOEHS, L.; AGUIAR, C. G.; FERREIRA, J.C. (2000), “**A Usinagem do ferro fundido nodular de fundição contínua**”, Máquinas e Metais, 2000, pp.58-72.

CHIAVERINI, Vicente. “**Aços e ferros fundidos**”. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 6ª Edição, 1990.

COSTA, D. D. (1993). **Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Dissertação de Mestrado, 110 p.

COSTA, F.J. (2000), “**Usinagem a seco e de materiais endurecidos**”, Máquinas e Metais, pp. 30-43.

DINIZ, A.S.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. “**Tecnologia da usinagem dos materiais**”. 5ª ed, São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006.

EZUGWU, E. O.; WALLBANK, J. (1987). **Manufacture and properties of ceramic cutting tools**: a review, Materials Science and Technology, v. 3, p. 881.

FERRARESI, D. “**Fundamentos da Usinagem dos Materiais**”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1 ed., 1977.

GOMES, C. (2006), “**Novos revestimentos dão origem a ferramentas mais eficientes**”, Máquinas e Metais”, pp. 52-67.

JACK D. **Advanced ceramics as metals cutting tool materials**. Chemistry and industry, 1986.

JÚNIOR, ARM. **Influência dos elementos de liga CU-Ni-Mo, nas Propriedades mecânicas e na austemperabilidade do ADI**, 2009.

KOMANDURI, R. E SAMANTA, K. (1989). **Ceramics. Metals Handbook**, v. 16, p. 98-103, 9º Edição.

LANNA, M.A. et al., **Influência dos parâmetros de corte na usinagem de carbono-carbono com ferramentas cerâmicas**, In.48 Cong. Brasileiro de cerâmica, 2004, Curitiba – P.R. Anais.

MALÈRE, E. P., **Análise Comparativa de Ferramentas Cerâmicas na Usinagem de Ferros Fundidos e Aços Endurecidos**, Dissertação de Mestrado, FEGUNESP (2006).

MSPCFonte: <http://www.mspc.eng.br/ciemat>: Acessado em 17/Maio/2017

MOSTAGHACI, H., **Advanced ceramic materials, Key engineering materials**, pp. 122-124, Copyright, 1996.

NAKAYAMA, K; ARAI, M.; KANDA, T. (1988). **Machinig characteristics of hard materials**. Annals of the CIRP, v. 37/1, pp. 89 – 92.

Narutaki, N.; Yamane, Y.; Tashima, S.; KUROKI, H. (1997). **A new advanced ceramic for dry machining**. CIRP Annals, v. 46.

PEREIRA, C.; CORREA, S.J.; PIVATO, C. (2005), **“Como se apresentam e para que servem os lubrificantes e refrigerantes”**, Máquinas e Metais, pp. 352-361.

ROSE, S. **Work hardening-a material kind of problem**. Tooling and Production Magazine, Ohio, 1999.

SANDVICK

<http://www.sandvik.coromant.com/ptpt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/Pages/default.aspx>: Acesso em: 13/Maio/2017.

SORELMETAL – **Ductile Iron Data for Design Engineer**. Ductile Iron Society. 1990.
<<http://www.ductile.org/didata/default.html>>: Acessado em: 05/mar./2017.

TELES, José Marcelo. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

TRICARD, M. **Residual effects of finishing methods**. In: ASM Handbook. Surface engineering. 5 ed. 1994. pp. 144-151.