

Felipe Marcato Alexandre da Silva

Estudo da Utilização de Ferramentas a Base de Nitreto de Silício (Si_3N_4) e Alumina (Al_2O_3) na Usinagem do Ferro Fundido Vermicular

Guaratinguetá
2015

Felipe Marcato Alexandre da Silva

Estudo da Utilização de Ferramentas a Base de Nitreto de Silício (Si_3N_4) e Alumina (Al_2O_3) na Usinagem do Ferro Fundido Vermicular

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Vitor Candido de Souza

Guaratinguetá
2015

S586e

Silva, Felipe Marcato Alexandre da

Estudo da utilização de ferramentas a base de nitreto de silício (Si_3N_4) e alumina (Al_2O_3) na usinagem do ferro fundido vermicular./ Felipe Marcato Alexandre da Silva – Guaratinguetá, 2015.

64 f. : il.

Bibliografia : f. 62-64

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza


1. Usinagem 2. Ferro fundido 3. Ferramentas de corte 4. Cerâmica (Tecnologia) I. Título

CDU 621.9


Felipe Marcato Alexandre da Silva

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

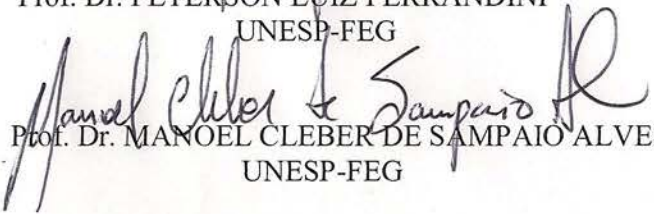
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG

Janeiro de 2016

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus familiares e namorada, *Luísa de Castro Regiani Barbosa*, pelo apoio e compreensão durante todo o período de graduação,

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza*, que me ofereceu toda a estrutura e diretrizes para a realização deste trabalho, sempre pronto para me auxiliar a qualquer momento,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

à Tupy Fundições de Mauá, em particular os engenheiros Anderson José Saretta Tomaz da Silva e Julia Marangoni, pelo apoio e também pela viabilização da doação dos corpos de prova utilizados neste trabalho, sem os quais o mesmo não seria possível.

Silva, F. M. A. **Estudo da utilização de ferramentas a base de nitreto de silício (Si_3N_4) e alumina (Al_2O_3) na usinagem do ferro fundido vermicular.** 2015. 64 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados no mundo moderno, consumindo milhões de dólares anualmente. Em função disto, é fundamental para as indústrias automotivas a redução dos custos em seus processos de usinagem de ligas resistentes ao calor, como é o caso do ferro fundido vermicular (CGI), que vem apresentando uma crescente evolução de sua aplicação em blocos de motor diesel, disco de freios, entre outras aplicações, por apresentar propriedades mecânicas superiores ao ferro fundido cinzento. Apesar desta superioridade, seu uso ainda é limitado devido à sua dificuldade de usinagem, além disso, as ferramentas de corte são apresentadas como principal fator no aumento do custo de usinagem. Buscando uma alternativa para uma melhor usinabilidade do CGI, este trabalho tem como objetivo o estudo de dois tipos de ferramentas cerâmicas desenvolvidas no Brasil, e avaliar comparativamente o desempenho através do torneamento a seco. Para isso, foi utilizado o ferro fundido vermicular da classe 450 e duas ferramentas: cerâmica a base de nitreto de silício (Si_3N_4) e uma a base de alumina (Al_2O_3), com velocidade de corte (V_c) de 300, 400 e 500 m/min; avanço (f) de 0,2mm/rot e profundidade de corte (a_p) de 0,5mm, utilizando três replicas e iniciando com arestas de corte novas. Os resultados demonstraram que a ferramenta de Al_2O_3 apresentou melhor desempenho na V_c de 500m/min, enquanto que a ferramenta de Si_3N_4 obteve melhor resultado na V_c de 300m/min. Isso pode ser explicado em função da ferramenta a base de Si_3N_4 possui fase intergranular macia, denominada amorfa, enquanto que a alumina possui maior resistência a abrasão devido a sua alta refratariedade. Os resultados deixam claro que as ferramentas apresentam importante potencial para usinagem do ferro fundido vermicular, sendo necessário um controle rigoroso dos parâmetros de corte utilizados.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Ferro fundido vermicular. Ferramentas cerâmicas. Torneamento a seco. Redução de custo.

Silva, F. M. A. **Study of the use of silicon nitride (Si_3N_4) and alumina (Al_2O_3) based tools in machining of compacted graphite iron.** 2015. 64 p. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Machining is one of the most commonly manufacturing processes used in the modern world, consuming millions of dollars annually. Because of this, it is crucial for the automotive industry to reduce costs on their heat-resistant alloy machining processes, such as compacted graphite iron (CGI), which has shown an increasing trend of its application in diesel engine blocks, brakes disks, among other applications, due to its superior mechanical properties to gray cast iron. Despite this advantage, its use is still limited due to its difficulty of machining, moreover, cutting tools are displayed as the main factor in increasing the machining cost. Seeking an alternative to a better machinability of CGI, this paper aims to study two types of ceramic tools developed in Brazil, and benchmark their performance by dry turning. For this, were used CGI class 450 and two tools: ceramic of silicon nitride (Si_3N_4) and alumina-based (Al_2O_3), with a cutting speed (V_c) of 300, 400 and 500 m / min; feed (f) of 0.2 mm / rev and depth of cut (a_p) of 0.5 mm, using three replicates and starting with new cutting edges. The results showed that the Al_2O_3 tool had the best performance in V_c of 500 m / min, while the Si_3N_4 tool had the best results in V_c of 300 m / min. This can be explained by the tool of Si_3N_4 based include soft intergranular phase, called amorphous, while alumina has higher abrasion resistance due to its high refractoriness. The results make it clear that the tools have significant potential for machining of compacted graphite iron, being necessary a strict control of the cutting parameters used.

KEYWORDS: Machining. Compacted graphite iron. Ceramic cutting tool. Dry turning. Cost Reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Operação de torneamento	16
Figura 2 – Forma da grafita nos ferros fundidos	18
Figura 3 – Forma da grafita tridimensional.....	19
Figura 4 – Faixa de estabilidade do ferro fundido vermicular	21
Figura 5 – Vida das ferramentas para corte interrompido do ferro fundido	22
Figura 6 – Vida das ferramentas para corte contínuo do ferro fundido	22
Figura 7 – Comparação da usinabilidade dos materiais testados por Mocellin	23
Figura 8 – Ensaios realizados por Xavier com ferramentas de metal duro, cerâmica e CBN	24
Figura 9 – Comparação entre as ferramentas utilizadas por Doré.....	25
Figura 10 – Formação do cavaco e ruptura em ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular	27
Figura 11 – Influência do aumento da quantidade de grafita vermicular sobre a vida da ferramenta de corte	27
Figura 12 – Efeito do aumento da porcentagem de perlita no CGI.....	28
Figura 13 – Influência da perlita para operações utilizando (a) metal duro e (b) CBN.....	29
Figura 14 – Efeito de teor do silício do CGI na vida da ferramenta de torneamento.....	30
Figura 15 – Relação entre o teor de titânio e o desgaste de uma ferramenta de metal duro no processo de torneamento.	32
Figura 16 – Formas de desgaste nas ferramentas de corte.....	40
Figura 17 – Desgaste frontal ou de flanco em ferramenta de corte.....	41
Figura 18 – Desgaste de cratera em ferramenta de corte.....	41
Figura 19 – Deformação plástica da aresta de corte nas ferramentas.....	42
Figura 20 – Lascamento na ferramenta de corte.....	42
Figura 21 – Trincas na ferramenta de corte.....	43
Figura 22 – Porta ferramentas Sandvik modelo DSBNR 2020K 12	46
Figura 23 – Dimensões do porta ferramentas.....	46
Figura 24 – Corpo de prova antes do processo de pré-usinagem	47
Figura 25 – Micrografia do ferro fundido vermicular (a) sem ataque de nital, 100x (b) com ataque de nital, 100x	48
Figura 26 – Vista frontal e lateral do inserto cerâmico.....	49
Figura 27 – (a) Ferramenta de Si_3N_4 , (b) Ferramenta de Al_2O_3	50

Figura 28 – (a) Difratoograma de raios X da ferramenta de nitreto de silício; (b) Microestrutura obtida por MEV da ferramenta de Si_3N_4	52
Figura 29 – (a) Difratoograma de raios X da ferramenta de alumina; (b) Microestrutura obtida por MEV da ferramenta de Al_2O_3	53
Figura 30 – Desgaste de flanco vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b)	54
Figura 31 – Desgaste de flanco da ferramenta de Si_3N_4 para (a) $V_c = 300$ m/min; (b) $V_c = 400$ m/min; (c) $V_c = 500$ m/min	55
Figura 32 – Desgaste de flanco da ferramenta de Al_2O_3 para (a) $V_c = 300$ m/min; (b) $V_c = 400$ m/min; (c) $V_c = 500$ m/min	56
Figura 33 – Força de corte vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b)	57
Figura 34 – Força passiva vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b)	58
Figura 35 – Força de avanço vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b)	58
Figura 36 – Temperatura vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).....	59
Figura 37 – Rugosidade (R_a) vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).....	60
Figura 38 – Rugosidade (R_y) vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).....	60

LISTA DE SÍMBOLOS

CGI	Compacted graphite iron (ferro fundido vermicular)
Si ₃ N ₄	Nitreto de silício
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio (alumina)
V_c	Velocidade de corte
f	Avanço
a_p	Profundidade de corte
NbC	Carboneto de nióbio
Y ₂ O ₃	Óxido de ítrio
Fe	Ferro
C	Carbono
Si	Silício
Fe ₃ C	Carboneto de ferro (cementita)
Mpa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
W	Watt
m	Metro
K	Kelvin
Mg	Magnésio
PCBN	Nitreto de boro cúbico policristalino
CBN	Mitreto de boro cúbico
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio
CER-NS260	Ferramenta de cerâmica não comercial
HB	Dureza Brinell
MnS	Sulfeto de manganês
TiC	Carbeto de titânio
SiC	Carbeto de silício
MgO	Óxido de magnésio
TiN	Nitreto de titânio
ZrO ₂	Óxido de zircônio
SiO ₂	Dióxido de silício (cristais de vidro)
Al	Alumínio
O	Oxigênio
N	Nitrogênio
VB	Desgaste de flanco médio
KT	Profundidade da cratera
KM	Distância frontal entre cratera e flanco
$V_{Bmáx}$	Desgaste de flanco máximo
V_{Bn}	Desgaste de entalhe
R_a	Desvio médio aritmético de rugosidade
$R_{máx}$ ou R_t	Profundidade máxima de rugosidade
R_q	Desvio aritmético quadrático de rugosidade
R_t	Altura total do perfil de rugosidade
R_z	Altura máxima do perfil de rugosidade (média das 5 alturas máximas)
R_y	Altura máxima do perfil de rugosidade
K_r	Ângulo de posição
Nital	Solução de álcool e ácido nítrico
K_{1c}	Tenacidade à fratura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	MOTIVAÇÃO	13
3	JUSTIFICATIVAS	13
4	OBJETIVOS	14
5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
5.1	USINAGEM.....	15
5.1.1	Torneamento	15
5.2	FERRO FUNDIDO	16
5.2.1	Tipos de ferro fundido	17
5.2.2	Ferro fundido vermicular	18
5.2.2.1	Fabricação do ferro fundido vermicular	20
5.2.2.2	Usinabilidade do ferro fundido vermicular.....	21
5.2.2.3	Efeitos da forma da grafita na usinabilidade	26
5.2.2.4	Influência da perlita	28
5.2.2.5	Efeito do silício	30
5.2.2.6	Efeito do enxofre	31
5.2.2.7	Efeito do titânio.....	31
5.2.2.8	Efeito do cromo	32
5.2.2.9	Efeito das inclusões	32
5.3	MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE	33
5.3.1	Aplicações com ferramentas de cerâmica	34
5.4	MÁQUINAS OPERATRIZES PARA USINAGEM COM FERRAMENTAS CERÂMICAS.....	36
5.5	VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE	37
5.6	MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE	38
5.6.1	Formas de desgaste	40
5.7	RUGOSIDADE.....	43
6	MATERIAIS E MÉTODOS	45
6.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	45
6.1.1	Máquina ferramenta	45
6.1.2	Suporte da ferramenta	45
6.1.3	Equipamentos para caracterização	46

6.2	CORPOS DE PROVA.....	47
6.3	FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS	48
6.3.1	Inserto cerâmico	49
6.4	CRITÉRIOS PARA FIM DE VIDA DA FERRAMENTA.....	50
6.5	PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS.....	50
6.7	ANÁLISE DAS RUGOSIDADES (R_A E R_Y).....	51
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
7.1	CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA A BASE DE Si_3N_4	52
7.2	CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA A BASE DE Al_2O_3	52
7.3	ANÁLISE DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS.....	53
7.4	ANÁLISE DAS FORÇAS DE CORTE	57
7.5	ANÁLISE DAS TEMPERATURAS	58
7.6	ANÁLISE DAS RUGOSIDADES.....	59
8	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais para as mais diversas aplicações vem sendo objeto de importantes pesquisas realizadas em todo mundo, tendo como objetivo atender as novas implicações dos mercados. Estas evoluções já podem ser observadas nas indústrias automobilísticas, que a cada dia buscam melhor desempenho de seus produtos (motores), redução de emissão de poluentes, redução de custos, entre outros fatores, através de novas alternativas e/ou soluções em materiais para blocos de motores, disco de freios, e outro componentes que possam ampliar as perspectivas de mercado. Entre estes materiais o ferro fundido vermicular aparece como importante material a ser utilizado em substituição ao ferro fundido cinzento.

O ferro fundido vermicular foi descoberto por um erro científico em função de erros de composição química, sendo caracterizado como um material obtido por acaso durante a fabricação do nodular, apresentando a grafita em forma de “vermes” no lugar da forma esférica esperada, resultando em propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o nodular (JUNIOR e GUESSER, 2011). Desde então estudos vêm sendo feitos a fim de melhorar seu processo de obtenção, desenvolvendo processos de controle de metal líquido que permitam a obtenção do ferro fundido vermicular em larga escala, possibilitando assim seu uso na indústria.

Com o avanço tecnológico e científico, melhorias nos processos foram alcançadas para a obtenção do ferro fundido vermicular, conhecido também como CGI (compacted graphite iron), ocasionando melhorias nos produtos fabricados. Isso torna cada vez mais viável a utilização deste material, que apresenta maior dureza em relação ao cinzento e melhor usinabilidade e condutividade térmica em relação ao nodular, sendo ideal para componentes com cargas mecânicas e térmicas simultâneas, como por exemplo, blocos de motor e cabeçotes (DAWSON e SCHROEDER, 2000). Não é somente a aerodinâmica que pode melhorar o desempenho de um veículo, mas também a redução de peso. Com a troca das peças fabricadas com ferro fundido cinzento pelas fabricadas com o vermicular, essa redução se torna possível. Dentre os materiais utilizados para a fabricação de blocos de motor, o CGI é o material que consegue preencher todos os requisitos de forma mais satisfatória, tais como: peso, resistência mecânica, custo do material e considerações ambientais. Mesmo com todo seu potencial, ainda acaba sendo um dos piores candidatos no quesito custo de usinagem (JUNIOR e GUESSER, 2011). Comparado ao ferro fundido cinzento, por apresentar uma pior

usinabilidade, o CGI apresenta um custo de produção maior para as peças, por isso a necessidade de estudos e testes de usinagem é importante.

Basicamente, podemos dividir as pesquisas relacionadas ao CGI em três segmentos: novas e melhores técnicas de usinagem, melhorar o próprio material ou desenvolver novos materiais para assim criar ferramentas melhores (DAWSON et al., 2001). A empresa Tupy Fundições S.A. é a pioneira no desenvolvimento deste material no Brasil, produzindo blocos de motores. Tudo isso levou a empresa a aprimorar a fabricação deste material, que antes era feita adicionando diferentes nodulizantes para obter o ferro nodular e, ao mesmo tempo, titânio como anti-nodulizante, obtendo o ferro fundido vermicular. Atualmente a empresa realiza a nodularização através da adição controlada de magnésio. Este processo requer equipamentos especiais e extrema cautela, pois o teor de magnésio precisa ser alto o suficiente para que o ferro esteja acima do cinzento, mas baixo o suficiente para que esteja abaixo do nodular, além de ser necessário compensar a evaporação de magnésio que acontece durante o processo (DAWSON e SCHROEDER, 2000).

Dawson (2001) demonstrou que apenas a manipulação dos parâmetros metalúrgicos não é suficiente para melhorar a usinabilidade do CGI até o nível utilizado em ferros fundidos cinzentos, assim como Rosa (2009) demonstrou que a influência do titânio no CGI é negativa, pois quanto maior o teor do mesmo presente na liga, menor será a vida da ferramenta, inviabilizando também o uso de ferramentas cerâmicas para este tipo de liga.

Doré (2007) realizou estudos com ferramentas cerâmicas não comerciais, produzidas pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), testando algumas composições de cerâmicas à base de óxido de alumínio (Al_2O_3), carboneto de nióbio (NbC) e óxido de ítrio (Y_2O_3), produzidas na geometria redonda. Os resultados foram comparados, aos obtidos por Xavier (2003), que utilizou cerâmicas de nitreto de silício (Si_3N_4), em função da falta nas literaturas de usinagem do ferro fundido vermicular com ferramentas à base de óxido de alumínio. Doré (2007) observou que os resultados obtidos nesse trabalho demonstraram que as cerâmicas produzidas pelo IPEN tiveram desempenho expressivamente melhor que a ferramenta comercial, chegando a um aumento de 120% do tempo de vida e mostrando a importância da pesquisa na busca de novos materiais de ferramenta.

Complementando as informações existentes na literatura, este trabalho teve como objetivo o torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas a base de Si_3N_4 e Al_2O_3 , sem a utilização de fluido de corte.

2 MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, o consumo de energia, a poluição do ar e os resíduos industriais têm despertado especial atenção por parte das autoridades públicas. O meio ambiente tornou-se um dos assuntos mais importantes dentro do contexto da vida na atualidade, pois sua deterioração implicará em danos para a população. Motivados pela pressão dos órgãos ambientais, os parlamentares têm elaborado leis cada vez mais rigorosas no sentido de proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos. Todos esses fatores citados anteriormente têm influenciado as indústrias, centros de pesquisas e universidades a pesquisarem processos de produção alternativos, criando tecnologia que minimizem ou evitem a produção de resíduos que agridam o meio ambiente. A usinagem a seco tem despertado a atenção de pesquisadores e técnicos da área de usinagem como alternativa aos fluidos tradicionais (Silva et al., 2010).

3 JUSTIFICATIVAS

Com o atual desenvolvimento das indústrias, crescem também as necessidades de desenvolvimento de novos materiais e melhoria dos processos de fabricação. Com a usinagem possuindo uma parcela considerável do custo final do produto, é de grande importância o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte que possibilitem trabalhar com velocidades cada vez maiores e a um custo cada vez mais reduzido.

Espera-se que esse trabalho promova avanços científicos e tecnológicos no desenvolvimento e aplicações de ferramentas de corte de materiais cerâmicos no torneamento do ferro fundido vermicular.

Apesar das vantagens prescritas das ferramentas cerâmicas e de existir um mercado em plena expansão no campo da usinagem com estas ferramentas, no Brasil existem poucos estudos relacionados desenvolvimento, fabricação e aplicação destas ferramentas aos processos de usinagem, limitando-se somente a aplicação das mesmas quando adquiridas comercialmente. Atualmente, as ferramentas cerâmicas são produzidas em sua quase totalidade no exterior, sendo estrategicamente interessante o domínio da tecnologia de fabricação e aplicação desses produtos no Brasil. Desta forma, pode-se evitar, ou reduzir, a sua importação, favorecendo o custo final destes produtos e dos materiais usinados, além de promover processos de usinagem saudáveis.

4 OBJETIVOS

O presente projeto tem como objetivo a aplicação de ferramentas a base de Si_3N_4 e Al_2O_3 , sem a utilização de fluido de corte no torneamento do ferro fundido vermicular, e realizar estudo comparativo de desempenho utilizando diferentes velocidades de corte nas mesmas condições. Serão comparadas além do desgaste de flanco das ferramentas: as forças de corte, temperatura e rugosidade superficial da peça.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho foi constituída com base em livros, periódicos e artigos publicados em congressos, considerando as recentes informações como suporte teórico e experimental favoráveis aos avanços desejados neste trabalho.

Foram abordados temas como: ferramentas cerâmicas, aplicações de ferramentas cerâmicas, materiais cerâmicos, propriedades, usinagem a seco, ferramentas de corte, usinagem e ferro fundido vermicular.

5.1 USINAGEM

A usinagem é um termo designado para descrever o processo de remoção de material de uma peça, conferindo-lhe forma, dimensão, acabamento ou a combinação qualquer destes três itens. Geralmente é usada para converter tarugos fundidos, forjados ou pré-moldados em perfis desejados, com dimensões e acabamentos específicos, de acordo com a necessidade do projeto (FERRARESI, 1977).

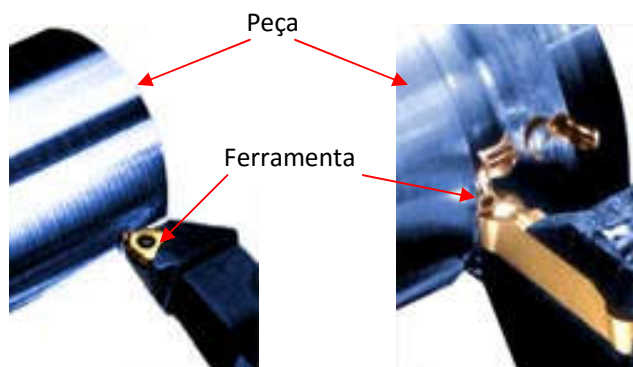
Ainda pode ser dividida em duas categorias: processos convencionais e não convencionais. A primeira categoria engloba os processos onde as operações de corte empregam energia mecânica na remoção do material, principalmente por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça. Alguns exemplos de processos convencionais são: torneamento, fresamento, furação, aplainamento, mandrilamento, serramento, brochamento, roscamento e retificação. Na segunda categoria, as operações utilizam outro tipo de energia e geralmente a taxa volumétrica de remoção de material é muito menor que a dos processos convencionais. Alguns exemplos podem ser citados como: jato d'água, jato abrasivo, fluxo abrasivo, ultrassom, eletroquímica, eletroerosão, feixe de elétrons, laser e plasma (KALPAKJIAN, 1995, apud SOUZA, 2004; MACHADO et al., 2011).

5.1.1 Torneamento

O torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, onde a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. As operações de

torneamento podem ser classificadas como desbaste e acabamento, sendo a primeira visando obter na peça a forma e dimensões próximas às desejadas e a segunda destinada a obter as dimensões finais, acabamento superficial especificado ou ambos. (FERRARESI, 1977).

Figura 1 – Operação de torneamento.



Fonte: (SOUZA, 2005)

No torneamento, a ferramenta penetra na peça, cujo movimento rotativo ao redor de seu eixo permite o corte contínuo e regular do material. A força necessária para retirar o cavaco é feita sobre a peça, enquanto a reação dessa força é contrabalanceada pela ferramenta presa ao porta-ferramenta. Os movimentos relativos entre peça e ferramenta utilizados no torneamento são o movimento de corte, realizado entre a peça e a aresta de corte da ferramenta, movimento de avanço, que desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça e o movimento de penetração, que determina a profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça (ALVES, 2006 apud DORÉ, 2007).

5.2 FERRO FUNDIDO

Chiaverini (2005) define o ferro fundido como a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita.

Sob o ponto de vista de sua constituição estrutural, o ferro fundido é normalmente considerado uma “liga ternária Fe-C-Si”, pois o silício está frequentemente presente em teores superiores ao do próprio carbono, com tendência a promover a decomposição do Fe_3C (cementita) em ferro, e carbono sob a forma de grafita lamelar.

Ainda de acordo com Chiaverini (2005), existem dois fatores preponderantes que determinam a estrutura do ferro fundido:

Composição química – Os elementos mais influentes na estrutura são o carbono e o silício, sendo que o primeiro determina a quantidade de grafita que se pode formar e o segundo é essencialmente um elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro. O manganês tem efeito oposto ao silício, estabilizando a cementita e contrabalanceando a ação grafitizante, sendo de grande utilidade para produzir estruturas com matriz predominantemente perlítica. Outros elementos não possuem ação tão significativa, apenas o fósforo que é um estabilizador relativamente forte do carboneto de ferro.

Velocidade de resfriamento – Esse fator relaciona a velocidade de resfriamento propriamente dita durante a solidificação no interior dos moldes e a espessura das peças moldadas. Isto significa que em peças de secções de diferentes espessuras, ocorrem diversas velocidades de resfriamento.

Para elevadas velocidades de resfriamento, há pouco tempo para a decomposição da cementita, sendo que pouca ou nenhuma grafitização ocorre dependendo dos teores de carbono e silício. Para velocidades lentas, ocorre grafitização e a estrutura será constituída essencialmente de perlita e grafita. Basicamente, os ferros fundidos apresentam uma estrutura composta de ferrita, perlita e cementita, com maior ou menor quantidade de grafita na forma de veios, dependendo da composição química e das condições de resfriamento (CHIAVERINI, 2005).

5.2.1 Tipos de ferro fundido

Conforme Chiaverini (2005), dentro da denominação geral de “ferro fundido”, podem ser distinguidos os seguintes tipos de liga:

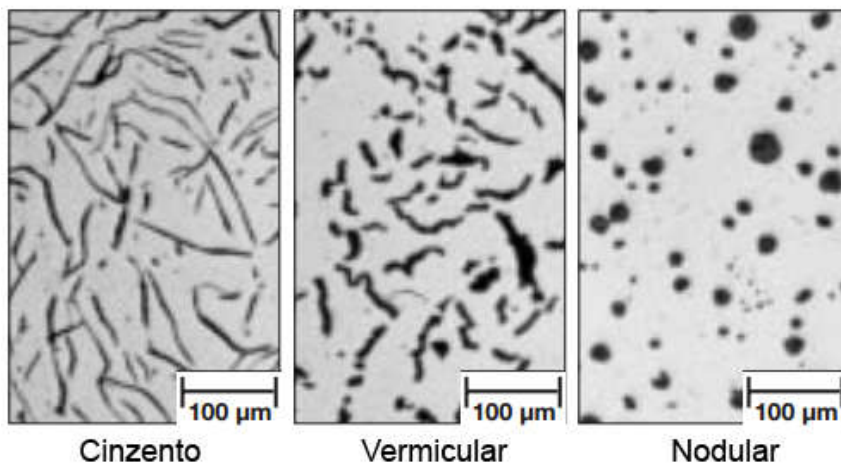
- Ferro fundido cinzento: apresenta como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício. Grande parte do carbono na estrutura está no estado livre (grafita lamelar), sendo que outra parcela no estado combinado (Fe_3C);
- Ferro fundido branco: também possui como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício, mas devido às condições de fabricação e menor teor de silício, apresenta o carbono quase inteiramente na forma combinada (Fe_3C);
- Ferro fundido mesclado: caracterizado por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento;

- Ferro fundido maleável: obtido a partir do ferro fundido branco, mediante tratamento térmico especial, resultando numa transformação de praticamente todo o ferro combinado em grafita na forma de nódulos;
- Ferro fundido nodular: caracterizado por apresentar carbono livre na forma de grafita esferoidal (nodular), o que confere ao material característica de boa ductilidade;
- Ferro fundido vermicular: apresenta grafita na forma de estrias ou “vermes”. Exige adição de elementos especiais e pode ser considerado o intermediário entre o cinzento e o nodular. Em inglês, é conhecido como CGI (Compacted Graphite Iron). Será mais bem estudado a seguir.

5.2.2 Ferro fundido vermicular

Os ferros fundidos são diferenciados principalmente pela forma da grafita. No ferro fundido cinzento, as grafitas apresentam-se sob forma lamelar, aparecendo numa seção plana de forma aleatória, enquanto no ferro fundido nodular as grafitas se encontram sob a forma de esferas individuais. No CGI, a grafita aparece sob a forma de vermes, disposta em uma matriz perlítica ou ainda ferrítico/perlítica. A perlita é constituída por lamelas alternadas de ferrita e cementita (Fe_3C). Estas lamelas de cementita reforçam a matriz, tornando-a mais dura e resistente (DAWSON e SCHROEDER, 2000; JUNIOR e GUESSER, 2011).

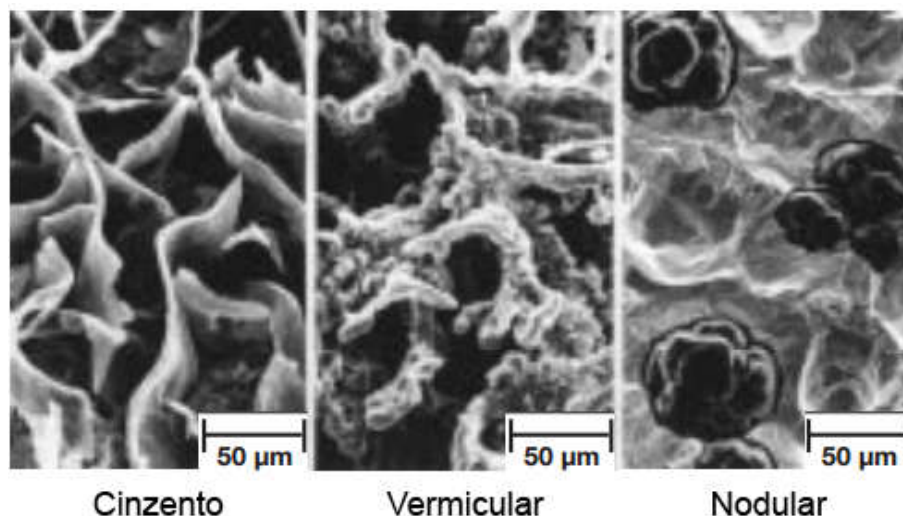
Figura 2 – Forma da grafita nos ferros fundidos.



Fonte: (DAWSON e SCHROEDER,2000).

Quando observado por microscopia eletrônica de varredura (Figura 3), é possível verificar que as grafitas vermiculares estão conectadas entre si, formando uma morfologia complexa, além de sua superfície apresentar imperfeições, resultando em forte adesão com a matriz de ferro (JUNIOR e GUESSER, 2011). As extremidades arredondadas da grafita do CGI suprimem a iniciação de trincas, enquanto a morfologia complexa e a forte adesão entre grafita e o ferro impedem a propagação das trincas. Juntos, estes fatores contribuem para o aumento da resistência do CGI em relação ao ferro fundido cinzento e a melhor condutividade térmica em relação ao ferro fundido nodular (DAWSON e SCHROEDER, 2000; SINTERCAST, 2015).

Figura 3 – Forma da grafita tridimensional.



Fonte: (DAWSON e SCHROEDER, 2000).

No Quadro 1 são apresentadas algumas propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular. Verifica-se que, de um modo geral, os valores das propriedades do vermicular se encontram entre os do cinzento e do nodular.

Quadro 1 – Comparação das propriedades dos principais tipos de ferro fundido.

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração [Mpa]	250	450	750
Módulo de Elasticidade [GPa]	105	145	160
Resistência à Fadiga [Mpa]	110	200	250
Condutividade térmica [W/m ² K]	48	37	28

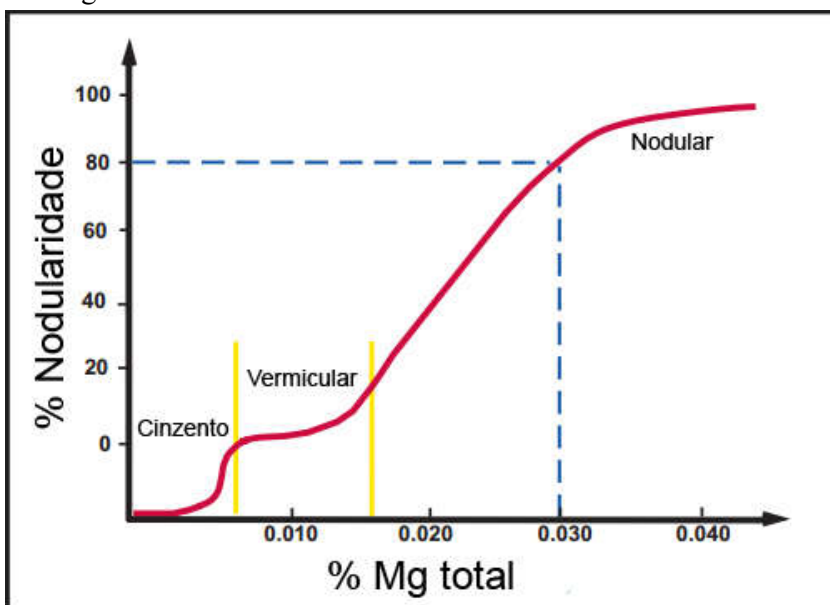
Fonte: (adaptado de DAWSON e SCHROEDER, 2000).

5.2.2.1 Fabricação do ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular é obtido por um processo intermediário entre o cinzento e o dúctil, de duas maneiras: a primeira é adicionando elementos nodulizantes suficientes para formar o ferro nodular e, ao mesmo tempo, elementos anti-nodulizantes como o titânio. Apesar de ser uma alternativa mais simples, a adição de titânio é considerada ruim, pois este tende a formar carbonetos e carbonitretos duros, indesejáveis na usinagem, como demonstrado por Rosa (2009); a outra maneira é adicionando à liga elementos nodulizantes como Mg, porém em uma concentração insuficiente para formar ferro fundido nodular, resultando em um material intermediário. Este método exige um processo mais criterioso de fabricação, usando equipamentos que garantam a composição química adequada (MOCELLIN, 2002).

O CGI é estável em uma faixa de aproximadamente 0,008% de Mg, o que é cerca de cinco vezes menor do que a faixa usada para o ferro fundido nodular. Na prática, essa faixa é ainda menor, pois o magnésio evapora a uma taxa de 0,001% a cada cinco minutos, dificultando ainda mais a produção e a possibilidade de trabalhar com uma porcentagem menor de nodularidade, já que o ferro fundido vermicular é separado do cinzento por uma transição abrupta de apenas 0,001% de Mg. Se o magnésio for insuficiente, ou evaporar demais, a grafita lamelar pode aparecer, causando uma redução imediata da resistência e rigidez de 20-30%. Se trabalhar com uma porcentagem baixa de Mg é arriscado, trabalhar com uma alta quantidade também, pois pode ocorrer nodulização excessiva, reduzindo a condutividade térmica e afetando negativamente a usinabilidade. Inevitavelmente o CGI apresentará a grafita em forma de esferas, mas a porcentagem de nodularidade não deve ultrapassar 20% (DAWSON, 1998; DAWSON e SCHROEDER, 2000).

Figura 4 – Faixa de estabilidade do ferro fundido vermicular.



Fonte: (adaptado de DAWSON e SCHROEDER, 2000).

5.2.2.2 Usinabilidade do ferro fundido vermicular

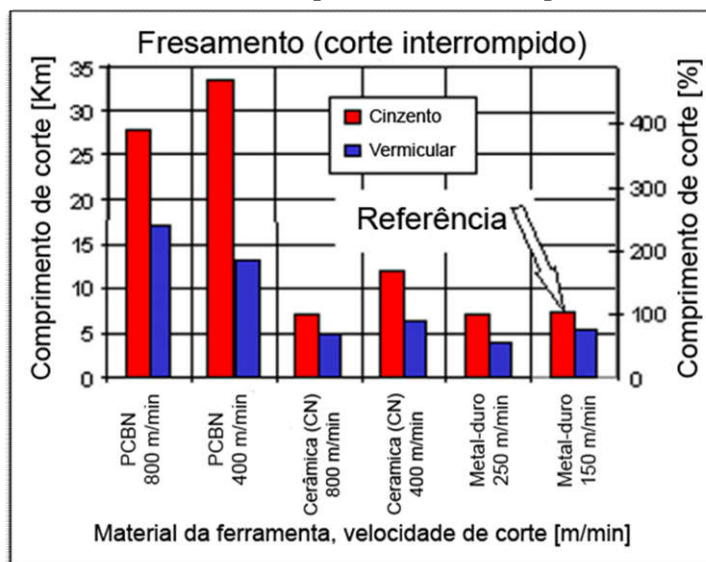
Diniz e outros (1999) definem a usinabilidade, de um modo geral, como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Em outras palavras, a usinabilidade é o grau de dificuldade de se usar determinado material e depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (sejam a frio ou a quente) e do eventual encruamento.

Como a usinabilidade não depende somente das condições e propriedades do material, mas também das condições de usinagem, características da ferramenta, condições de refrigeração, rigidez do sistema máquina-dispositivo de fixação peça-ferramenta e dos tipos de trabalho executados pela ferramenta (corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta), um mesmo material pode ter um valor de usinabilidade diferente para condições de usinagem diferentes (DINIZ et al., 1999).

Com uma resistência à tração pelo menos 75% maior e rigidez aproximadamente 45% maior do que o ferro fundido cinzento, intuitivamente pode-se afirmar que será mais difícil usinar o CGI. Foi notado também que a vida da ferramenta de PCBN é maior que a de metal duro para operações de corte interrompido, mas é reduzida em operações de corte contínuo,

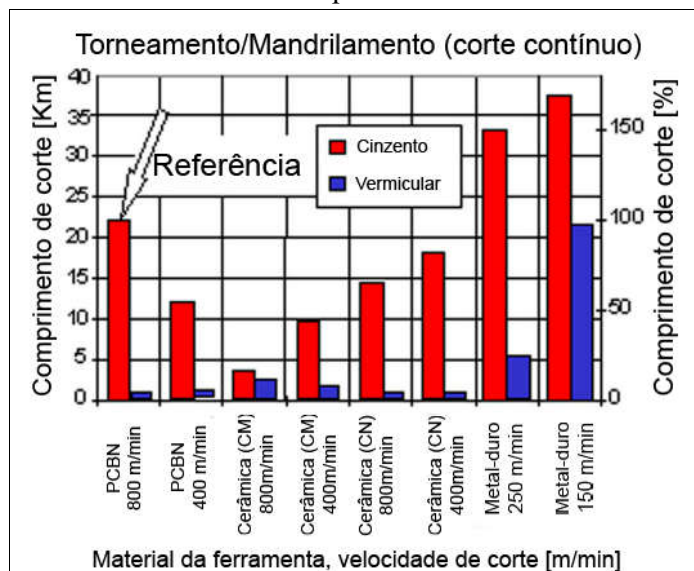
como torneamento e mandrilamento. Essa redução pode ser observada nas Figuras 5 e 6, onde é demonstrado o desgaste, para diversas ferramentas e velocidades, utilizando corte interrompido e contínuo. Devido à maior resistência e rigidez, o CGI também exige maior força de corte do que o ferro fundido cinzento, por outro lado, é mais fácil de ser usinado do que o ferro fundido nodular, sendo assim, a conversão de materiais fabricados com nodular para vermicular representa uma economia nos custos (DAWSON e SCHROEDER, 2004).

Figura 5 – Vida das ferramentas para corte interrompido do ferro fundido.



Fonte: (adaptado de DAWSON e SCHROEDER, 2004).

Figura 6 – Vida das ferramentas para corte contínuo do ferro fundido.



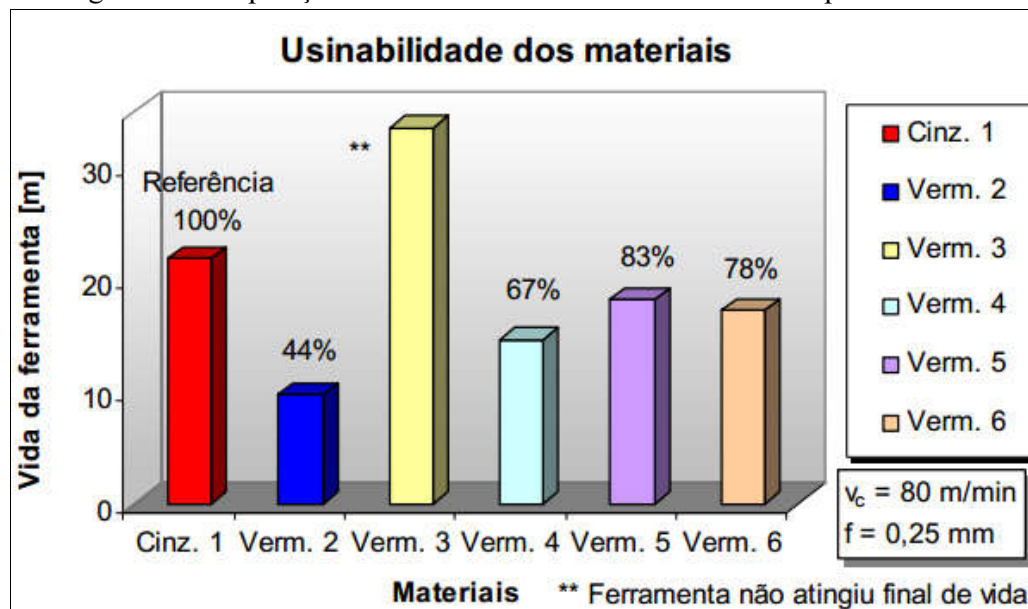
Fonte: (adaptado de DAWSON e SCHROEDER, 2004).

A diferença de corte contínuo ou intermitente tem uma influência significativa no desgaste das ferramentas por oxidação e difusão. No corte contínuo, a ferramenta permanece mais tempo em contato com o material da peça, facilitando o mecanismo de desgaste. Em corte intermitente, como o fresamento, a difusão e a oxidação são menos intensas (DAWSON 1999, apud DALO, 2011).

Ao analisar o tempo de vida das ferramentas quando se compara os ferros fundidos cinzento e vermicular, a diferença foi atribuída à maior resistência dos ferros fundidos vermiculares e também à ausência de sulfeto de manganês, que está presente no ferro fundido cinzento e age como lubrificante da ferramenta (JUNIOR e GUESSER, 2011).

Mocellin (2002) realizou testes para avaliar a usinabilidade do ferro fundido vermicular com ensaios de furação. Utilizando um ferro fundido com 97% de perlita como referência, realizou uma comparação com mais cinco ligas de ferro fundido vermicular, apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Comparação da usinabilidade dos materiais testados por Mocellin.



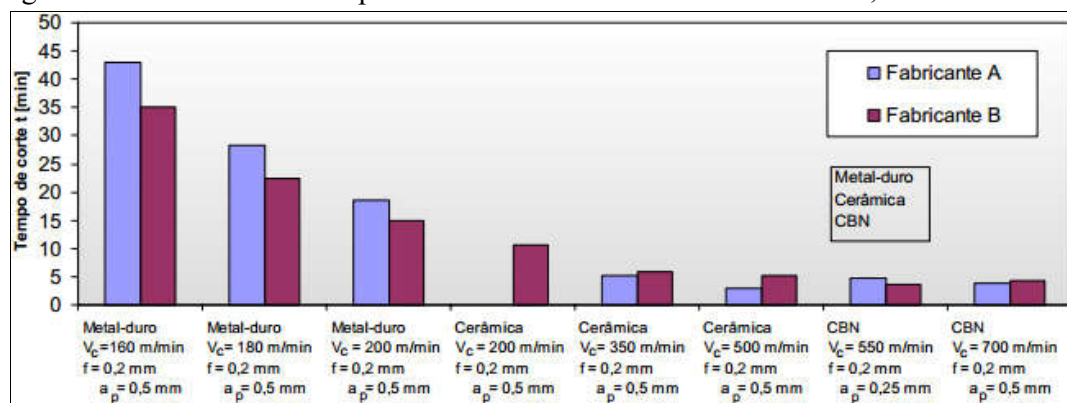
Fonte: (MOCELLIN, 2002).

O vermicular 100% perlítico (Vermicular 2) foi obtido com alto teor de manganês, mas apresentou usinabilidade muito inferior ao cinzento, para proporções semelhantes de perlita, sendo pouco promissor. Os demais, apesar de possuírem quantidades menores de perlita, possuem propriedades mecânicas superiores ao cinzento. Mesmo com a excelente usinabilidade do Vermicular 3, este material é aconselhável apenas para aplicações que

exigem baixos teores de perlita, pois possui baixos valores de dureza e resistência mecânica (ainda sim, maior que a do cinzento). O Vermicular 4 apresentou usinabilidade intermediária, com 84% de perlita e os Vermiculares 5 e 6, com 90% de perlita, propiciaram uma vida de ferramenta significativamente superior em relação ao Vermicular 4 (MOCELLIN, 2002).

Xavier (2003) desenvolveu um trabalho para verificar o melhor material de ferramenta para usinar o ferro fundido vermicular, utilizando metal-duro, cerâmica e CBN de dois fabricantes. Seus ensaios foram realizados através do torneamento, utilizando um ferro fundido vermicular com 92% de perlita. Através da Figura 8 é possível notar que o desempenho das ferramentas de metal-duro é superior ao das ferramentas de cerâmica e CBN para o corte contínuo (com os parâmetros e materiais utilizados), sendo que os melhores resultados foram obtidos utilizando velocidades de corte mais baixas, quando os efeitos do aumento da temperatura e da abrasão não são tão ativos. O autor também conclui que existe a necessidade de um estudo mais intenso com ferramentas de cerâmica e CBN para determinar as causas dos desgastes prematuros das ferramentas, principalmente devido à abrasão.

Figura 8 – Ensaios realizados por Xavier com ferramentas de metal duro, cerâmica e CBN.



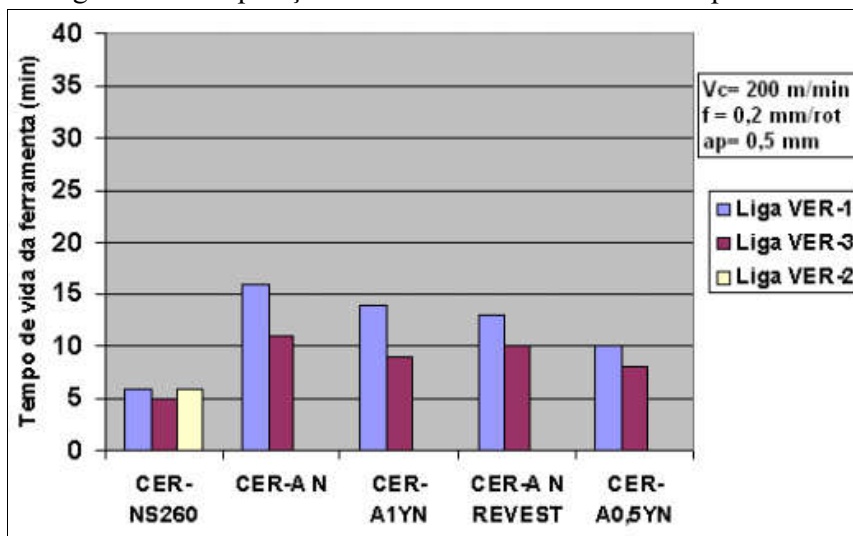
Fonte: (XAVIER, 2003).

Doré (2007) verificou a influência da variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular, através de ensaios de torneamento e três variações de ligas de CGI, denominadas VER-1 (98% perlita e 6% nodularidade), VER-2 (96% perlita e 26% nodularidade) e VER-3 (95% perlita e 36% nodularidade). Foi observado que nas ferramentas cerâmicas, tem-se um desgaste maior por difusão, enquanto que nos metais-duros tem-se um desgaste predominantemente abrasivo, e que para ferramentas de cerâmica não-comerciais utilizadas houve uma melhora no desempenho de até 38% (25% no caso da usinagem de VER-1) em relação às comerciais. Durante os ensaios, uma das ferramentas de cerâmica com

revestimento de TiAlN teve tempo de vida menor do que ferramentas sem revestimento, o que leva a crer que ou o revestimento não teve boa aderência ao substrato da ferramenta, ou que a relevância do mesmo é pequena.

Em termos de propriedades mecânicas, a liga VER-1 é superior à liga VER-3, pois apresenta valores maiores em termos de dureza, microdureza da perlita e resistência mecânica. Quanto à usinabilidade, os maiores valores de vida de ferramenta foram obtidos na usinagem da liga VER-1, na qual o desgaste das ferramentas foi consequência da característica mais abrasiva da liga, pela presença verificada de carbonetos e pela maior dureza. Já na usinagem da liga VER-3, ocorre uma intensificação no desgaste causado pelo aumento da nodularidade para 36%. Este fator tende a aumentar a adesão do cavaco, dificultando sua quebra pela ferramenta. A manutenção do contato entre ferramenta e cavaco provoca um aumento significativo na temperatura, ocasionando desgaste por abrasão e facilitando a ocorrência do desgaste por difusão. Na Figura 9 é mostrada uma comparação entre os tempos de usinagem obtidos pelas ferramentas cerâmicas, comercial (CER-NS260) e não-comerciais.

Figura 9 – Comparação entre as ferramentas utilizadas por Doré.



Fonte: (DORÉ, 2007).

Nas ligas VER-2 e VER-3, a nodularidade é maior, porém a dureza e resistência das ligas diminuem. A diminuição na dureza está associada ao aumento de ferrita nas ligas. A característica do desgaste nas ferramentas na usinagem dessas ligas muda, pois ocorre a eliminação dos carbonetos e a nodularidade é bem maior. Os resultados expressivos obtidos pelas ferramentas cerâmicas não-comerciais mostram a importância do estudo de novos

materiais para ferramentas principalmente voltados à usinagem do ferro fundido vermicular (DORÉ, 2007).

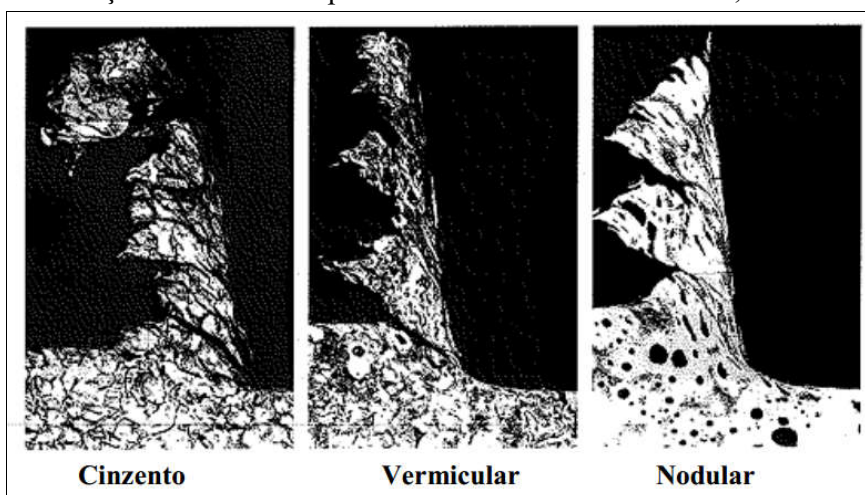
5.2.2.3 Efeitos da forma da grafita na usinabilidade

As propriedades dos ferros fundidos não podem ser explicadas exclusivamente em função de sua composição química. Em ferros fundidos, a forma, o tamanho e a quantidade da grafita são normalmente mais significativos do que a composição (REUTER et al., 2000, apud MOCELLIN, 2002).

A variação da forma da grafita de lamelar para vermicular faz com que se altere o modo de ruptura do cavaco, passando de frágil para dúctil. Durante a usinagem, o cavaco do vermicular tende a ficar mais em contato com a face da ferramenta do que o cavaco do cinzento. Este fato, aliado ao maior coeficiente de atrito do CGI e à sua menor condutividade térmica tendem a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte. No entanto, as medições revelam que as temperaturas da ferramenta durante o corte do CGI são apenas alguns graus acima do cinzento (REUTER et al., 2000, apud MOCELLIN, 2002).

Na usinagem do ferro fundido vermicular, a formação do cavaco apresenta a característica dúctil do nodular, sendo que o material é removido devido a trincas que se formam no plano da grafita que possui uma resistência menor aos esforços de corte. A diferença é que, como a grafita tem bordas arredondadas, requer uma força de corte maior, formando um cavaco parecido com o do ferro fundido nodular (REUTER et al. 1999, apud DORÉ, 2007).

Figura 10 – Formação do cavaco e ruptura em ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular.

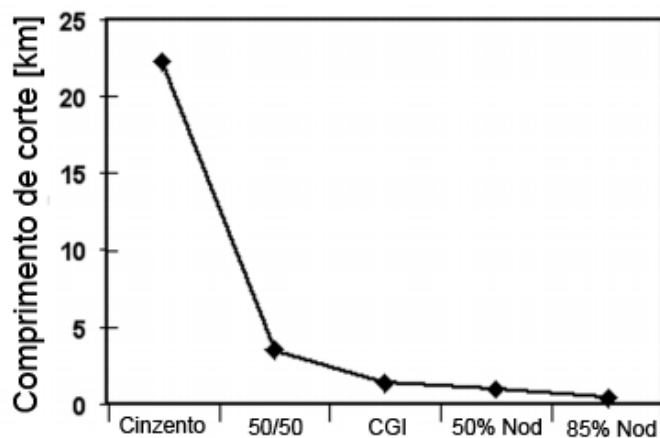


Fonte: (REUTER et al., 1999, apud DALO, 2011).

Lämpic e Henkel, citados por Doré (2007), atribuem parte do maior desgaste da ferramenta na usinagem do ferro fundido vermicular à integração da grafita na matriz metálica, de modo a promover maior resistência mecânica e maior tenacidade do material (REUTER et al., 2001, apud DORÉ, 2007).

Em um estudo realizado por Dawson e outros (2001), utilizando o processo de torneamento com ferramentas de corte de PCBN em velocidade de corte de 800m/min, foi verificada a influência que o aumento da quantidade de grafita vermicular tem sobre a vida da ferramenta de corte.

Figura 11 – Influência do aumento da quantidade de grafita vermicular sobre a vida da ferramenta de corte.



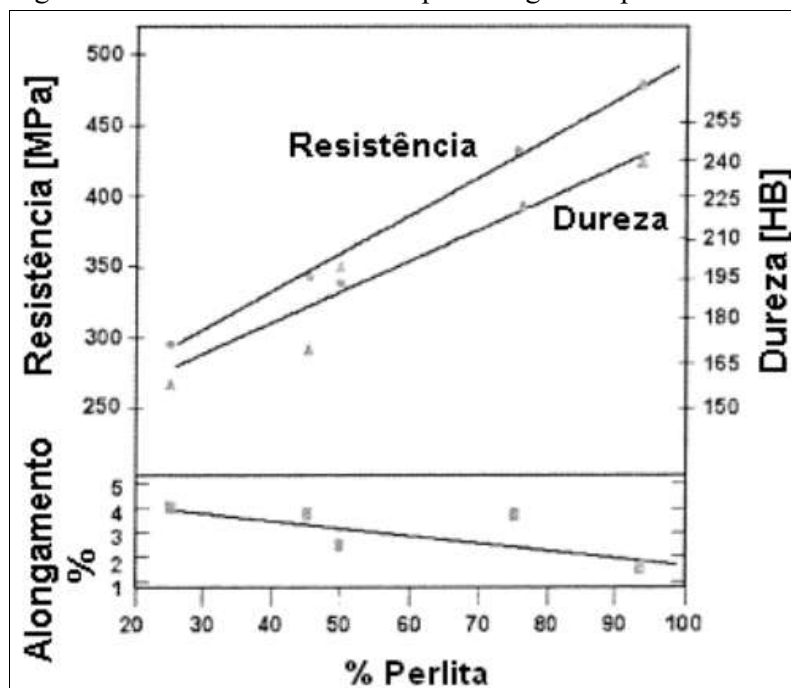
Fonte: (adaptado de DAWSON et al., 2001).

A diminuição da vida da ferramenta é contínua a partir de uma grafita 100% lamelar até uma liga obtida com 50% de grafita lamelar e 50% de grafita vermicular. Inicialmente, apesar de não parecer haver grande diferença entre o CGI e um ferro fundido com maior nodularidade, a vida da ferramenta para um ferro fundido vermicular com nodularidade de 5% é 40% maior do que uma liga com 50% de nodularidade e três vezes e meia maior do que uma liga com 85% de nodularidade (DAWSON et al., 2001)

5.2.2.4 Influência da perlita

Ferros fundidos são compostos por partículas de grafita em uma matriz de ferro. As propriedades do ferro fundido são determinadas tanto pela forma da grafita quanto pela forma da matriz, que pode ser ferrítica ou perlítica. Para um CGI típico, com menos de 10% de nodularidade, o efeito do aumento da porcentagem de perlita presente na liga tem efeito na resistência à tração, dureza e alongamento, como observado na Figura 12 (DAWSON et al., 2001).

Figura 12 – Efeito do aumento da porcentagem de perlita no CGI.

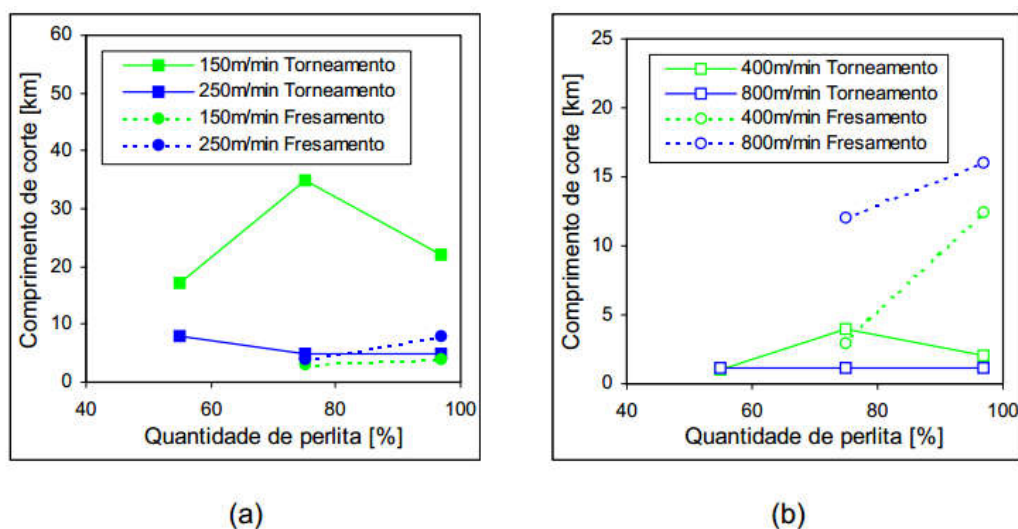


Fonte: (adaptado de DAWSON et al., 2001).

Durante a solidificação do ferro fundido, aproximadamente entre 1175°C e 1120°C a matriz inicialmente é formada como austenita. Ao passo que resfria, abaixo de aproximadamente 725°C, a austenita se transforma em ferrita ou perlita. Se a taxa de resfriamento for lenta o bastante, e as condições químicas forem favoráveis, os átomos de carbono presentes na austenita irão difundir para as partículas de grafita, resultando em uma matriz ferrítica. Entretanto, se os átomos de carbono não conseguirem escapar da matriz, perlita será formada. A perlita é simplesmente uma forma de ferrita saturada de carbono, onde o mesmo em excesso se encontra na forma de placas de cementita entre a ferrita. Essas placas de cementita reforçam a matriz, deixando-a mais dura e forte, conseqüentemente mais difícil de ser usinada (DAWSON et al., 2001).

De acordo com os resultados obtidos por Dawson e outros (2001), em uma matriz com perlita entre 50 a 95% estabilizada com cobre e estanho, operações de fresamento são melhoradas com o aumento de perlita. Em operações de torneamento com altas velocidades, a vida da ferramenta não é afetada, mas é reduzida em baixas velocidades. Foi presumido que os elementos perlitizantes propiciam boa deformação e fácil clivagem e formação do cavaco em cortes interrompidos, enquanto ligas com alto conteúdo de perlita são duras e abrasivas demais para cortes contínuos.

Figura 13 – Influência da perlita para operações utilizando (a) metal duro e (b) CBN.



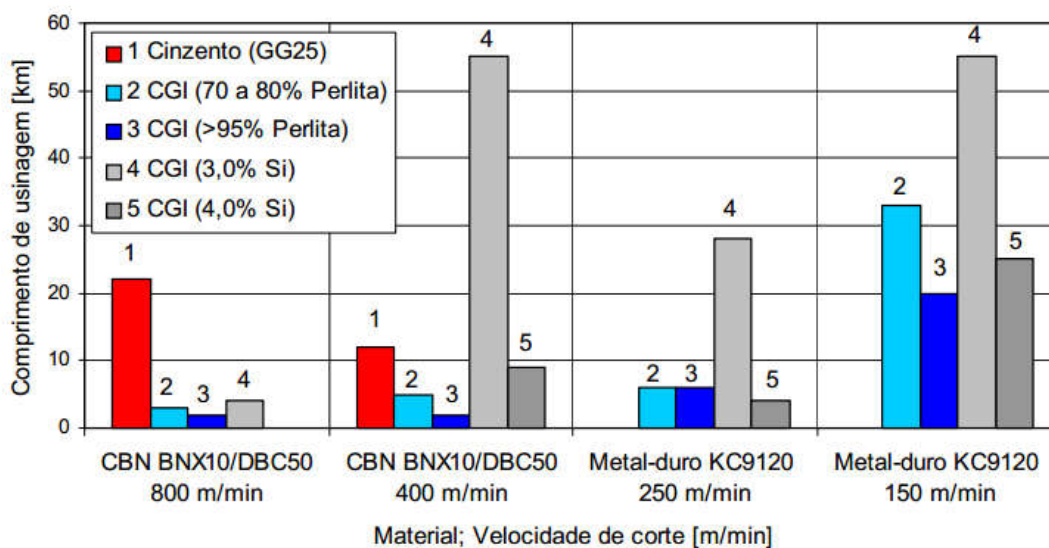
Fonte: (adaptado de DAWSON et al., 2001).

5.2.2.5 Efeito do silício

Enquanto o cobre (Cu), estanho (Sn), manganês (Mg) e antimônio (Sb) são estabilizadores de perlita, o silício promove a formação de ferrita. O CGI contém tipicamente de 2 a 2,4% de silício, juntamente com a adição intencional de estabilizadores de perlita para atingir o nível desejado da mesma. Caso os elementos estabilizadores de perlita sejam reduzidos e o teor de silício aumentado para 3,0%, o CGI formado terá uma matriz predominantemente ferrítica. Embora a matriz seja ferrítica, o aumento da concentração de silício tende a endurecer a ferrita por solução sólida, resultando em um CGI de matriz totalmente ferrítica com o mesmo nível de dureza e resistência do ferro fundido cinzento perlítico ou até mesmo do CGI perlítico (DAWSON et al., 2001).

Na Figura 14 é mostrado que uma liga de CGI com 3,0% de silício aumenta significativamente a vida de uma ferramenta de PCBN durante o torneamento a 400 m/min e durante o torneamento com ferramentas de metal duro a 150 e 250 m/min. Embora esta liga possa ter várias aplicações, ela possui dureza baixa (170 HB) e provavelmente não iria satisfazer uma condição para mandrilamento de cilindros, até mesmo porque os 3,0% de silício não resultaram em nenhuma melhora para torneamento com PCBN a 800 m/min, que é a operação mais crítica para mandrilamento de cilindros (DAWSON et al., 2001).

Figura 14 – Efeito de teor do silício do CGI na vida da ferramenta de torneamento.



Fonte: (DAWSON et al., 2001; MOCELLIN, 2002).

5.2.2.6 Efeito do enxofre

O enxofre, juntamente com o manganês, forma o sulfeto de manganês (MnS), que por sua vez tende a melhorar a usinabilidade de ferros fundidos cinzentos e dos chamados aços de corte fácil, agindo como lubrificante e aderindo sobre a face da ferramenta, formando uma camada protetora contra oxidação e difusão (REUTER et al., 2000, apud MOCELLIN 2002).

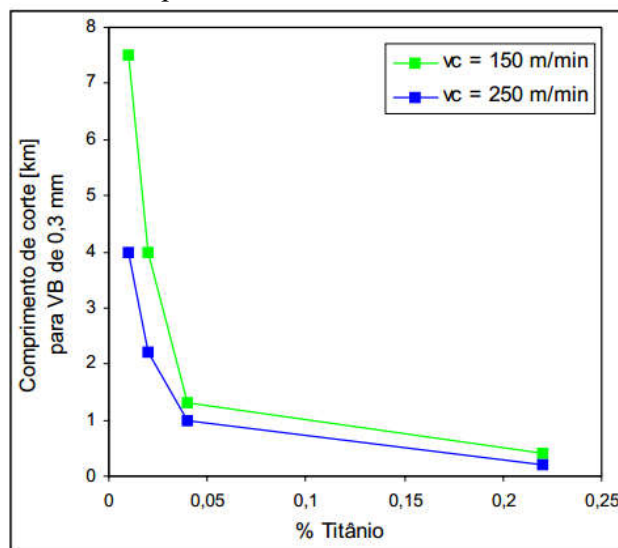
Nos ferros fundidos vermiculares, não se observa a formação desta camada protetora, pois normalmente o teor de enxofre presente nos ferros fundidos cinzentos é da ordem de 0,1%, enquanto que no vermicular é de 0,01%, além do fato do enxofre se combinar preferencialmente com o magnésio presente no CGI, formando sulfeto de magnésio e deixando de formar a camada protetora (REUTER et al., 2000, apud MOCELLIN 2002).

5.2.2.7 Efeito do titânio

O titânio pode ser adicionado tanto intencionalmente como já estar presente na matéria-prima. Em processos de fabricação do CGI, o titânio era utilizado como forma de controlar a forma da grafita ou para aumentar a resistência ao desgaste, dependendo da aplicação do material. Este elemento reage com carbono e/ou nitrogênio, presente no ferro fundido formando inclusões de carbonitreto de titânio (DAWSON et al., 2001).

De acordo com os resultados obtidos por Dawson e outros (2001), na Figura 15 é mostrada a relação entre o teor de titânio e o desgaste de uma ferramenta de metal duro em um processo de torneamento, para velocidades de 150 e 250 m/min. Rosa (2009) demonstrou que o aumento do teor de titânio nas ligas é um dos principais responsáveis pela diminuição da vida da ferramenta.

Figura 15 – Relação entre o teor de titânio e o desgaste de uma ferramenta de metal duro no processo de torneamento.



Fonte: (adaptado de DAWSON et al., 2001).

5.2.2.8 Efeito do cromo

Assim como o titânio, o cromo pode estar presente na sucata usada como matéria-prima ou intencionalmente adicionado para obtenção de maior resistência em altas temperaturas. O cromo também estabiliza a perlita, da mesma forma que o manganês, aumentando a solubilidade do carbono na austenita, mas o aumento do seu teor provoca a formação de perlita fina, aumentando assim a o teor de cementita. Para questões de usinabilidade, é recomendado que o teor de cromo presente na liga esteja abaixo de 0,08% (DAWSON et al., 2001).

5.2.2.9 Efeito das inclusões

Todos os metais fundidos contêm inclusões não-metálicas, sendo óxidos, nitretos, sulfetos ou complexos intermetálicos. Dependendo da composição, essas inclusões podem ser duras e abrasivas (TiC) ou macias e flexíveis (MnS) (DAWSON et al., 2001).

Dawson e outros (2001) realizaram um estudo na tentativa de gerar inclusões flexíveis e de pouca dureza no CGI, modificando a sequência inicial de adição do magnésio pela adição de cálcio e alumínio, com a intenção de consumir o oxigênio disponível gerando inclusões de aluminato de cálcio, conhecidas por terem baixa dureza, e posteriormente adicionando uma

quantidade reduzida de magnésio. Embora o procedimento tenha funcionado isto não resultou em nenhuma melhora significativa no tempo de vida das ferramentas.

Em outro teste, Dawson e outros (2001) procuraram gerar uma camada de filme protetor a partir de inclusões contidas no material. No ferro fundido cinzento, um filme protetor é gerado sobre a ferramenta durante o corte em altas velocidades. Isso ocorre porque a natureza do ferro fundido cinzento faz com que a clivagem ocorra acima do gume da ferramenta, fazendo com que por um breve momento não exista contato abrasivo sobre ela. Durante esse momento livre de contato, qualquer inclusão que entre em contato com a ferramenta tem a chance de se aderir a ela antes do próximo contato abrasivo com a peça. Dessa forma um processo de acumulação pode ser desenvolvido. No caso do CGI, por ser mais dúctil que o ferro fundido cinzento, existe um contato abrasivo constante maior entre a ferramenta e a peça, o que não permite a mesma aderência das inclusões.

5.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE

O processo de usinagem baseia-se na remoção de material, utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. O surgimento de novos materiais e ligas estruturais com elevada dureza e melhores propriedades mecânicas contribuiu para o aparecimento de materiais mais resistentes para operações de usinagem, embora para operações de corte interrompido sejam requeridos materiais com tenacidade suficiente para suportar choques e impactos típicos do processo (MACHADO et al., 2011).

Para a seleção do material da ferramenta, alguns fatores devem ser considerados de acordo com Diniz e outros (2013) como:

- Material a ser usinado – pois a composição química, dureza e o tipo de cavaco formado devem ser levados em conta;
- Processo de usinagem – existem ferramentas mais indicadas para processos diferentes, para que seja aproveitada ao máximo a vida da mesma;
- Condição da máquina operatriz – o material da ferramenta deve ser compatível com a velocidade, estabilidade e potência fornecida pelo equipamento;
- Forma e dimensões da ferramenta – influencia, por exemplo, na saída do cavaco, que pode prejudicar o tempo de vida da ferramenta se escolhidos de forma incorreta;

- Custo do material da ferramenta – apesar de um material conseguir maior vida da ferramenta ou produção, não necessariamente apresenta uma relação custo/benefício razoável;
- Condições de usinagem – materiais diferentes para desbaste e acabamento;
- Condições de operação – corte contínuo e corte interrompido requerem ferramentas com diferentes materiais.

Ainda existem outros requisitos de maior ou menor importância que devem ser considerados, independente do material escolhido, como: dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade química.

De acordo com Machado e outros (2011), as principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte são: alta dureza, tenacidade suficiente para evitar falha por fratura, alta resistência ao desgaste abrasivo, alta resistência à compressão, alta resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas, alta resistência ao choque térmico, alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente. Os materiais para ferramentas de corte existentes hoje estão listados abaixo:

- Aço carbono;
- Aço rápido;
- Metal duro;
- Cermets;
- Cerâmicas;
- Nitreto Cúbico de Boro;
- Diamante natural.

5.3.1 Aplicações com ferramentas de cerâmica

As ferramentas de cerâmica têm adquirido importância crescente nos últimos anos, especialmente na usinagem em máquinas de alta velocidade, podendo atingir velocidades de corte 4 a 5 vezes maiores do que as empregadas com metal duro, reduzindo consideravelmente o tempo efetivo de corte. Com o aumento da velocidade, aumenta também a chance de ocorrer difusão, mas isto é compensado com a excelente estabilidade química dos materiais cerâmicos. Sua composição é de materiais metálicos e não metálicos, geralmente, na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos. Outras características destes materiais são: dureza à

quente e à frio, resistência ao desgaste, baixa condutividade térmica e baixa tenacidade (DINIZ et al., 2013; STEMMER,1993; MACHADO et al., 2011).

As cerâmicas à base de óxido de alumínio (Al_2O_3) dividem-se em cerâmicas puras (brancas, quando prensadas a frio ou cinzas quando prensadas a quente), cerâmicas mistas e alumina reforçada com “whiskers” (inclusões de monocristais de SiC). Basicamente são obtidas por metalurgia do pó, sendo as puras constituídas de finos grãos de Al_2O_3 sinterizados com determinado teor de MgO, que inibe o crescimento de grão. As mistas apresentam carboneto de titânio (TiC) ou nitreto de titânio (TiN) adicionados ao Al_2O_3 , aumentando a resistência mecânica. Hoje é frequente a adição de ZrO_2 na cerâmica pura para obter maior tenacidade (DINIZ et al., 2013; MACHADO et al., 2011).

De acordo com Stemmer (1993), as pastilhas de cerâmica de corte têm as propriedades apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Propriedades das ferramentas de corte de cerâmica pura.

Cor (cerâmica pura)	Branca
Peso específico, dependendo da composição química e da porosidade [g/cm^3]	3,7 a 4,1
Dureza [HR_A]	90 a 95
Resistência à compressão [N/mm^2]	3500
Resistência à flexão [N/mm^2]	150 a 400
Temperatura de amolecimento [$^{\circ}C$]	1800
Dilatação térmica [$mm/mm^{\circ}C$]	8,00E-07
Condutibilidade térmica [$kcal/m.h^{\circ}C$]	5,8
Calor específico [$kcal/kg^{\circ}C$]	0,247

Fonte: (adaptado de STEMMER, 1993).

A adição de SiC aumenta a tenacidade do material. Durante a propagação de uma trinca, os SiC permanecem íntegros, mas se separam da matriz de Al_2O_3 em um processo que absorve grande quantidade de energia de quebra, inibindo a propagação da trinca. Essas ferramentas também apresentam maior resistência ao choque térmico, por causa da maior condutividade térmica do SiC em relação à alumina (MACHADO et al., 2011).

As cerâmicas à base de Si_3N_4 se tratam de cristais de Si_3N_4 com uma fase intergranular de SiO_2 (cristais de vidro), que são sinterizados na presença de Al_2O_3 , Y_2O_3 , MgO e outros.

Existe um produto deste grupo que é comercializado com a marca registrada SIALON (devido aos seus componentes: Si, Al, O e N), que apresenta boa tenacidade, superior até a tenacidade das cerâmicas à base de Al_2O_3 , mas estabilidade química ruim, sendo utilizados principalmente na usinagem do ferro fundido, onde o cavaco formado não tende a causar difusão na superfície de saída da ferramenta. Para compensar a deficiência de menor dureza, essas cerâmicas podem ser revestidas tanto com Al_2O_3 quanto com TiC, garantindo maior resistência ao desgaste (DINIZ et al., 2013; MACHADO et al., 2011).

Segundo Machado e outros (2011), existem alguns cuidados que devem ser tomados ao utilizar ferramentas cerâmicas:

- Não usar aresta cortante afiada sem chanfro ou arredondamento e evitar corte interrompido antes de iniciar a operação;
- Evitar o uso de fluido, mas se requerido, utilizar em abundância na aresta de corte;
- Usar aresta com raio de ponta;
- Preferir os maiores valores de velocidade de corte e avanço possíveis;
- Usar um sistema de fixação do inserto rígido e bom assentamento da pastilha no suporte;
- Usar em máquinas-ferramentas rígidas, livres de vibrações.

5.4 MÁQUINAS OPERATRIZES PARA USINAGEM COM FERRAMENTAS CERÂMICAS

Para utilização de ferramentas cerâmicas são recomendadas máquinas operatrizes que oferecem condições de rigidez e potência que permitam trabalhar em altas velocidades sem comprometer o processo. As máquinas operatrizes indicadas para utilização de ferramentas cerâmicas são as que possuem comando numérico, pois processos de usinagem com torno universal mecânico possuem operação manual e podem ocasionar impacto da ferramenta contra a peça a ser usinada, causando a falha catastrófica da referida ferramenta.

Para atender as especificações de mercado (precisão e acabamento) os fabricantes produzem máquinas cada vez mais rápidas e eficientes com disponibilidade de programas de desenho auxiliado pelo computador/manufatura auxiliada por computador (CAD/CAM), para acompanhar a evolução dos novos materiais e ferramentas de corte. O comando numérico é um dispositivo eletrônico capaz de receber informações por meio de entrada própria, compilar

(processar) essas informações e transmiti-las em forma de comando à máquina operativa, de modo que esta, sem intervenção do operador, realize as operações na sequencia programada.

Estas máquinas possuem alto grau de precisão e repetitividade, sendo de construção rígida e sólida, o que permite o uso de insertos cerâmicos, obtendo dos mesmos o máximo de rendimento (SOUZA, 2005). Com essa evolução, surgiu recentemente a Usinagem a Altas Velocidades (HSC), que utiliza velocidades de corte bem acima das anteriormente utilizadas (WITTING, 2002).

5.5 VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE

A vida da ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim da vida de uma ferramenta de corte será definido pelo grau de desgaste estabelecido (MACHADO et al., 2011). Os fatores que determinam a fixação de um determinado valor limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta são vários. A ferramenta deve ser substituída quando: Os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte. Isto é crítico em operações de desgaste onde, por não ser necessária a obtenção de tolerâncias apertadas e bons acabamentos superficiais, permite-se que o desgaste chegue a valores altos. Quando o desgaste da superfície de folga da ferramenta atingir determinado nível onde não seja mais possível obter tolerâncias apertadas e/ou bons acabamentos superficiais. Isto é crítico em operações de acabamento. Quando o desgaste cresce muito, fazendo com que a temperatura da aresta de corte ultrapasse a temperatura que ferramenta possa resistir. Quando o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfira no funcionamento do equipamento. Através do controle desses fatores numa operação de usinagem, pode-se saber quando a ferramenta deve ser substituída ou reafiada. Nas ferramentas cerâmicas verifica-se geralmente a quebra de pequenos fragmentos da aresta de corte (lascamento) antes que os desgastes de flanco e cratera atinjam valores acentuados (DINIZ et al., 2013).

A condição de usinagem tem grande influência na vida da ferramenta. A progressão do desgaste da ferramenta é influenciada principalmente pela velocidade de corte, seguida pelo avanço da ferramenta e por último pela profundidade de corte (DINIZ et al., 2013; FERRARESI, 1977; MACHADO et al., 2011). A velocidade de corte é o parâmetro que mais influência no desgaste da ferramenta, devido ao aumento de energia (calor) que é imputada ao

processo sem o aumento da área da ferramenta que recebe esse calor (ponta da ferramenta). O aumento do avanço também aumenta a quantidade de calor imputada ao processo, porém, também aumenta a área da ferramenta que recebe esse calor. A influência da profundidade de corte é menor, já que o aumento da profundidade não mexe com a energia destinada ao corte por unidade de área, nem com a velocidade de retirada do cavaco, mas somente faz com que um volume maior seja retirado (DINIZ et al., 2013; FERRARESI, 1977). Outros fatores também influenciam 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 (MACHADO et al., 2011).

A norma ISO 3685/77 sugere a troca da ferramenta de metal duro, cerâmica ou aço rápido quando um dos tipos de desgaste atingir os seguintes valores (NAVES, 2009; DORÉ, 2007):

- Desgaste de flanco médio $V_B = 0,3$ mm;
- Desgaste de flanco máximo $V_B \text{ máx} = 0,6$ mm, caso o desgaste não ocorra de forma regular ao longo do flanco;
- Profundidade da cratera $KT = 0,06 + 0,3f$, onde f é o avanço de corte em mm/rev.;
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KM = 0,02$ mm;
- Se o desgaste de entalhe V_B não predominar, a norma recomenda a troca de ferramentas quando $V_B \text{ n} = 1,00$ mm;
- Falha catastrófica.

5.6 MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

Em condições normais de corte, várias formas de desgaste ocorrem simultaneamente, embora uma delas deva prevalecer. Todas as formas acontecem devido aos vários mecanismos de desgaste, sendo que os principais são (DINIZ et al., 2013; MACHADO et al., 2011):

Abrasão: é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Ocorre quando o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, considerada de “três corpos”, em que partículas duras estão livres para escorregar entre as superfícies; ou que pertencem a uma das superfícies, considerada de “dois corpos”. Tanto o desgaste frontal quanto o desgaste de cratera podem ser

gerados pela abrasão, mas é mais proeminente no desgaste frontal. O desgaste gerado pela abrasão também pode ocorrer por influência da temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta, sendo assim, uma ferramenta com maior dureza a quente apresenta maior resistência ao desgaste abrasivo (HUTCHINGS, 1992, apud MACHADO et al., 2011; DINIZ et al., 2013);

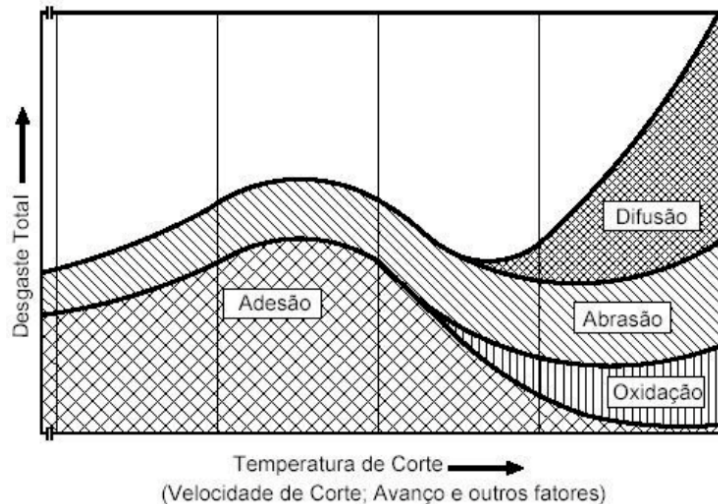
Aderência ou adesão: geralmente ocorre em baixas velocidades de corte. Se o fluxo de material que corre na superfície de saída ou na de folga for irregular, a adesão pode ocorrer mesmo em altas velocidades, porém a predominância de outros mecanismos de desgaste em tais situações pode tornar este mecanismo quase irrelevante. Se duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência, cuja resistência é elevada o suficiente para que ocorra ruptura em um dos metais ao tentar separá-los, em vez de ocorrer na superfície de contato. Assim as partículas da superfície de um metal migram para a superfície do outro. Este fenômeno pode estar presente na formação de aresta postiça de corte e no desgaste de entalhe, ou em situações em que ocorra o fluxo irregular de cavaco, podendo ser reduzido com o uso adequado de fluidos de corte e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito (DINIZ et al., 2013; MACHADO et al., 2011);

Difusão: consiste na transferência de átomos de um metal a outro, sendo fortemente dependente da temperatura, do tempo e da afinidade química entre os materiais presentes. A alta velocidade relativa entre a ferramenta e a peça ou entre ferramenta e cavaco e o curto tempo de contato levam a crer que a difusão é desprezível, mas existe uma zona na interface com a ferramenta onde o fluxo de velocidades assume valor zero, o que garante tempo suficiente para haver difusão, além da alta temperatura, que também favorece este mecanismo. Como esta zona não é estável e se renova periodicamente, o fluxo difusivo é mantido. A difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, pois é na superfície de saída da ferramenta que se tem as condições necessárias para que esta ocorra (DINIZ et al., 2013; MACHADO et al., 2011);

Oxidação: ocorre quando o material apresenta afinidade com o oxigênio, formando um filme de óxido poroso sobre a ferramenta, que é facilmente removido pelo atrito, gerando desgaste, que é formado especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao

acesso do ar nesta região. Alguns óxidos, como o de alumínio, são mais resistentes, assim alguns materiais que não contém o mesmo desgastam-se mais facilmente (DINIZ et al., 2013).

Figura 16 – Formas de desgaste nas ferramentas de corte.



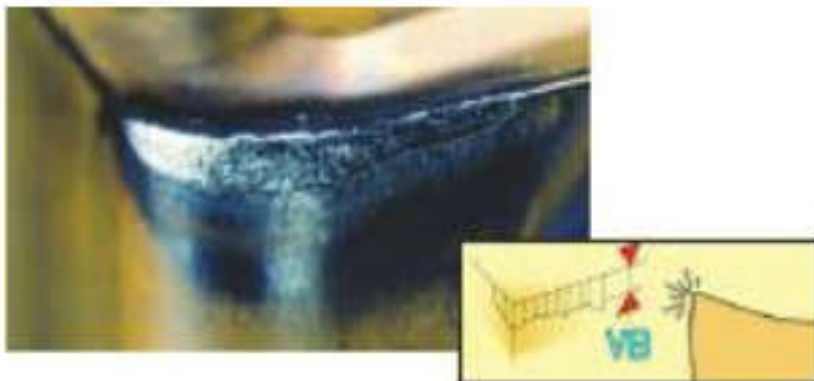
Fonte: (MACHADO et al.,2011).

5.6.1 Formas de desgaste

Mesmo que uma ferramenta de corte possua tenacidade suficiente para evitar uma avaria, estará sempre sujeita ao desgaste. É por isso que antes que qualquer forma de desgaste alcance grandes proporções e coloque o processo de usinagem em risco, a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída, como geralmente ocorre. Dentre os diversos tipos de desgaste que acontecem em uma ferramenta de usinagem, podemos destacar os seguintes (DINIZ et al., 2013; MACHADO et al., 2011):

Desgaste frontal ou de flanco: é o tipo de desgaste mais comum e ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato desta com a peça e se tornando mais crítico com o aumento da velocidade de corte. Ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça, alterando sua dimensão final, podendo sair de sua faixa de tolerância. Este tipo de desgaste oferece uma vida útil de ferramenta previsível e estável (DINIZ et al., 2013; SANDVIK, 2015a).

Figura 17 – Desgaste frontal ou de flanco em ferramenta de corte.



Fonte: (SANDVIK, 2015a).

Desgaste de cratera: ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito desta com o cavaco. Quando o desgaste se encontra com o desgaste de flanco, ocorre o colapso da ferramenta. Algumas ferramentas possuem revestimentos eficientes contra a craterização, fazendo com que esta não ocorra durante o processo (DINIZ et al., 2013)

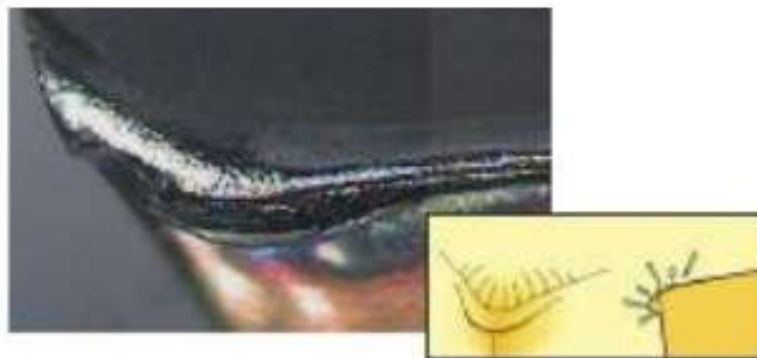
Figura 18 – Desgaste de cratera em ferramenta de corte.



Fonte: (SANDVIK, 2015a).

Deformação plástica da aresta de corte: é um tipo de avaria, ocorrendo em função da pressão aplicada à ponta da ferramenta somada à alta temperatura, alterando a saída de cavaco e o acabamento da peça, podendo ocasionar a quebra da aresta de corte (DINIZ et al., 2013).

Figura 19 – Deformação plástica da aresta de corte nas ferramentas.



Fonte: (SANDVIK, 2015a).

Lascamento: ao contrário dos desgastes onde pequenas partículas são removidas aos poucos, no lascamento grandes partículas são removidas de uma única vez. Representa uma falha acidental e prematura, podendo provocar a quebra da ferramenta. Assim como o desgaste de flanco, ocasiona deterioração do acabamento superficial (STEMMER, 1993; DINIZ et al., 2013).

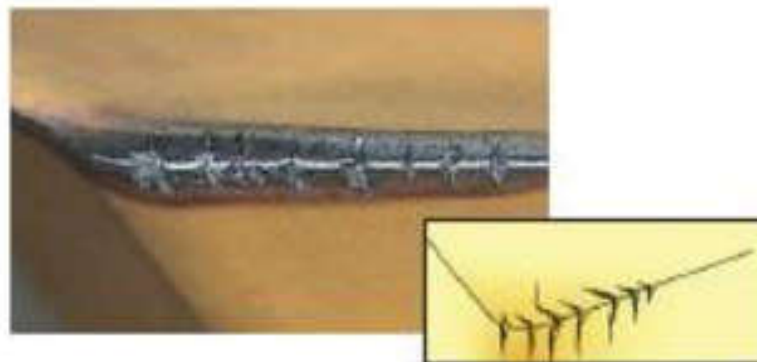
Figura 20 – Lascamento na ferramenta de corte.



Fonte: (SANDVIK, 2015a).

Trincas: são causadas pela variação de temperatura ou esforços mecânicos, gerados por corte interrompido, uso irregular do fluido de corte e variação da espessura de corte. O crescimento de trincas também ocasiona a quebra da ferramenta (DINIZ et al., 2013).

Figura 21 – Trincas na ferramenta de corte.



Fonte: (SANDVIK, 2015a).

5.7 RUGOSIDADE

Embora um “bom” acabamento implique em baixos valores de rugosidade, e vice-versa, o acabamento não está especificamente ligado à textura ou padrão característico da superfície técnica, nem a valores específicos de rugosidade, pois esta é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada. Uma rugosidade baixa é essencial em superfícies que servirão de mancais, ou que requerem pintura, em superfícies que servirão de escoamento de fluidos ou que devem refletir raios e luzes. Superfícies que trabalham sob lubrificação devem ter uma rugosidade característica, como as paredes dos cilindros de motores de combustão interna (RISBOOD et al., 2003, apud SOUZA 2004; MACHADO et al., 2011).

Em geral, a qualidade de uma superfície usinada é classificada apenas em termos do parâmetro rugosidade, cujos valores medidos são normalmente expressos pelo desvio médio aritmético de rugosidade (R_a) ou pela profundidade máxima de rugosidade ($R_{máx}$ ou R_t). O mais utilizado é o parâmetro “ R_a ”, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta. Como representa um valor médio, é um parâmetro estável, que não recebe influências de efeitos ocasionais (MESQUITA, 1992, apud SOUZA 2004; MACHADO et al., 2011).

Já o parâmetro R_q tem o efeito de ampliar os valores de picos e vales isolados ou esporádicos, podendo assim evidenciar defeitos ou marcas em superfícies bem acabadas, como lentes e espelhos. O parâmetro R_y está definido como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição, é geralmente usado em superfícies de vedação, tampões em geral e superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico.

Nos casos onde é necessário especificar a altura máxima da rugosidade, os parâmetros R_t ou R_z devem ser empregados, pois são diretamente influenciados por qualquer defeito ou irregularidade na superfície (MACHADO et al, 2011).

Quadro 3 – Definição de parâmetros de rugosidade.

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_y	Altura máxima do perfil parcial	Soma da altura máxima do pico e a maior das profundidades dos vales dentro de um comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.

Fonte: (adaptado de MACHADO et al, 2011).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve todos os procedimentos experimentais realizados durante a execução do trabalho para caracterizações e testes das ferramentas cerâmicas de alumina e nitreto de silício desenvolvidas em laboratório. Foram realizados estudos bibliográficos para as caracterizações das principais propriedades das ferramentas e para aplicação prática na usinagem através do torneamento a seco no ferro fundido vermicular.

6.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Foi selecionada a operação de torneamento para realizar os ensaios pelo fato de ser uma operação simples, de baixo custo e de corte contínuo, visto que na indústria uma das principais operações utilizadas com ferro fundido vermicular, e a que apresenta mais problemas para usinagem do mesmo, é o mandrilamento, cujas condições de usinagem são semelhantes. Dessa forma, os resultados obtidos serão satisfatórios para comparação. Atualmente as ferramentas utilizadas são as de metal-duro, justamente por causa de resultados anteriores desfavoráveis utilizando as ferramentas de cerâmica comerciais.

6.1.1 Máquina ferramenta

Para execução dos ensaios de torneamento foi utilizado um torno CNC marca Romi modelo Centur 30D, com RPM máxima de 4500 RPM e potência de 7,5KW pertencente ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG. Para a realização dos testes de torneamento os corpos de prova foram fixados pelo rebaixo na placa universal de três castanhas e o furo de centro apoiado na contra ponta do cabeçote móvel do equipamento para uma melhor fixação e diminuição de vibrações. Todos os corpos de provas para os testes foram preparados com remoção da camada de carepa proveniente do seu processo de fundição, que apresenta grandes variações de dureza.

6.1.2 Suporte da ferramenta

O porta ferramenta utilizado foi escolhido em função do tamanho e geometria do inserto, além da correta fixação do suporte na torre elétrica para que o inserto estivesse na

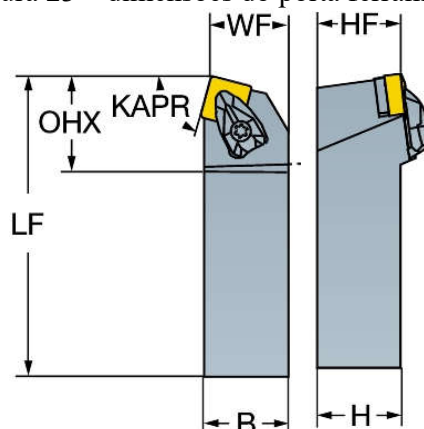
altura correta para a realização do experimento. O modelo selecionado foi o DSBNR 2020K 12, da marca Sandvik, Figura 22, apropriado para insertos cerâmicos, com ângulo de posição $K_r 75^\circ$, ângulo de saída -6° , e ângulo de inclinação -6° . As dimensões do porta ferramenta podem ser vistas na Figura 23, com seus valores representados na Tabela 1.

Figura 22 – Porta ferramentas Sandvik modelo DSBNR 2020K 12.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – dimensões do porta ferramenta.



Fonte: (SANDVIK, 2015b).

Tabela 1 – Medidas do suporte.

WF (mm)	KAPR ($^\circ$)	OHX (mm)	LF (mm)	B (mm)	HF (mm)	H (mm)
17	75	34,2	125	20	20	20

6.1.3 Equipamentos para caracterização

Para análise do desempenho da ferramenta foram analisados o desgaste, rugosidades, temperatura e forças de corte, utilizando lupa com resolução 8x, microscópico estereoscópico, rugosímetro, pirômetro e dinamômetro da marca KISTLER acoplado ao um sistema de

computador para determinação das forças de corte (F_c), avanço (F_f) e passiva (F_p) respectivamente.

As análises dos desgastes da ferramenta na condição de semi-desbaste foram realizadas a cada passe. Nessa circunstância, o teste era interrompido e a imagem do desgaste de flanco da ferramenta era realizada utilizando um aparelho estereomicroscópio trinocular (mod. SZ-6145 TR) da marca Olympus, com aumento da imagem em 45 vezes e um software de captura de imagens (AnalySis).

A temperatura média foi medida através de um pirômetro de radiação infravermelho (Cyclops-52 Minolta-Land) sem contato, com o laser apontado para o raio da ferramenta de corte e fixo no carro a 20 centímetros de distância da aresta de corte.

6.2 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram fornecidos pela empresa Tupy Fundições S.A., em ferro fundido vermicular classe 450. Para aproveitar melhor o espaço torneável do equipamento, os corpos de prova passaram por um processo de pré-usinagem, assim o tamanho seria adequado para o ensaio e os efeitos de solidificação da liga ou possíveis falhas de fundição não afetariam a vida da ferramenta. Na Figura 24 é mostrado o corpo de prova antes de ser pré-usinado.

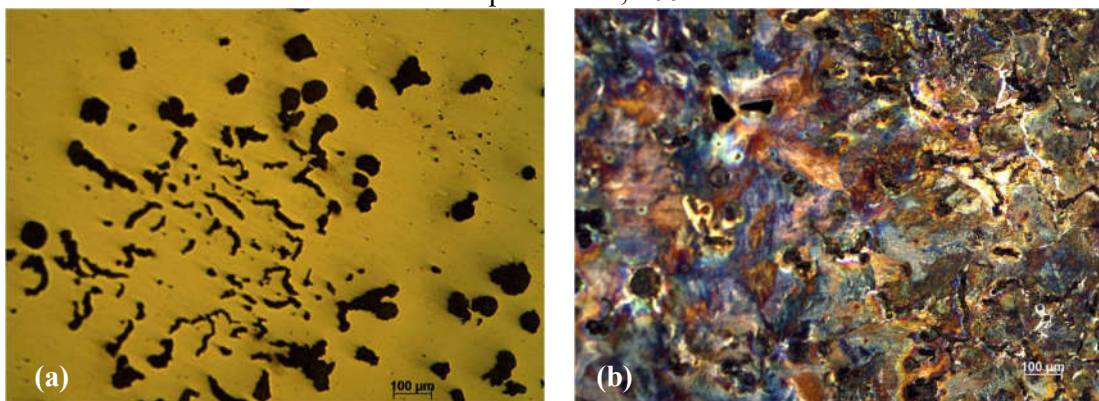
Figura 24 – Corpo de prova antes do processo de pré-usinagem.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 25 é mostrada a micrografia da amostra submetida a ataque de nital 3%, onde claramente podemos observar a forma da grafita vermicular e também nodular, em menor porcentagem.

Figura 25 – Micrografia do ferro fundido vermicular (a) sem ataque de nital, 100x, (b) com ataque de nital, 100x.



Fonte: Autoria própria.

A geometria cilíndrica foi utilizada para melhor fixação no equipamento, redução de possíveis vibrações durante os testes, manter da melhor forma possível o corte contínuo e melhor aproveitamento do material a ser usinado.

As medidas finais dos corpos de prova utilizados foram: diâmetro 92 mm e comprimento 384 mm. O tamanho foi escolhido levando em conta os limites do equipamento utilizado, além do fato de um corpo de prova com maior comprimento possibilitar um maior tempo de trabalho durante os ensaios, evitando trocas e interrupções excessivas.

6.3 FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS DESENVOLVIDAS

As ferramentas cerâmicas a base de alumina e nitreto de silício foram produzidas usando pós de alumina α (α -Al₂O₃ da Altamis) e pós de nitreto de silício da H.C. Starck, ambos com adição de aditivos. As composições foram moídas e homogeneizadas individualmente em meio líquido por 24h, utilizando moinho de bolas rotativo com potes e esferas de alumina. Após a homogeneização foi realizado um controle de qualidade em função do peso das esferas e do copo do moinho para observar possível contaminação. Em seguida o pó foi secado em estufa a 120 °C, desagregado e peneirado em malhas de 100 mesh (0,15mm). Os corpos a verde foram prensados uniaxialmente em uma matriz metálica no

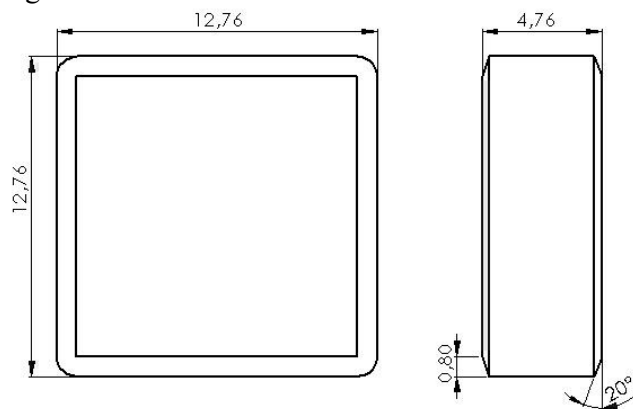
formato 16,36 x 16,36 x 7,50 mm, com carga de 80 MPa, seguida de prensagem isostática com carga de 300 MPa, por 2 min. As cerâmicas a base de alumina foram acomodados sobre um cadinho de alumina, protegido por uma cama de alumina, seguido da sinterização nas temperaturas de 1400° - 1600° C por 2 horas, com taxas de aquecimento variadas. As cerâmicas a base de nitreto de silício foram acondicionadas em cadinhos de grafite e submetidas à sinterização em atmosfera de nitrogênio em uma temperatura de sinterização variando de 1600° - 1900° C por 1 hora.

Após a sinterização as cerâmicas foram analisadas quanto à densidade relativa pelo princípio de Arquimedes e posteriormente, lixadas e polidas para análise de microdureza e tenacidade à fratura utilizando método de indentação Vickers com carga de 20 N em função das normas ASTM-C-1327-99 e ASTM-C-1421-99, respectivamente.

6.3.1 Inseto cerâmico

Para esses testes as amostras foram retificadas e lapidadas na geometria SNGN120408 (12.76 mm×12.76 mm, 4.76 mm, espessura 0.08 mm, raio de ponta 0.2 mm×20° chanfro), para utilização em um suporte com inclinação de 0°. O formato e dimensões foram definidos em função da resistência mecânica, das dimensões do porta ferramenta e das condições de utilização da ferramenta. Na Figura 26 é mostrado o desenho do inserto utilizado neste experimento (as medidas estão em milímetros). Esta geometria pode ser utilizada tanto para condições de semi-desbaste, desbaste pesado de diversas ligas metálicas e acabamento de ferros fundidos.

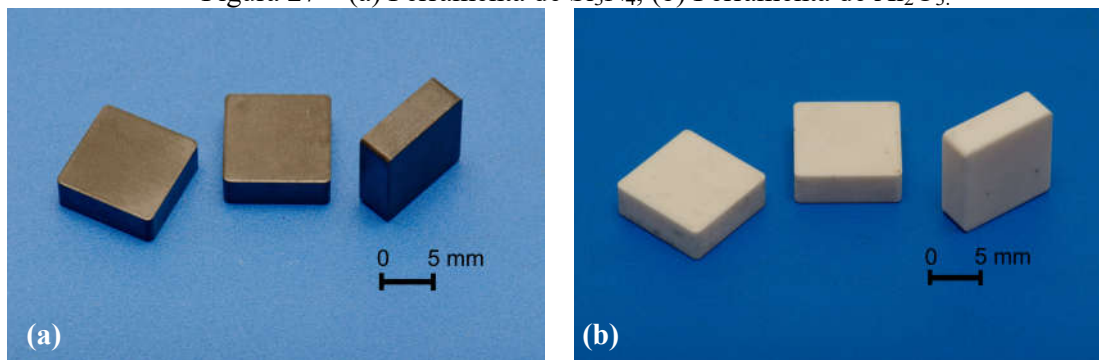
Figura 26 – Vista frontal e lateral do inserto cerâmico.



Fonte: Autoria própria.

As ferramentas utilizadas para estes ensaios foram de cerâmica composta por alumina (Al_2O_3) e nitreto de silício (Si_3N_4) com adição de óxidos. Elas possuem geometria SNGN120408 (quadrada) e nenhuma das ferramentas utilizada possui revestimento.

Figura 27 – (a) Ferramenta de Si_3N_4 , (b) Ferramenta de Al_2O_3 .



Fonte: Autoria própria.

6.4 CRITÉRIOS PARA FIM DE VIDA DA FERRAMENTA

Os critérios de fim de vida das ferramentas foram baseados na literatura. A determinação do fim de vida segue as recomendações da norma ISO 3685/1993, que fixa o desgaste de flanco máximo com um valor igual a 0,6mm, de forma a obter o melhor aproveitamento das ferramentas.

6.5 PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS

Os parâmetros de usinagem foram selecionados de acordo com os dados existentes na literatura, testes preliminares e dados contidos em catálogos de fabricantes de ferramentas de corte. Esses parâmetros tiveram como objetivo fornecer informações para uma avaliação do desempenho da ferramenta nas diversas condições de usinagem, analisando o desgaste de flanco e comparando seus resultados de rugosidade e temperatura durante o processo.

No primeiro ensaio com a ferramenta a base de Si_3N_4 foi utilizada uma velocidade de corte de 300 m/min, com profundidade de corte 0,5 mm e avanço 0,2 mm. Posteriormente, foram utilizadas as velocidades de 400 m/min e 500 m/min, mantendo os outros dois parâmetros inalterados. O mesmo processo foi realizado para as ferramentas a base de Al_2O_3 .

Foi estabelecido que fossem realizados seis passes de ferramenta, com o desgaste sendo medido entre um passe e outro. Para melhor dinâmica do trabalho, os dados foram especificados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de corte utilizados

Ferramenta	V_c (m/min)	f (mm)	a_p (mm)
	300	0,2	0,5
Si_3N_4	400	0,2	0,5
	500	0,2	0,5
	300	0,2	0,5
Al_2O_3	400	0,2	0,5
	500	0,2	0,5

Fonte: Autoria própria.

6.7 ANÁLISE DAS RUGOSIDADES (R_A E R_Y)

Para a avaliação das rugosidades nos testes foi utilizado um rugosímetro marca Mitutoyo SJ-301, pertencente ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG, onde a peça foi dividida em três regiões especificadas como R1, R2 e R3, defasadas 120 graus uma da outra. As análises foram realizadas utilizando o filtro GAUSS e cut off de 0,08mm, de acordo com as normas DIN 4768 e ISO 4288.

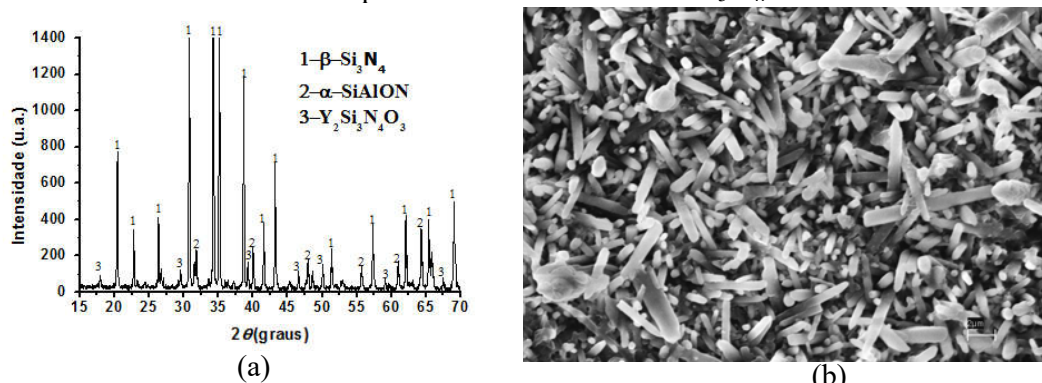
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão exibidos os resultados obtidos pela medição do desgaste de flanco da ferramenta, forças de corte, temperatura e rugosidades superficiais geradas para os dois tipos de ferramentas utilizadas durante os ensaios de torneamento. Os dados serão apresentados na forma de gráficos e análises de imagens obtidas através de microscopia ótica, além de espectros das análises químicas das ferramentas utilizadas.

7.1 CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA A BASE DE Si_3N_4

As caracterizações das amostras mostraram ferramentas de corte com densidade de 98,18 % D.T., presença de fase majoritária de $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ e pequenas quantidades de SiAlON . Essas fases são importantes para que as ferramentas possam obter bons valores de dureza e tenacidade à fratura. Na Figura 28 (b) é observada a microestrutura obtida por MEV, evidenciando a distribuição e a geometria dos grãos da ferramenta, sendo possível observar a transformação de fase ocorrida durante o processo de sinterização. Para a ferramenta de nitreto de silício, obteve-se microdureza de 17,50 GPa, $K_{1c} = 5,68 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

Figura 28 – (a) Difratograma de raios X da ferramenta de nitreto de silício; (b) Microestrutura obtida por MEV da ferramenta de Si_3N_4 .



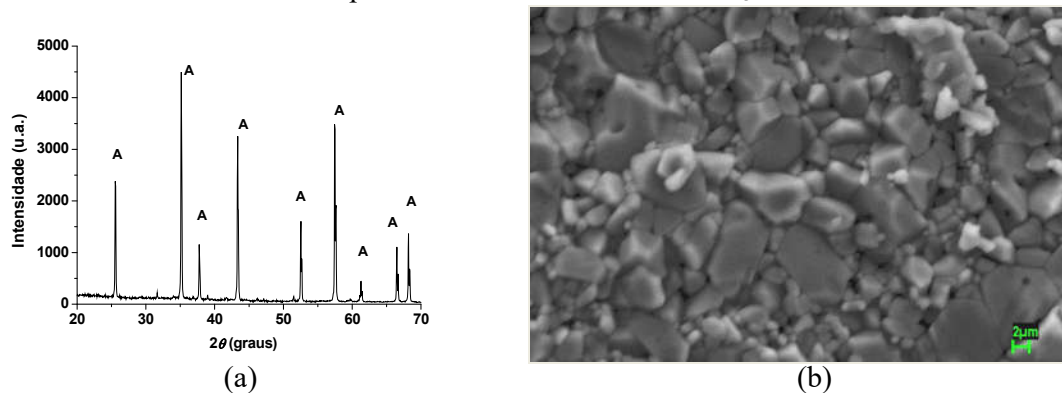
Fonte: Autoria própria.

7.2 CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA A BASE DE Al_3O_2

Nesta ferramenta é possível notar que não há a forte presença de outras fases, como na ferramenta de nitreto de silício, através da Figura 29 (a). É observada a microestrutura obtida

por MEV, onde é possível notar que os grãos crescem de forma irregular. Os pequenos vazios encontrados entre os grãos podem ocorrer em função das diferentes concentrações de óxidos e serem identificados como porosidade. Para aplicações como ferramenta de corte, de acordo com a literatura, é desejável que a ferramenta possua a menor quantidade de poros possível.

Figura 29 – (a) Difratoograma de raios X da ferramenta de alumina; (b) Microestrutura obtida por MEV da ferramenta de Al_2O_3 .



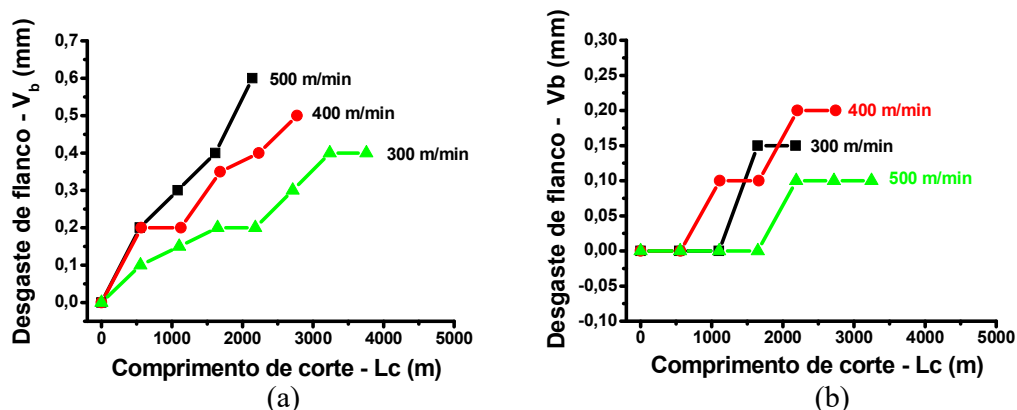
Fonte: Autoria própria.

7.3 ANÁLISE DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS

Diferentes modos de falhas das ferramentas, incluindo desgaste de flanco e quebra foram observados neste estudo. Entre esses padrões de desgaste, podemos observar desgaste de flanco e fratura nas ferramentas de nitreto de silício e desgaste de flanco, trincas e lascamento nas ferramentas de alumina.

Na Figura 30 é mostrado o desgaste de flanco utilizando o critério de $V_B \text{ máx} = 0,6\text{mm}$ para as ferramentas de nitreto de silício e alumina, respectivamente. As curvas representam uma medida intermediária entre as três réplicas que foram realizadas para cada velocidade. Foram feitos seis passes da ferramenta para cada velocidade e após cada ensaio foi medida a rugosidade da peça.

Figura 30 – Desgaste de flanco vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).



Fonte: Autoria própria.

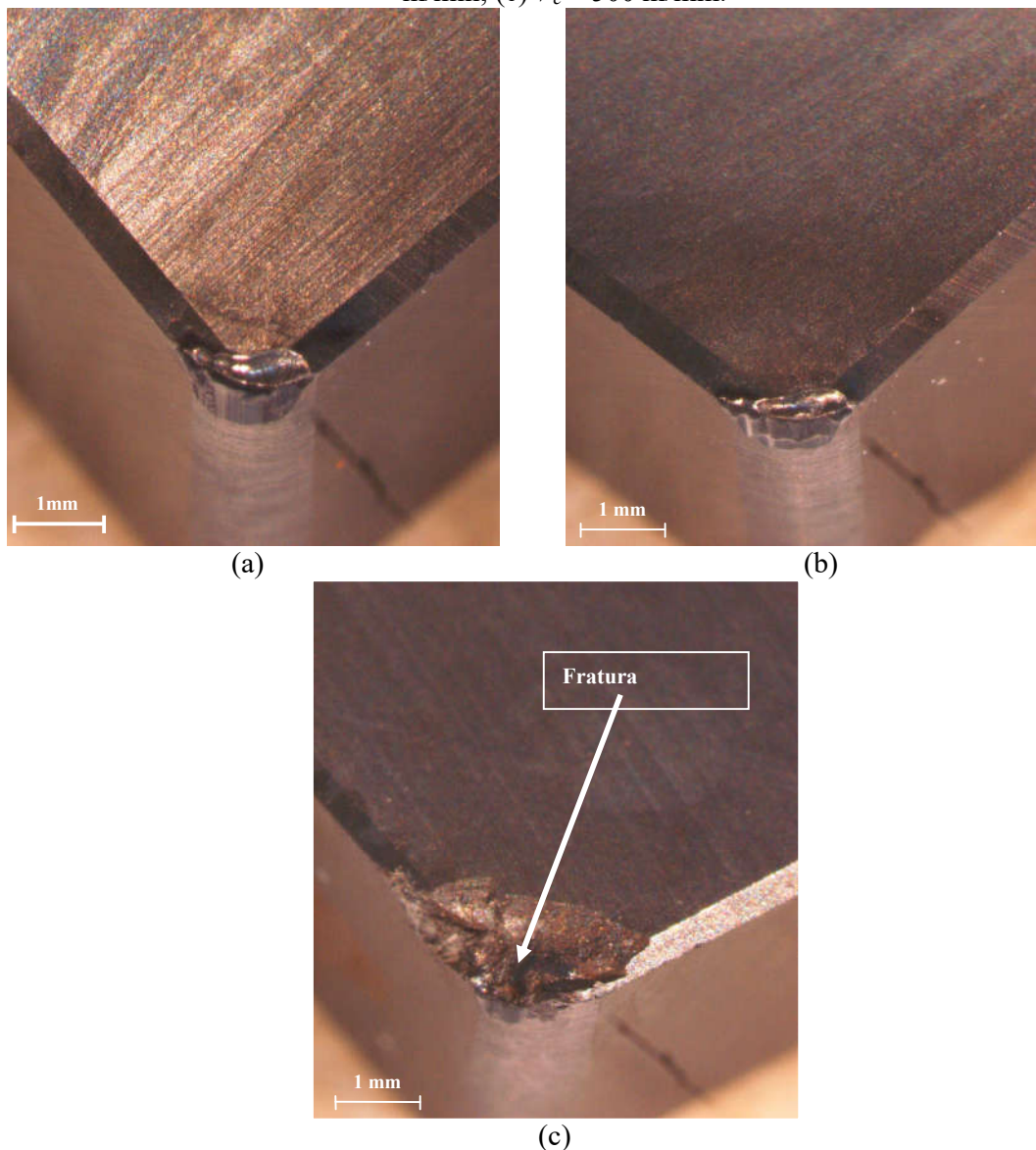
A ferramenta a base de nitreto de silício possui em sua estrutura maior quantidade de fase $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ que possui maior fase amorfa no contorno de grão e que, durante a usinagem, submetido aos esforços de compressão juntamente com a alta temperatura, provoca a remoção de pequenos grãos que ao longo do tempo podem levar a pequenas fraturas.

Na $V_c = 500\text{m/min}$, houve fratura da ferramenta de Si_3N_4 , que pode ter sido impulsionada pelas altas forças de corte e temperaturas. Por atingir o valor máximo de desgaste do flanco muito rápido, fica claro que estas condições de usinagem não foram ideais para esta ferramenta.

Segundo Diniz (2013), a cerâmica pura possui melhor estabilidade química, mas é ruim com relação à tenacidade e dureza a quente, já o SiAlON possui estabilidade química ruim e boa tenacidade. Pelo fato da ferramenta de Si_3N_4 apresentar em sua composição certa quantidade de SiAlON, provavelmente a alta velocidade aliada à estabilidade química ruim podem ter provocado a fratura, já que esta também não possui nenhum tipo de revestimento.

Também é visível que o desgaste para ferramentas de nitreto de silício é mais intenso conforme a velocidade aumenta, sendo o contrário do que ocorre para a ferramenta de alumina.

Figura 31 - Desgaste de flanco da ferramenta de Si_3N_4 para (a) $V_c = 300$ m/min; (b) $V_c = 400$ m/min; (c) $V_c = 500$ m/min.



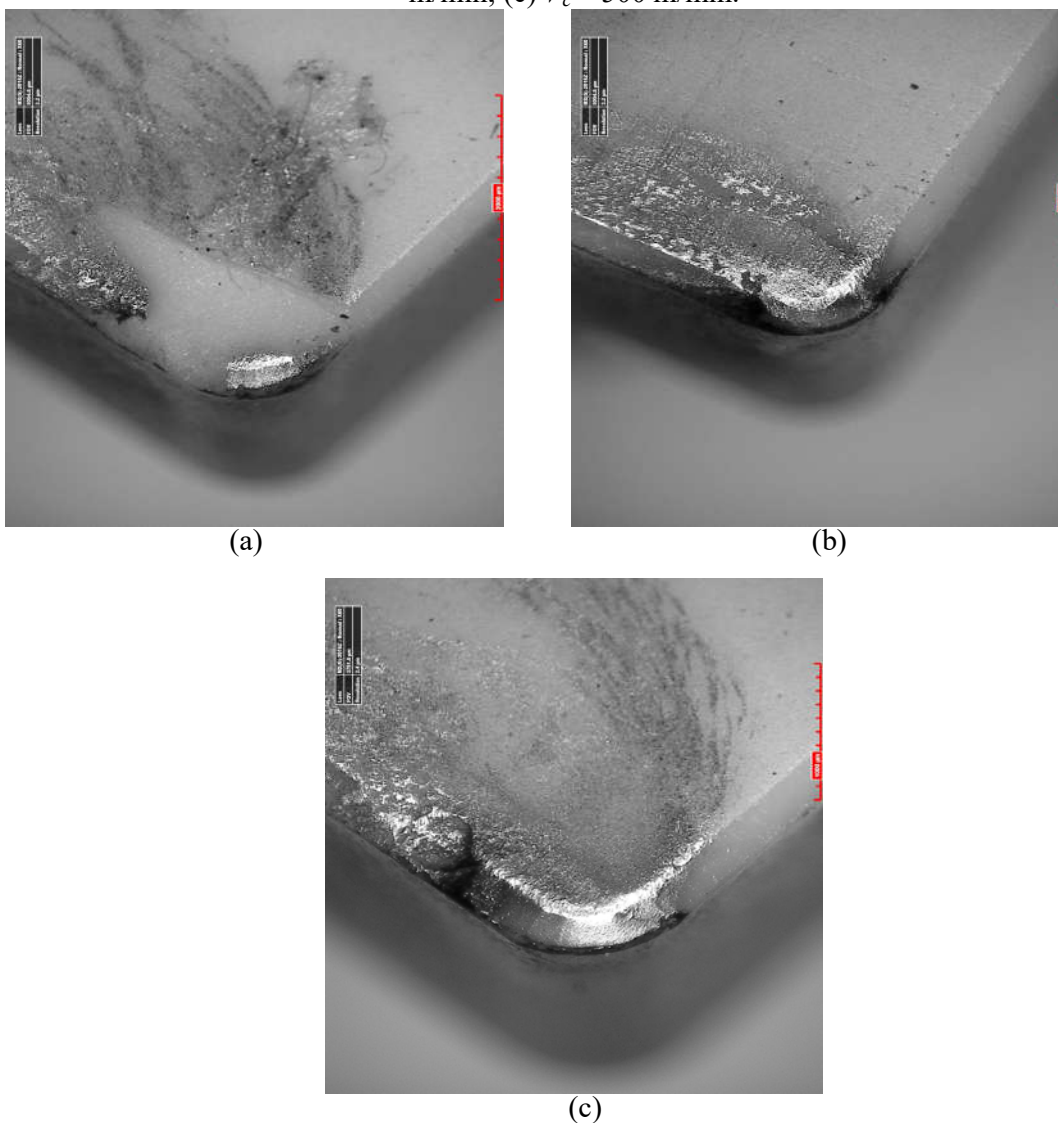
Fonte: Autoria própria.

É possível notar que também ocorreu desgaste de flanco severo para as velocidades de 300 e 400 m/min, mas foi com 300m/min que ela apresentou seu melhor desempenho, obtendo o maior comprimento de corte. Isto pode ter ocorrido em função da menor ação das partículas duras do material usinado.

A ferramenta de alumina apresentou um melhor resultado com uma maior velocidade de corte, como já é característico de ferramentas de materiais cerâmicos. Para uma $V_c = 300$ m/min, através da análise da Figura 32 (a), notam-se as marcas do cavaco na ferramenta de forma irregular. As vibrações ocorridas durante o torneamento aliadas a partículas duras do

material acabaram promovendo o lascamento da ferramenta, que possui menor tenacidade que a ferramenta a base de nitreto de silício. Para a $V_c = 400$ m/min, as marcas de cavaco ficaram mais concentradas, promovendo um desgaste abrasivo maior somente em um lado da ferramenta. Na $V_c = 500$ m/min o desgaste foi mais homogêneo na superfície de saída, porém a ferramenta apresentou um desgaste de entalhe, que pode ter sido causado por desgaste de aderência e arrastamento, chamado também de *attrition*, onde fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface.

Figura 32 - Desgaste de flanco da ferramenta de Al_2O_3 para (a) $V_c = 300$ m/min; (b) $V_c = 400$ m/min; (c) $V_c = 500$ m/min.



Fonte: Autoria própria.

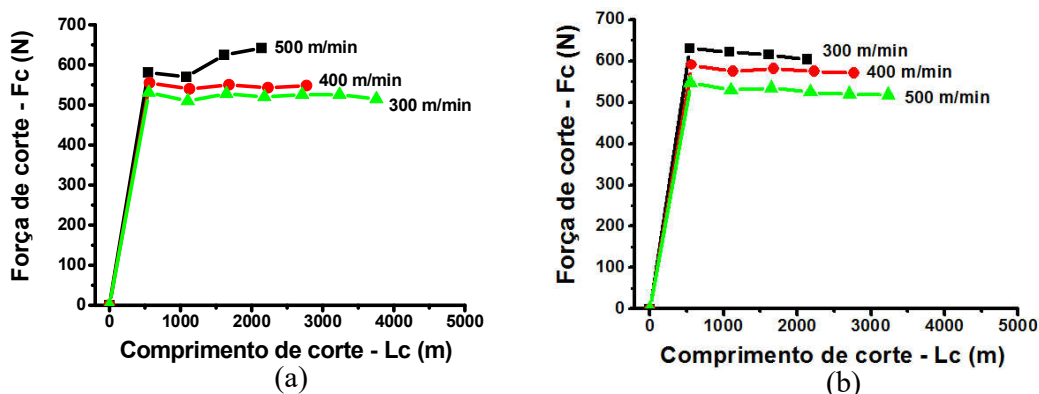
Ainda que ferramentas cerâmicas possuam grande resistência ao desgaste abrasivo e por difusão, mas o intenso contato entre peça e ferramenta que ocorre ao usinar o ferro fundido vermicular pode acarretar nestes dois mecanismos de desgaste. O desgaste por abrasão foi predominante na ferramenta de alumina, já na ferramenta de nitreto de silício o desgaste por difusão parece estar presente, mas seria necessária uma análise mais minuciosa com um maior número de ferramentas para concluir se realmente houve difusão ou não.

7.4 ANÁLISE DAS FORÇAS DE CORTE

De acordo com a análise dos gráficos apresentados para ambas as ferramentas, é possível notar que as forças de corte para a ferramenta de alumina foram ligeiramente maiores do que para a ferramenta de nitreto de silício. Esta diferença pode explicar também o lascamento da ferramenta de alumina para uma $V_c=300$ m/min.

Também fica claro nos gráficos apresentados para a ferramenta de nitreto de silício em qual ponto ocorreu a fratura, já que ocorre um aumento repentino da força a partir deste momento. Não é possível ver o momento exato em que ocorre o lascamento na ferramenta de alumina, pois o ensaio foi interrompido logo após a falha.

Figura 33 - Força de corte vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).

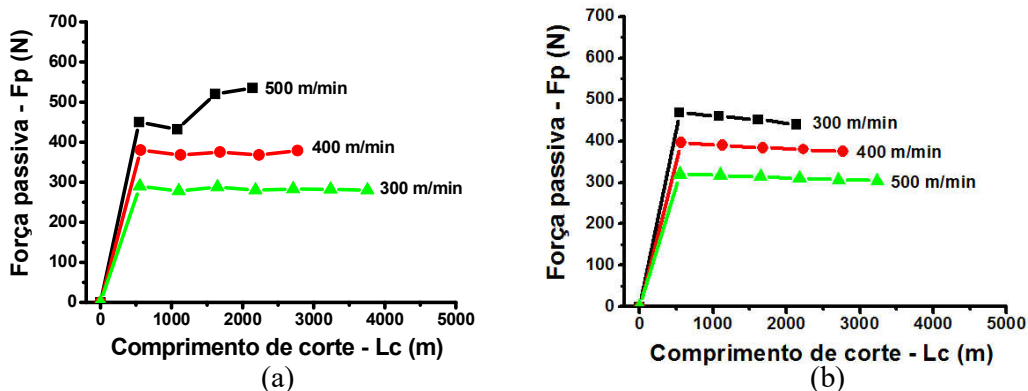


Fonte: Autoria própria.

Em teoria, o com o aumento do desgaste da ferramenta, deveriam crescer também as forças de corte, mas como pode ser observado, após o período inicial de adaptação da ferramenta ao processo, as forças de corte decrescem ligeiramente ou permanecem estáveis. Também é interessante notar que para uma $V_c=500$ m/min a ferramenta de alumina

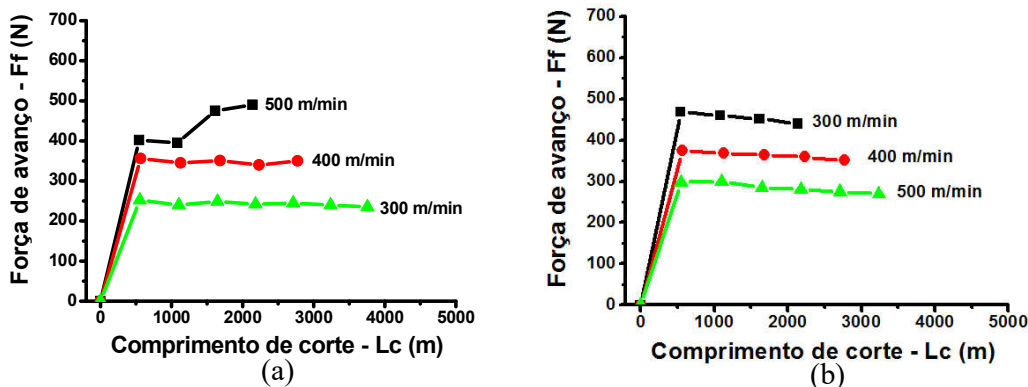
apresentou a menor força, indicando que a condição de alta velocidade é melhor para esta ferramenta.

Figura 34 - Força passiva vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).



Fonte: Autoria própria

Figura 35 - Força de avanço vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).

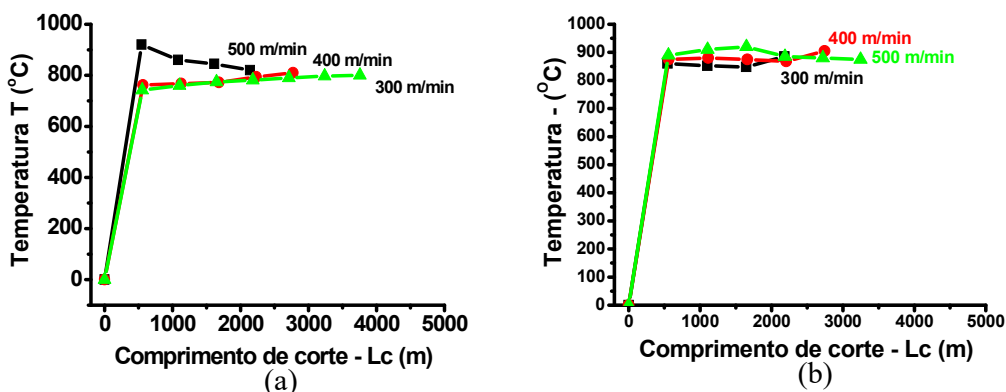


Fonte: Autoria própria.

7.5 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS

O aumento da velocidade de corte resulta no aumento da temperatura e, presumivelmente, na redução do nível de tensões mecânicas e térmicas desenvolvidas na região do corte e da capacidade do material da ferramenta suportar essas tensões sem microfraturas, o que também pode justificar as avarias nas ferramentas em altas velocidades de corte. Como o cavaco do CGI tem característica dúctil, este acaba ficando mais tempo em contato com a face da ferramenta, ocasionando altas temperaturas e expondo a mesma aos efeitos térmicos de usinagem.

Figura 36 – Temperatura vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).



Fonte: Autoria própria.

Assim como nas forças de corte, as temperaturas para a ferramenta de alumina também são maiores do que para as de nitreto de silício, exceto para a $V_c=500$ m/min, onde a temperatura teve o maior valor até o ponto da fratura. A queda subsequente indica que a partir deste ponto havia uma maior área para que a temperatura fosse distribuída.

Como o processo foi interrompido para a ferramenta de alumina para $V_c=300$ m/min quando esta sofreu a avaria, também não é possível notar o mesmo efeito através do gráfico, mas nota-se que a temperatura começou a aumentar continuamente antes do lascamento, atingindo valores similares aos de velocidades de corte maiores.

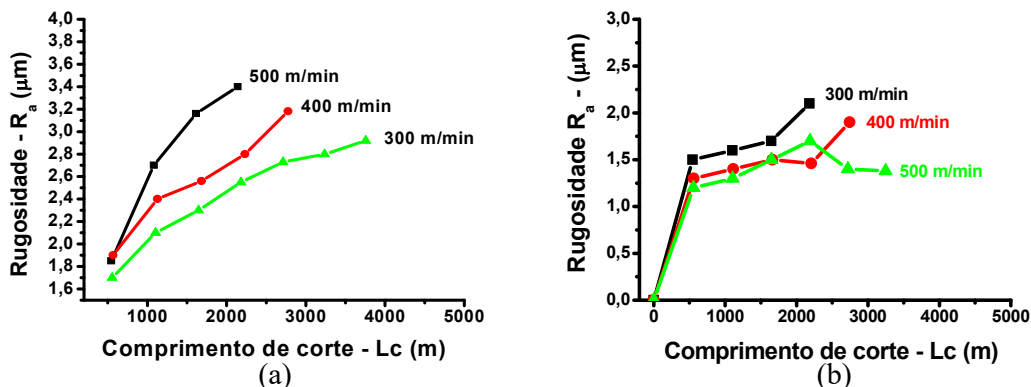
7.6 ANÁLISE DAS RUGOSIDADES

Como o parâmetro R_a representa apenas a média, foi feita a análise utilizando também o parâmetro R_y , para que possa ser identificada a diferença entre o maior pico e o maior vale. O parâmetro R_y também serve para indicar a quantidade de material que pode ser removida antes de atingir a dimensão limite da peça.

Para a ferramenta de nitreto de silício as rugosidades médias (R_a) foram todas ascendentes, já para a ferramenta de alumina temos uma rugosidade (R_a) descendente, para $V_c=500$ m/min, o que indica uma acomodação da ferramenta/peça.

Como foi utilizado o mesmo avanço para todas as velocidades, não é possível afirmar que um menor avanço resultaria em uma melhor rugosidade superficial, mas é possível afirmar que para a ferramenta de Si_3N_4 o aumento da velocidade de corte tem influência negativa no acabamento da peça.

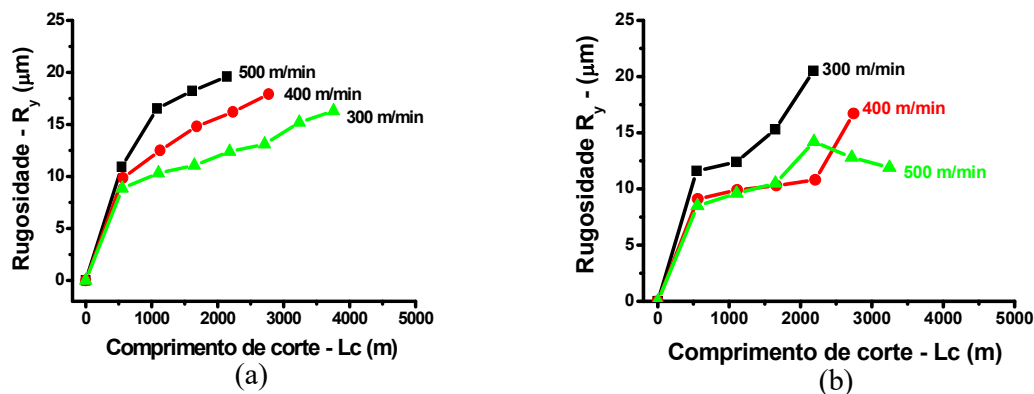
Figura 37 – Rugosidade (R_a) vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).



Fonte: Autoria própria.

Através da análise dos picos e vales com a rugosidade R_y conclui-se que a rugosidade média das peças usinadas com a ferramenta de alumina é menor justamente porque a diferença entre picos e vales é menor também, em relação à peça usinada com a ferramenta de nitreto de silício. Isso pode significar que a ferramenta de alumina teria um melhor desempenho na usinagem de acabamento. Os valores altos de rugosidade para $V_c = 300$ m/min utilizando a ferramenta de alumina podem ser explicados pela avaria que a ferramenta sofreu durante o último passe.

Figura 38 – Rugosidade (R_y) vs. Comprimento de corte para Si_3N_4 (a); para Al_2O_3 (b).



Fonte: Autoria própria.

8 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que as ferramentas apresentaram bom desempenho no torneamento a seco, sendo que a ferramenta a base de alumina apresentou os melhores resultados, tanto por apresentar um menor desgaste de flanco considerando os seis passes utilizados nos ensaios, quanto por ter o melhor desempenho em alta velocidade, sendo uma ferramenta promissora na usinagem de grandes comprimentos e ideal para acabamentos, já que possui menor tenacidade e melhor estabilidade química.

A ferramenta de nitreto de silício possui maior tenacidade, mais indicada para operações de desbaste. Isso pode ser explicado em função da ferramenta a base de Si_3N_4 possuir fase intergranular macia, denominada amorfa, enquanto que a alumina possui maior resistência a abrasão devido a sua alta refratariedade.

A geometria da ferramenta utilizada apresenta uma melhor resistência da aresta de corte, por outro lado é uma das que possui maior tendência a vibrações. Novos testes com diferentes geometrias devem ser realizados a fim de compreender melhor como estas variáveis se relacionam na usinagem do CGI.

Como na indústria atual o uso de elevadas velocidades de corte é importante para aplicações em máquinas modernas, os estudos com ferramentas cerâmicas devem continuar. Com maior velocidade, menor tempo de usinagem e, se ainda contarmos com a eliminação do fluido de corte, teremos uma grande redução de custos.

Com novos estudos e novas propriedades, será possível confrontar dados de outros trabalhos, para assim desenvolver uma ferramenta nacional mais barata e que consiga atender da melhor maneira possível os requisitos para a usinagem em corte contínuo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM: C1327-99**: Standard test method for vickers indentation hardness of advanced ceramics, Philadelphia, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM: C-1421-99**: Standard test method for determination of fracture toughness of advanced ceramics at ambient temperature, Philadelphia, 1999.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamento térmico, principais tipos. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2005.

DALO, M. A. **Estudo de desempenho de ferramenta de corte no processo de mandrilamento em ferro fundido vermicular: CGI**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automobilística) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

DAWSON, S. **Controlling the production of compacted graphite iron**. Schaumburg: Modern Casting, 1998.

DAWSON, S. et al. **The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron**. Detroit: SAE World Congress, 2001.

DAWSON, S.; SCHROEDER, T. **Compacted graphite iron: a viable alternative**. Crystal Lake: Engineered Casting Solutions AFS Spring, 2000.

DAWSON, S.; SCHROEDER, T. **Practical applications for compacted graphite iron**. Schaumburg: AFS Transactions, 2004.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: M.M., 2013.

DORÉ, C. **Influência da variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular**. 2007. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 5 ed. São Paulo: Blucher, 1977.

JUNIOR, E. M.; GUESSER, W. L. **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular através de ensaios de furação.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. O. **Teoria da usinagem dos materiais,** São Paulo: Blucher, 2011.

MOCELLIN, F. **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação.** 2002. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MOCELLIN, F. et al. Study of the machinability of compacted graphite iron for drilling process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,** Rio de Janeiro, v.26, 2004.

NAVES, V.T.G. **Estudo da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e vermicular classe 350 no fresamento frontal em alta velocidade de corte.** 2009. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

ROSA, S. N. **Influência do teor de titânio no torneamento do ferro fundido vermicular.** 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SANDVIK COROMANT. **Desgaste nas arestas de corte.** Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx>. Acesso em: 10 out. 2015a.

SANDVIK COROMANT. **DSBNR 2020K 12 - Ferramenta convencional T-Max® P para torneamento.** Disponível em:< <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=DSBNR%202020K%2012&m=5731378>>. Acesso em: 30 dez. 2015b.

SILVA, O. M. M.; SOUZA, J. V. C.; NONO, M. C. A.; MARTINS, G. V. ; RIBEIRO, M. V. ; MACHADO, J. P. B. **Development of Ceramic Cutting Tools for Future Application on Dry Machining.** Materials Science Forum, v. 661, 2010 p. 724-729, 2010.

SINTERCAST. **Compacted Graphite Iron – Mechanical and Physical Properties for Engine Design**. Disponível em <<http://www.sintercast.com/library/technical-publications>>. Acesso em 15 out 2015.

SOUZA, A. J. **Aplicação de multissensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento**. 2004. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SOUZA, J. V. C. **Desenvolvimento de pastilhas cerâmicas à base de Si_3N_4 para aplicações tribológicas**. 2005. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2005.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3 Ed. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1993. 249 p.

XAVIER, F. A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal duro, cerâmica e CBN**. 2003. 146 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

WITTING, H. Torneamento de superligas. **Máquinas e metais**, São Paulo, n.440, 2002. p. 156–165.