

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Sander
Gabaldo E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 21/08/09

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Uma contribuição à melhoria do processo de
fresamento de ferro fundido vermicular - CGI**

Autor: Sander Gabaldo

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

Uma contribuição à melhoria do processo de fresamento de ferro fundido vermicular - CGI

Autor: Sander Gabaldo

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2009

SP - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

G11c Gabaldo, Sander
Uma contribuição à melhoria do processo de
fresamento de ferro fundido vermicular-CGI / Sander
Gabaldo. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Ferro fundido. 2. Usinagem. 3. Desgaste
mecânico. 4. Cerâmica. 5. Metalurgia do pó. I. Diniz,
Anselmo Eduardo. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

Título em Inglês: A contribution to the improvement of the milling process
machining compacted graphite iron – CGI.

Palavras-chave em Inglês: Cast-iron, Machining, Mechanical wear, Ceramics,
Powder metallurgy

Área de concentração: Materiais e Processo de Fabricação

Titulação: Mestrado em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Oswaldo Luiz Agostinho, Luiz Eduardo Sanches

Data da defesa: 21/08

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

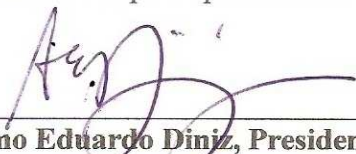
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Uma contribuição à melhoria do processo de
fresamento de ferro fundido vermicular – CGI**

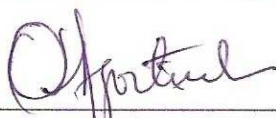
Autor: Sander Gabaldo

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Luiz Eduardo Sanches
Universidade Estadual Paulista – Unesp/Bauru.

Campinas, 21 de agosto de 2009

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Dario e Maria que sempre me incentivaram e me apoiaram em quaisquer das minhas escolhas, sendo elas pessoais, profissionais ou acadêmicas.

À minha querida esposa Samanta, pela compreensão nos momentos de minha ausência, sempre me estimulando e apoiando, fazendo com que a conclusão desta pesquisa fosse possível.

A todos os amigos e demais familiares que de forma positiva e amigável estiveram sempre comigo.

Agradecimentos

Primeiramente, a Deus, por mais esta etapa vencida.

Ao professor Dr. Anselmo Eduardo Diniz pelo profissionalismo e pela enorme capacidade de orientação, troca de experiências, companheirismo e pelo grande incentivo a motivação para realização desta pesquisa.

Aos alunos, docentes, técnicos e secretárias do Departamento de Engenharia da Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica, que sempre que solicitados, estiveram prontamente dispostos a me ajudar.

A empresa Walter do Brasil, na pessoa do Diretor Presidente Sr. Carlos Eduardo Baptista, por disponibilizar o Centro de Treinamento da Empresa para a preparação dos corpos de prova e também pelo fornecimento de todas as ferramentas de corte necessárias para a realização do trabalho.

A empresa TUPY Fundições, na pessoa do Eng^o Cássio Luiz de Andrade, doando os corpos de prova e principalmente, acreditando no propósito desta tese, incentivando a pesquisa e novos desenvolvimentos, visando aperfeiçoar ainda mais os processos de usinagem de sua empresa.

A empresa Blaser Swisslube, na pessoa do Gerente Geral, o Sr. Carsten Witthüser pelo fornecimento do fluido de corte para a preparação dos corpos de prova.

A empresa Platit, na pessoa do Diretor Geral, o Sr. Geraldo Traver pelo fornecimento das coberturas nas pastilhas.

A empresa Rolltécnica, na pessoa do Diretor, o Sr. Benedito Carlos Tancredo pela preparação das micro geometrias das arestas de corte.

“Acho que a base do sucesso em qualquer atividade está em primeiro se ter uma oportunidade, que geralmente aparece não porque você cria o momento, mas porque alguém chega e abre uma porta.”

Ayrton Senna

Resumo

GABALDO, Sander, *Uma contribuição à melhoria do processo de fresamento de ferro fundido vermicular - CGI*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 136p. Dissertação (Mestrado).

Desde o início deste século, cada vez mais têm se intensificado as pesquisas no desenvolvimento dos motores diesel, procurando aumentar a sua eficiência energética e reduzir os níveis de emissão de poluentes. Uma das maneiras de aumentar esta eficiência é aumentar os picos de pressão de explosão do combustível na câmara de combustão. O ferro fundido cinzento é o material mais utilizado para a fabricação de blocos de motores diesel. Porém para aumentar as pressões na câmara de combustão quando se utiliza este tipo de liga, é necessário aumentar a espessura das paredes do bloco de motor o que eleva o seu peso, e consequentemente, não cumpre com as exigências especificadas. Assim, o ferro fundido vermicular (CGI) aparece como um material alternativo para tal aplicação. Ele possui características de condutividade térmica e amortecimento similar ao do ferro fundido cinzento, porém, com propriedades mecânicas superiores possibilitando a fabricação de motores menores e, consequentemente, mais leves e também com melhor desempenho, sem considerar a redução da poluição ambiental por gases e ruídos. Entretanto, a utilização do CGI apresenta como desvantagem sua pior usinabilidade quando comparado com o ferro fundido cinzento, incentivando pesquisas e aperfeiçoamento das técnicas de usinagem e desenvolvimento dos materiais de corte das ferramentas, no qual este trabalho está inserido. O objetivo deste trabalho é de analisar a influência da micro geometria da aresta de corte (testou-se geometria lisa e positiva), do material da ferramenta (testou-se metal duro, cerâmica a base de nitreto de silício com e sem coberturas) e da velocidade de corte na vida da ferramenta, na rugosidade da peça e no potência de corte no fresamento de uma superfície similar à usada na face de fogo do bloco do motor de ferro fundido vermicular. As principais

conclusões foram: ferramentas com a geometria lisa sempre obtiveram vida mais longa que ferramentas positivas e a ferramenta de metal duro alcançou vida maior que as ferramentas de cerâmica (com ou sem cobertura), mesmo nas velocidades de corte usualmente utilizadas para a cerâmica.

Palavras-chave: ferro fundido vermicular, fresamento, micro geometria da aresta de corte.

Abstract

GABALDO, Sander, *A contribution to the improvement of the milling process machining compacted graphite iron – CGI*, Campinas,; Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas, 2009. 136 p. Thesis (MSc).

Since the beginning of this century, researches about the development of diesel engines have been intensified, aiming to increase its energy efficiency and to reduce the levels of emission of pollutants. One the way to increase this efficiency is to increase the peaks of pressure of fuel explosion in the combustion chamber. The grey casting iron material is the most common material used for the manufacturing of diesel engine blocks. However, to increase the pressures in the combustion chamber when this kind of alloy is used, it is necessary to increase the wall thickness of the blocks, what raises its weight and consequently, does not fulfill with the specified requirements. Thus, the compacted graphite iron (CGI) appears as an alternative material for such application. It has characteristics of heat conductivity and damping similar to the casting iron, however, with superior mechanical properties making possible the manufacturing of small and consequently, light engines and also with better performance, without considering the reduction of the environmental pollution for gases and noises. However the use of the CGI presents as disadvantage its worse machining when compared with the grey casting iron, stimulating research and development of machining techniques and, development of the cutting materials, where this thesis is inserted. The objective of this thesis is to analyze the influence of the micro geometries of the cutting edge (tested positive and flat geometry), cutting material (tested hard material, ceramic Si_3N_4 with or without coating) and cutting speed in the finishing operation of the fire face of the engine made of CGI. As output variables we used tool life, cutting power and surface roughness of the workpiece. Among the main result we could say that the most negative tool presented the longest tool life and carbide material is better than ceramic (with or without coating) in terms of tool life in the milling of this kind of workpiece.

Key words: Compacted graphite iron, milling cutter, micro geometries of the cutting edge

Sumário

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Sumário	xi
Lista das figuras	xv
Lista das tabelas	xxi
Nomenclatura	xxiii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
Capítulo 2	4
Ferro fundido vermicular	4
2.1 - A história do Motor Diesel	4
2.2 - Bloco do Motor Diesel	5
2.3 - Materiais para fabricação dos blocos de motor a Diesel	6
2.3.1 - Ferro Fundido Cinzento	7
2.3.2 - Ferro Fundido Vermicular – CGI	10
2.4 - Processo de Produção do CGI	10
2.4.1 - Influência das grafitas	11

2.5 - Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular - CGI	13
2.5.1 - Efeitos da forma da grafita	14
2.5.2 - Efeitos da Perlita	15
2.5.3 - Nodularidade	17
2.5.4 - Influência dos elementos químicos	18
2.5.5 - Dificuldades na Usinagem do bloco de motor	19
2.6 - Processo de usinagem por fresamento no CGI	20
2.7 - Processo de usinagem por torneamento no CGI	28
2.8 - Análise de processos na usinagem comparando o CGI e o ferro fundido cinzento	30
2.9 - Ferramentas de corte	31
2.9.1 - Metal duro	34
2.9.2 - Metal duro com cobertura	36
2.9.3 - As principais características das coberturas	36
2.9.4 - Material cerâmico	39
2.10 - Mecanismos de desgastes das ferramentas de corte	45
2.11 - Desgastes e avarias nas ferramentas de corte	45
2.11.1 - Desgaste de flanco	47
2.11.2 - Desgaste de cratera	48
2.11.3 - Desgaste de entalhe	48
2.11.4 - Deformação plástica da aresta de corte	49
2.11.5 - Lascamento	49
2.11.6 - Trincas	49
2.11.6.1 - Trincas térmicas	49
2.11.6.2 - Trincas mecânicas	50

2.11.7 - Quebra	50
Capítulo 3	51
Materiais, equipamentos e procedimento experimental	51
3.1 - Materiais	51
3.2 - Propriedades e Microestrutura	53
3.3 - Geometrias ensaiadas	55
3.4 - Equipamentos	56
3.5 - Sistema de aquisição de dados de potência	57
3.6 - Ferramentas de corte	58
3.6.1 - Corpo da fresa	58
3.6.2 - Pastilhas e cobertura	59
3.7 - Procedimento experimental	63
3.7.1 - Ensaaios com metal duro	65
3.7.2 - Ensaaios com cerâmica	65
3.7.3 - Ensaaios com velocidades de corte maiores	66
Capítulo 4	67
Resultados e discussões	67
4.1 - Vida da ferramenta	67
4.1.1 - Pastilhas de metal duro	67
4.1.2 - Pastilhas de cerâmica com cobertura	73
4.1.3 - Pastilhas de cerâmica sem cobertura	75
4.2 - Acabamento superficial	79
4.3 - Potência de corte	82
4.4 - Ensaaios com maiores velocidades de corte	84
4.4.1 - Ensaaios com metal duro nas mesmas condições de corte da cerâmica	88

4.5 - Análise do desempenho dos revestimentos nas pastilhas de metal duro e cerâmica	90
Capítulo 5	103
Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	103
Referências bibliográficas	106

Lista de figuras

Figura 2.1 - Bloco do motor 4 cilindros (MWM, 2007)	5
Figura 2.2 - Face do bloco de motor 6 cilindros (DAIMLER AG, 2006)	6
Figura 2.3 - Micrografia óptica do ferro fundido vermicular atacada com nital e sentido de usinagem da ferramenta de corte (GEORGIU,2002)	8
Figura 2.4 - Forma espacial dos tipos de grafitas dos ferros fundidos. (a) Ferro fundido cinzento (b) Ferro fundido vermicular. c) Ferro fundido nodular	9
Figura 2.5 - Seqüência da formação de cavaco no ferro fundido cinzento (COEHEN et al.2000).....	15
Figura 2.6 - Influência da perlita na usinagem do CGI (DAWSON et al., 1999)	17
Figura 2.7 - Granulometria do metal duro utilizado para fabricação das pastilhas realizadas nos testes (WALTER AG, 1997)	21
Figura 2.8 - Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta (WALTER AG, 1997).....	22
Figura 2.9 - Evolução do desgaste de flanco com aumento do comprimento usinado (WALTER AG, 1997)	22
Figura 2.10 - Desgastes nas pastilhas de metal duro com ampliação de 20 X (WALTER AG, 1997)	23
Figura 2.11 - Comprimento usinado em metros para diferentes materiais de corte na usinagem de ferro fundido cinzento e CGI (WALTER AG, 1997)	24

Figura 2.12 - Comprimento usinado da ferramenta de corte comparando a usinagem entre CGI e GG70 com velocidade d corte de 141m/min (WALTER AG, 1997)	25
Figura 2.13 - Comprimento usinado com diferentes materiais e velocidades de corte com a classe de metal duro HC-K15/2 (WALTER AG, 1997)	25
Figura 2.14 - Evolução dos desgastes na usinagem de CGI com ferramentas de Metal duro e cerâmica (LUCASIEVCZ et al.,2007).....	27
Figura 2.15 - Vida útil das pastilhas de metal na usinagem de diferentes ligas de CGI (DORÉ et al., 2007).....	29
Figura 2.16 - Desenvolvimento das ferramentas de corte (HEISEL, 2007)	31
Figura 2.17 - Variação da dureza de alguns materiais de ferramentas de corte com a temperatura (HEISEL, 2007)	31
Figura 2.18 - Coberturas para ferramentas de corte e suas características (DROBNIEWSKI, 2003)	38
Figura 2.19 - Dureza e coloração das coberturas (WERTHEIMETAL, 2000).....	38
Figura 2.20 - Mecanismos formadores dos desgastes, (a) abrasão, (b) difusão, (c) oxidação e (d) aderência (WALTER AG, 2008)	45
Figura 2.21 - Tipos de desgastes e avarias (SANDVIK COROMANT, 2003).....	47
Figura 2.22 - Sistema convencional para medição dos desgastes (TRENT, 2000)	48
Figura 3.1 - Bloco de motor Ford V-6	52
Figura 3.2 - Projeto do <i>blank</i> usinado	52
Figura 3.3 - <i>Blank</i> usinado	53
Figura 3.4 - Micrografia representativa de uma região do núcleo das amostras 1 e 2, onde se observam as grafitas vermicular e nodular e a matriz perlítica com pouca ferrita. Ataque nital 3%	54

Figura 3.5 - Representação do furo de refrigeração e fixação do cabeçote	55
Figura 3.6 - Sentido de usinagem da fresa no blank usinado	56
Figura 3.7 - Centro de Usinagem Vertical do Laboratório de usinagem da F.E.M. – Unicamp ..	56
Figura 3.8 - Microscópio óptico e dispositivo de fixação da fresa	57
Figura 3.9 - Cabeçote de Fresar (WALTER AG)	58
Figura 3.10 - Estrutura cristalina da camada da cobertura (esquemático) (PLATIT, 2008)	60
Figura 3.11 - Estrutura cristalina da cobertura (PLATIT, 2008)	60
Figura 3.12 - Estruturas das coberturas das ferramentas de corte (PLATIT, 2008)	62
Figura 3.13 - Desenho de construção da pastilha de metal duro e cerâmica com micro geometria tipo A57 (WALTER AG, 2008)	62
Figura 3.14 - Desenho de construção da pastilha de metal duro e cerâmica com micro geometria tipo F57 - geometria padrão. (WALTER AG, 2008)	63
Figura 3.15 - Pontos de medição do desgaste na aresta de corte principal	64
Figura 3.16 - Pontos de medição da rugosidade superficial	64
Figura 4.1 - Comparação da vida útil (em tempo de corte e em volume de cavaco removido nos ensaios com pastilhas de metal duro)	68
Figura 4.2 - Ensaio 1.1 (a), ensaio 1.2 (b) e ensaio 1.3 (c). Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de metal duro com cobertura. Geometria F57, $v_c = 350$ m/min	69
Figura 4.3 - Ensaio 2.1 (a), ensaio 2.2 (b), ensaio 2.3 (c) e ensaio 2.4 (d). Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de metal duro com cobertura. Fim da vida da ferramenta. Geometria F57, $v_c = 280$ m/min	70
Figura 4.4 - Ensaio 3.1 (a), ensaio 3.2 (b) e ensaio 3.3 (c). Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de metal duro com cobertura. Fim da vida da ferramenta. Geometria A57, $v_c = 350$ m/min	70

Figura 4.5 - Ensaio 4.1 (a), ensaio 4.2 (b) e ensaio 4.3 (c) Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de metal duro com cobertura. Fim da vida da ferramenta. Geometria A57, $V_c = 280$ m/min	71
Figura 4.6 - Comparação da vida útil (em tempos de corte e em volume de cavaco removido) nos ensaios com pastilhas de cerâmica com cobertura	72
Figura 4.7 - Ensaio 5.1 (a) e ensaio 5.1 (b) – Aresta de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica recoberta. Fim da vida da ferramenta. Geometria F57, $v_c = 850$ m/min	73
Figura 4.8 - Ensaio 6.1 (a) e ensaio 6.1 (b). Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de cerâmica recoberta. Fim da vida da ferramenta. Geometria F57, $v_c = 680$ m/min	73
Figura 4.9 - Ensaio 7.1 (a), ensaio 7.2 (b) e ensaio 7.3 (c). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas cerâmicas com cobertura. Fim da vida da ferramenta. Geometria A57, $v_c = 850$ m/min	74
Figura 4.10 - Ensaio 8.1 (a), ensaio 8.2 (b) e ensaio 8.3 (c) Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica recoberta. Fim de vida da ferramenta. Geometria A57, $v_c = 680$ m/min	74
Figura 4.11 - Comparação da vida útil (em tempo de corte e em volume de cavaco removido) nos ensaios com pastilhas de cerâmica sem cobertura	75
Figura 4.12 - Ensaio 9.1 (a) e ensaio 9.2 (b)ensaio 9.3 (c). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica sem cobertura. Fim da vida da ferramenta . Geometria F57, $v_c = 850$ m/min	76
Figura 4.13 - Ensaio 10.1 (a) e ensaio 10.1 (b). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica sem cobertura. Fim da vida da ferramenta. Geometria F57, $v_c = 680$ m/min	77
Figura 4.14 - Ensaio 11.1 (a), ensaio 11.2 (b) e ensaio 11.3 (c). Arestas de corte utilizadas nos	

ensaios com ferramentas de cerâmica sem cobertura. Fim da vida da ferramenta. Geometria A57, $v_c = 850$ m/min	77
Figura 4.15 - Ensaio 12.1 (a), ensaio 12.2 (b) e ensaio 12.3 (c). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica sem cobertura. Fim da vida da ferramenta. Geometria A57, $v_c = 680$ m/min	78
Figura 4.16 - Rugosidade da peça obtida com pastilhas de metal duro	79
Figura 4.17 - Rugosidade da peça obtida com pastilhas de cerâmica com e sem cobertura	80
Figura 4.18 - Rugosidade com pastilhas de metal duro e cerâmica	81
Figura 4.19 - Potência de corte no início de vida útil para ensaios com pastilhas de metal duro e cerâmica	83
Figura 4.20 - Potência de corte no final de vida útil para ensaios com pastilhas de metal duro e cerâmica	83
Figura 4.21 - Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas de metal duro e geometria A57	86
Figura 4.22 - Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas de cerâmica com cobertura e geometria A57	87
Figura 4.23 - Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas de cerâmica sem cobertura e geometria A57	87
Figura 4.24 - Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas metal duro e geometria A57 nas velocidades de corte de 680 e 850 m/min	89
Figura 4.25 - Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas metal duro e geometria A57 nas velocidades de corte de 680 e 850 m/min	90
Figura 4.26 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 350 m/min (fim de vida da ferramenta)	91

Figura 4.27- Elementos químicos encontrados nas pastilhas de metal duro e velocidade de corte de 350 m/min	92
Figura 4.28 - Vista da região de desgaste de flanco e trinca térmica da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 350 m/min (fim de vida da ferramenta)	93
Figura 4.29 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 420 m/min (fim de vida da ferramenta)	93
Figura 4.30 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de metal duro e velocidade de corte de 420 m/min	95
Figura 4.31 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 680 m/min (fim de vida da ferramenta)	95
Figura 4.32 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de metal duro e velocidade de corte de 680 m/min	97
Figura 4.33 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 850 m/min (fim da vida da ferramenta)	97
Figura 4.34 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de metal duro e velocidade de corte de 850 m/min	99
Figura 4.35 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de cerâmica com cobertura e velocidade de corte de 680 m/min (fim da vida da ferramenta)	99
Figura 4.36 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de cerâmica com cobertura e velocidade de corte de 680 m/min	100
Figura 4.37 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de cerâmica com cobertura e velocidade de corte de 850 m/min (fim da vida da ferramenta)	101
Figura 4.38 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de cerâmica com cobertura e velocidade de corte de 850 m/min	102

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Percentual dos elementos químicos no ferro fundido cinzento (CHIAVERINI, 1986)	7
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas e físicas de ligas típicas de ferro fundido vermicular comparado com o cinzento e nodular (SAHM et al., 2002)	12
Tabela 2.3 - Intervalos típicos de composição química do ferro fundido vermicular para nodularidade de 0 a 20% (SINTERCAST, 2001)	13
Tabela 2.4 - Descrição técnica das pastilhas de metal duro utilizadas no teste de usinagem (WALTER AG, 1997)	20
Tabela 2.5 - Características das ferramentas de corte e dados de corte	27
Tabela 2.6 - Características da microestrutura dos corpos de prova	28
Tabela 2.7 - Composição química do Metal Duro (SANDVIK COROMANT, 2003)	35
Tabela 2.8 - Propriedades relativas dos cerâmicos comparadas com as do metal duro	41
Tabela 3.1 - Composição química do ferro fundido vermicular	53
Tabela 3.2 - Percentual e forma das grafitas e fases presentes na matriz	54
Tabela 3.3 - Dureza Brinell média e desvio padrão dos corpos de prova	54
Tabela 3.4 - Características da camada nACRo [®]	61
Tabela 3.5 - Valores das variáveis de entrada nos ensaios com ferramentas de metal duro	65

Tabela 3.6 - Valores das variáveis de entrada nos ensaios com ferramentas de cerâmica65

Tabela 3.7 - Valores das variáveis de entrada do metal duro e cerâmica com cobertura com
velocidades de corte maiores66

Nomenclaturas

Letras Latinas

a_e	profundidade radial de usinagem	[mm]
a_p	profundidade axial de usinagem	[mm]
f_z	avanço por dente	[mm]
HB	<i>Hardness Brinell</i> – Dureza brinell	[kgf/mm ²]
HV	<i>Hardness Vickers</i> – Dureza Vickers	[kgf/mm ²]
KT	máxima profundidade da cratera	[mm]
KM	distância do centro da cratera em relação a aresta de corte	[mm]
R_z	rugosidade superficial	[μ m]
$R_{m\acute{a}x}$	rugosidade máxima	[μ m]
V_B	desgaste de flanco	[mm]
$V_{B\ max}$	desgaste de flanco máximo	[mm]
v_c	velocidade de corte	[m/min]
v_f	velocidade de avanço	[mm/min]

Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CNC	<i>Computed Numeric Control</i> – Controle Numérico Computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> – Deposição Química a Vapor
DIN	<i>German Institute for Standardization</i>
EDS	<i>Spectroscopy of Dispersive Energy</i> – Espectroscopia de Energia Dispersiva
HSC	<i>High Speed Cutter</i> – Usinagem de Alta Performance
HSM	<i>High Speed Machining</i> – Usinagem com Altas Velocidades
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i> – Deposição Física a Vapor
SAE	Society of Automotive Engineers

Capítulo 1

Introdução

Desenvolvimentos recentes permitiram obter melhores desempenhos, menores emissões de poluentes e operação mais silenciosa no uso de motores diesel. Esses aperfeiçoamentos baseiam-se em maiores pressões e maiores temperaturas de trabalho, que sujeitam os blocos de motores a solicitações que poderiam levar à falha prematura (HECK et al., 2007). Para fazer frente a estes desenvolvimentos, os projetistas de motores precisam buscar novas tecnologias de materiais que suporte estes novos níveis de solicitação, sem aumentar o tamanho de seus componentes (GUESSER et al, 2004).

A escolha natural foi o ferro fundido com grafita compacta. Comparados aos tradicionais ferros fundidos com grafita lamelar (cinzento) atualmente utilizados (GG25, GG26 e outros), os ferros fundidos com grafita compacta (CGI) podem apresentar incrementos de 75% a 100% no limite de resistência mecânica, de 35% a 40% no módulo de elasticidade e o dobro em resistência a fadiga.

Em função das características comentadas acima se pode citar como exemplo, a redução de peso de um bloco de motor tipo *turbocharged* 2,0 L a diesel de 42,8 kg para 29,5 kg. Para um bloco de motor tipo *turbocharged* 2,0 L a gasolina, o peso do bloco foi reduzido de 38,5 kg para 28,5 kg. Sendo assim, o CGI irá atender não somente as demandas atuais como a projetos futuros de motores a gasolina e principalmente motores a diesel.

A motivação principal deste trabalho é encontrar uma melhor faixa de atuação da ferramenta de corte, seja no tocante à geometria de corte ou no tocante à cobertura ou material de corte visando a redução do custo por peça da operação. Dentre todas as operações de usinagem de

um bloco de motor, a usinagem em acabamento da face do fogo é uma das operações mais críticas e com custo elevado. Entre as principais dificuldades podemos citar:

- Vida da ferramenta de corte: Diferentemente da usinagem de ferro fundido cinzento, o ferro fundido vermicular (CGI) e suas características mecânicas e físicas tem usinabilidade inferior. Assim, o número de troca da ferramenta de corte é mais elevado, acrescentando não somente o custo do material de corte, mas também o custo de zeramento e, principalmente, o de máquina parada, reduzindo a capacidade de produção.

- Rugosidade e planeza: Devido à baixa usinabilidade do material e consequentemente a baixa vida da ferramenta, rapidamente têm-se o aumento da rugosidade e planeza da peça, abreviando assim ainda mais a vida da ferramenta. Outros fatores importantes para uma suposta melhoria da rugosidade e planicidade são melhorar a rigidez do sistema de fixação da peça e ferramenta, assim como o método de programação do percurso a ser usinado (entrada e saída da peça com avanços por dente reduzido para evitar possíveis vibrações).

- Produtividade horária e número de máquinas: Em função de diferentes características entre o ferro fundido cinzento e CGI, não é possível usinar o vermicular com os mesmos parâmetros de corte que são utilizados nos processos com ferro fundido cinzento. Assim, as condições de corte são reduzidas e temos o aumento do tempo total para a usinagem do bloco de motor. Com a crescente demanda de produção deste tipo de ferro fundido, investimentos em máquinas são necessários para aumentar a capacidade de produção e consequentemente, o aumento de espaço físico (estrutura da empresa) e mão de obra também são influenciados. Empresas que detêm a tecnologia para a usinagem do vermicular buscam alternativas em métodos e ferramentas de corte para evitar o aumento do número de máquinas e a redução dos tempos e custos de usinagem.

Sendo assim este trabalho visa analisar a influência da micro geometria da aresta de corte (testou-se geometria lisa e positiva), do material da ferramenta (testou-se metal duro, cerâmica a base de nitreto de silício com e sem coberturas) e da velocidade de corte na vida da ferramenta, na rugosidade da peça e no potência de corte no fresamento de uma superfície similar à usada na face de fogo do bloco do motor de ferro fundido vermicular.

Para isto, construiu-se este trabalho com as seguintes partes:

Capítulo 1 – Introdução;

Capítulo 2 – Ferro fundido vermicular – focando em suas propriedades e nas consequências que estas propriedades trazem à usinagem deste material

Capítulo 3 - Materiais, equipamentos e procedimento experimental

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Capítulo 2

Ferro fundido vermicular - CGI

2.1 - A história do Motor Diesel

Construir um motor que utilizasse totalmente a energia do combustível era a idéia de Rudolf Diesel, o criador do motor que leva seu nome, desde os tempos em que cursava universidade no final do século XIX, em Munique na Alemanha.

Depois de desenvolver vários projetos, Diesel conseguiu patentear sua idéia em 22 de fevereiro de 1893. Após correções e ajustes o motor foi oficialmente apresentado ao mercado em 1898, com 10 cv de potência. Rapidamente o motor ficou conhecido e começou a ser fabricado em toda Alemanha, sendo as primeiras aplicações feitas em fábricas geradoras de energia. Uma das primeiras empresas a produzir o motor a diesel estacionário foi a Benz & Cia., que anos mais tarde se dividiria em duas, formando a MWM (Motoren Werke Mannheim AG), que ficou com a produção de motores estacionários de grande porte, e a Daimler-Benz AG, para a fabricação de pequenos motores para automóveis (BOULANGER, 1977).

O motor é um equipamento que transforma alguma forma de energia, seja ela térmica, hidráulica, elétrica, nuclear etc..., em energia mecânica. Conforme o tipo de energia que transforma, ele é classificado em motor de combustão, hidráulico, elétrico ou atômico (BOULANGER, 1977). O motor a diesel aproveita a energia da queima do combustível dentro de uma série de câmaras e por isso é classificado como de combustão interna.

2.2 - Bloco do Motor Diesel

O bloco de motor (figura 2.1) é considerado o elemento estrutural mais importante e um dos mais complexos do motor (BOFF, 2003). É nos cilindros, parte integrante de sua estrutura, que acontece a compressão e explosão da mistura ar-combustível, necessária para a produção de energia pelo motor. Localizado entre o cárter e o cabeçote, o bloco aloja, entre outros, o virabrequim, os pistões e as bielas. A função destes componentes é transformar a energia térmica gerada durante a combustão em energia mecânica, gerada com o deslocamento do pistão (devido ao aumento de pressão no cilindro). Este trabalho é transformado em torque útil pelo virabrequim e está disponível no eixo do motor.

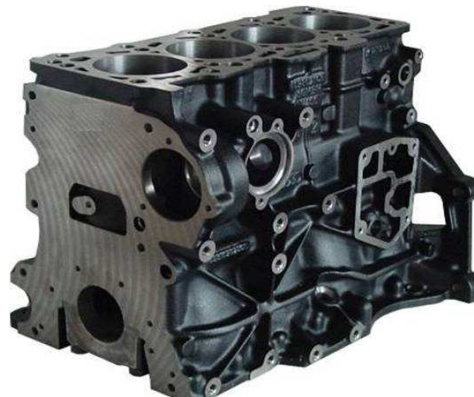


Figura 2.1 - Bloco do motor quatro cilindros (MWM, 2007).

Dentre as principais partes de um bloco de motor está a face de fogo (figura 2.2). Ela é a face de junção do bloco com o cabeçote. As juntas que são colocadas entre a face do fogo do bloco e do cabeçote, pode ser de cobre, alumínio ou papelão normalmente composto por folhas prensadas, cuja função é auxiliar na vedação. As juntas precisam resistir a altas temperaturas por um longo período de tempo e serem suficientemente elásticas para que possam compensar qualquer irregularidade das superfícies intermediadas (TRAINING BOOK MWM MOTORES, 2006).



Figura 2.2 - Face do bloco de motor seis cilindros (DAIMLER AG, 2006).

Esta superfície do bloco será o objeto de estudo deste trabalho. Como pode ser visto na figura 2.2, sua usinagem apresenta uma dificuldade adicional que é o número de interrupções da superfície que geram choques entre ferramenta e peça.

2.3 - Materiais para fabricação dos blocos de motor a Diesel

A tecnologia de ferros fundidos tem recebido continuamente importantes desenvolvimentos, tanto nos processos de fabricação como em materiais. Estes desenvolvimentos são resultantes das necessidades do mercado referentes à aplicação ou a redução de custos, que trazem como consequência a necessidade de uma atualização tecnológica de um material de muita tradição na indústria automobilística, que é o ferro fundido.

Segundo Guesser (1997) as principais características desejáveis a um material para a fabricação de um bloco de motor são:

- Elevada resistência mecânica
- Boa condutividade térmica
- Tenacidade
- Ductilidade
- Capacidade de amortecimento de vibrações

Atualmente, os materiais disponíveis para fabricação de blocos são: ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular e ligas de alumínio.

Considera-se ferro fundido a liga ferrosa com teor de carbono acima de, aproximadamente, 2%. Face à influência do silício nesta liga, 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 (CHIAVERINI, 1986).

De acordo com Chiaverini (1986), os ferros fundidos mais conhecidos e utilizados podem ser divididos em cinco grupos principais brancos, cinzentos, maleáveis, nodulares e vermiculares. Devido aos requisitos do projeto, para a obtenção de blocos de motores utilizam-se apenas os ferros fundidos cinzentos e, mais recentemente, os ferros fundidos vermiculares.

2.3.1 - Ferro Fundido Cinzento

O ferro fundido cinzento é uma liga Fe-C-Si. É empregado em larga escala pelas suas propriedades de fundição e baixo custo relativo. Possuem características como a fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, excelente usinabilidade, boa resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento (COLPAERT, 1974).

A faixa de composição do ferro fundido cinzento está compreendida entre os seguintes teores, conforme tabela 2.1.

Elemento Químico	Percentual (%)
Carbono (C)	2,5 a 4,0
Silício (Si)	1,2 a 3,0
Manganês (Mn)	0,3 a 1,0
Fósforo (P)	0,1 a 1,0
Enxofre (S)	0,05 a 0,25

Tabela 2.1 - Percentual dos elementos químicos no ferro fundido Cinzento (CHIAVERINI, 1986).

Por apresentarem fratura de cor cinza, denominam-se, classicamente, ferros fundidos cinzentos. Possuem a grafita na forma lamelar interconectada (figura 2.3) e isto lhes garante boa condutividade térmica, já que a grafita é um bom condutor térmico (GEORGIU, 2002).

Entretanto, a grafita disposta desta forma reduz a resistência mecânica, a ductilidade e também a tenacidade do material, pois provoca descontinuidades na matriz, assim como efeitos de entalhe. De acordo com Georgiou (2002), o ferro fundido cinzento é de fácil usinabilidade devido à baixa resistência à fadiga, a excelente condutividade térmica e também devido ao fato de ser extremamente frágil, o que possibilita a formação de cavacos curtos.

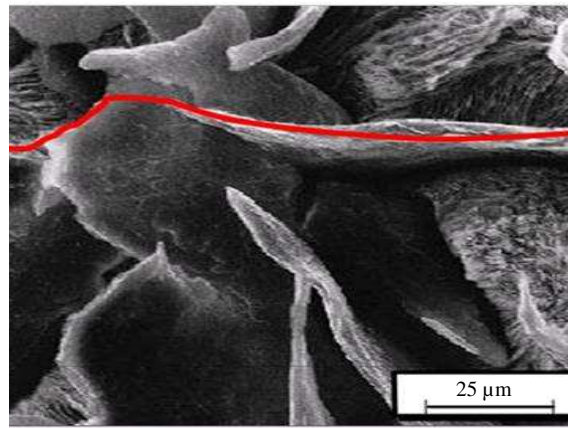


Figura 2.3 - Micrografia óptica do ferro fundido vermicular atacada com nital e sentido de usinagem da ferramenta de corte (GEORGIOU, 2002)

Os ferros fundidos cinzentos são classificados pelas letras FC (ABNT) ou GG (DIN), seguidas de seu limite de resistência à tração (Mpa ou bar), por exemplo: FC-250 ou GG25.

2.3.2 - Ferro Fundido Vermicular – CGI

O ferro fundido vermicular é um material com propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular (SAHM et al., 2002). Como no ferro fundido cinzento, as partículas da grafita do ferro fundido vermicular são planas, alongadas, orientadas aleatoriamente e interconectadas, diferentemente das grafitas do ferro fundido nodular em que elas se apresentam em formas de nódulos (WARRICK et al., 1999).

Contudo, conforme pode ser visto na figura 2.4.b, os vermículos são similares aos nódulos do ferro fundido nodular (figura 2.4.c), pois ambos são muito menores do que as lamelas de grafita do ferro fundido cinzento. Por outro lado a morfologia das grafitas do CGI é compacta e

com extremidades arredondadas, o que torna a nucleação e propagação de trincas muito mais difícil que no caso de ferros com grafita lamelar. Já o ferro fundido cinzento apresenta grafitas na forma de lamelas, com cantos agudos e superfícies lisas (figura 2.4.a). Suas grafitas são interconectadas e sem orientação preferencial, formando uma rede quase contínua (LÖHE, 2005).

O CGI possui boas características de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência a choques térmicos, amortecimento e condutividade térmica (MOCELLIN et al., 2004).

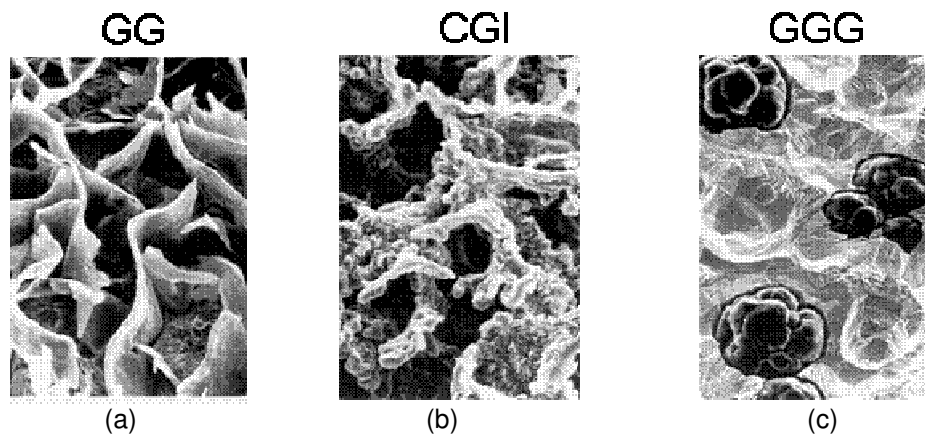


Figura 2.4 - Forma espacial dos tipos de grafitas dos ferros fundidos. (a) Ferro fundido cinzento. (b) Ferro fundido vermicular. c) Ferro fundido nodular.

Com relação ao ferro fundido cinzento, o ferro fundido vermicular oferece as seguintes vantagens (DAWSON, 2002):

- Redução de espessuras de parede para um mesmo carregamento;
- Redução do fator de segurança devido à menor variação das propriedades do fundido;
- Redução de fraturas frágeis na manufatura, montagem e serviço, devido à maior ductilidade;
- Maior resistência, sem a necessidade de recorrer a elementos de liga;
- Menor profundidade de rosca necessária, portanto, parafusos menores podem ser utilizados;

Ainda segundo Dawson, quando comparado ao ferro fundido nodular, as vantagens são:

- Melhor produção de peças complexas fundidas;
- Redução nas tensões residuais, devido à maior condutividade térmica e ao módulo de elasticidade menor;
- Melhor transferência de calor;
- Melhor usinabilidade;

A cada dia têm aumentado a participação do CGI no setor automotivo, mostrando sua eficiência para diversos componentes como bloco de motores, cabeçote, coletor e disco de freios, que são tradicionalmente produzidos de ferro fundido cinzento (GUESSER e GUEDES, 1997).

A produção de bloco de motores a diesel de CGI vem aumentando devido à melhor característica de combustão e desempenho do ferro fundido vermicular, quando comparado com o ferro fundido cinzento. O CGI também apresenta uma melhor resistência mecânica (GUESSER et al., 2001) e assim altas pressões são possíveis nos motores de câmara de combustão. O único inconveniente para a utilização do CGI é a sua usinabilidade, quando comparado com o ferro fundido cinzento, gerando altos custos de produção (MOCELLIN et al., 2004).

2.4 - Processo de Produção do CGI

Parte fundamental do controle de qualidade do processo de produção do CGI está ligada ao “*know-how*” para o controle de maneira precisa do metal líquido antes do vazamento das peças. No processo Sintercast adotado pela Fundição Tupy, o controle é baseado na análise térmica durante a solidificação da liga após o tratamento inicial com magnésio. Esta análise sintetiza o efeito combinado de todas as variáveis do processo, incluindo as matérias primas, as práticas de fusão e manutenção do banho, as diferenças de operação e os rendimentos das adições de magnésio (GUESSER, 2002).

Ainda segundo Guesser (2002), a adição de magnésio é intencionalmente baixa, de maneira que a análise térmica é sempre determinada pela quantidade adicional de tratamento necessária para chegar à formação da grafita compactada. Amostras são retiradas do metal durante a solidificação e são analisadas. Assim adições complementares de magnésio são feitas automaticamente por meio de um alimentador de fio magnético metálico.

A vermicularização da grafita deve-se à ação do magnésio, que é um elemento nodularizante, em um teor ativo entre 0,01 e 0,02% (GUESSER et al., 2005).

A definição técnica desta liga é dada pelas normas *American Society for Testing Materials* (ASTM) A842-85, *Japanese Industrial Standards* (JIS) G5502, norma DIN GJV e *International Organization for Standardization* (ISO) - 945-1975 que classificam a liga pelo tipo e forma da grafita. Mas, de uma maneira geral, pode-se classificar o CGI de alta qualidade como uma liga que apresenta partículas de vermículos com menos de 20% de nódulos e ausência de grafitas na forma de lamelas (AMERICAN FOUNDRY SOCIETY, 2001).

O típico CGI, do ponto de vista químico, não apresenta nenhuma diferença significativa dos ferros fundidos cinzento e nodular. Cada um contém cerca de 94% de ferro (Fe), 3% de carbono (C), 2,5% de silício (Si) e o restante é dividido entre elementos de liga e residuais (DAWSON, 1993). As diferenças entre essas ligas são creditadas aos tipos de morfologias das suas grafitas, que conferem propriedades físicas e mecânicas distintas a cada uma delas.

2.4.1 - Influência das grafitas

No ferro fundido cinzento (figura 2.4.a), as grafitas por possuírem alta condutividade térmica, da ordem de aproximadamente 3-5 vezes maior que a do ferro puro, garante ao material uma boa condutividade térmica (ABELE, SAHM E SCHULZ, 2002). Devido à orientação, proporcionam também uma excelente capacidade de amortecimento de vibrações. Isto se deve ao caminho que as ondas sonoras realizam ao se propagarem através do ferro, refletindo-se na superfície das grafitas e sendo enfraquecida pela sua transformação em calor. Deste modo, ao mesmo tempo em que se têm vantagens em razão da forma e orientação das grafitas na matriz, têm-se desvantagens com a redução da resistência mecânica, da ductilidade e da tenacidade do

material. Isto é causado pelas descontinuidades provocadas na matriz pelos cantos agudos das grafitas, que agem como pontos de concentração de tensões e planos de propagação de trincas (DAWSON, 1993).

No ferro fundido nodular (figura 2.4.c), as grafitas se apresentam na forma de nódulos, não gerando descontinuidades na matriz, o que ocasiona menor concentração de tensões. Esta disposição das grafitas confere ao material um aumento da sua resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, em relação ao ferro cinzento. Como desvantagens, pode se citar: menor condutividade térmica da liga, em virtude das grafitas não se mostrarem interconectadas; menor capacidade de amortecimento e pior usinabilidade quando comparado com o ferro fundido cinzento e o CGI.

A fase da grafita no ferro fundido vermicular aparece na forma de verme ou de partículas vermiculares (figura 2.4.b). Essas partículas são alongadas e orientadas aleatoriamente como no ferro fundido cinzento, porém são mais curtas, mais grossas, e de bordas arredondadas, o que confere propriedades superiores como: boa resistência mecânica, tenacidade e resistência a choques térmicos, amortecimento e condutividade térmica. A sua micro estrutura resulta em uma adesão mais forte entre a grafita e a matriz de ferro inibindo assim a iniciação e o crescimento de trincas e garantindo com isso propriedades mecânicas superiores (GUESSER et al., 2007). Além disso, observa-se que a superfície da grafita vermicular apresenta imperfeições, as quais aliadas à morfologia complexa (também conhecida como “coral”) resultam em adesão ainda mais forte com a matriz de ferro.

Na tabela 2.2. são apresentadas às propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular, comparadas ao ferro fundido cinzento e nodular.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas e físicas de ligas típicas de ferro fundido vermicular comparado com o cinzento e nodular (SAHM et al., 2002).

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração (Mpa)	235	500	650
Módulo de elasticidade (Gpa)	110	140	165
Resistência à fadiga (Mpa)	100	205	265
Condutividade térmica [W/(mK)]	48	35	28
Dureza [HB]	200	225	270
Limite de escoamento 0,2% (N/mm ²)	160	380	425

Na tabela 2.3 são apresentadas as composições químicas típicas para ligas de CGI com nodularidade de 0 a 20%. Segundo a Empresa Sintercast (2001), a especificação da composição química está ligada às propriedades mecânicas. Em outras palavras, ela será variável conforme a aplicação do produto e suas exigências.

Tabela 2.3 - Intervalos típicos de composição química do ferro fundido vermicular para nodularidade de 0 a 20% (SINTERCAST, 2001).

Estrutura da Matriz	Análise Química (%)								
	C	Si	Ce	Mn	S	Mg	CeMM	Cu	Sn
70% de Perlita	3,6	2,1	4,4	0,2	0,005	0,006	0,01	0,3	0,03
	3,8	2,5	4,7	0,4	0,022	0,014	0,03	0,6	0,05
100% de Perlita	3,6	2,1	4,4	0,2	0,005	0,006	0,01	0,6	0,08
	3,8	2,5	4,7	0,4	0,022	0,014	0,03	0,9	0,10

2.5 - Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular - CGI

Como já citado, o ferro fundido vermicular com sua maior resistência mecânica e dureza e menor condutibilidade térmica, significou um aumento de desempenho dos motores cujos blocos são produzidos com esta liga. Porém, estas propriedades também causam maior custo de usinagem quando comparado com o ferro fundido cinzento.

A maior resistência à tração, aliada à forma da grafita, explica em parte a pior usinabilidade do ferro fundido vermicular, quando comparada com o ferro fundido cinzento.

Atualmente, um dos maiores desafios é introduzir o CGI nas peças cujos processos de usinagem apresentam desempenho muito bom quando tais peças são fabricadas de ferro cinzento. Neste caso, busca-se alcançar o mesmo desempenho das ferramentas, mantendo os mesmos custos por peça trabalhada e evitando investimento adicional de capital em máquinas e ferramentas de corte (VASILASH, 2009).

Em altas velocidades de corte, a vida útil da ferramenta também tende a ser menor no vermicular quando comparado com o ferro fundido cinzento (WALTER AG, 2007). Este processo é devido a não formação da camada protetora de sulfeto de manganês que reduz o coeficiente de atrito na face da ferramenta e que age como uma barreira contra o desgaste por difusão. Esta camada ocorre na usinagem do ferro cinzento.

Dawson et al. (1999), classificaram as variáveis importantes relacionadas à usinabilidade do CGI, conforme abaixo:

- Efeitos da forma da grafita;
- Efeitos da perlita;
- Efeitos dos elementos químicos (S, Si, Ti, Cr);

2.5.1 - Efeitos da forma da grafita

As grafitas lamelares apresentam superfícies com poucas irregularidades, quando comparadas às grafitas vermiculares e promovem o início de fratura e sua propagação, fazendo que o ferro fundido cinzento se torne frágil. Já a morfologia do ferro fundido vermicular não permite a clivagem e nem a propagação de trincas. O início da fratura no ferro fundido vermicular se dá na interface da grafita vermicular com a matriz metálica. Este é um dos principais fatores para um maior desgaste da ferramenta de corte na usinagem do CGI. Porém, esta característica auxilia na maior resistência mecânica e maior tenacidade do CGI (DAWSON et al., 2001).

Segundo Coehn et al. (2000), o mecanismo da formação do cavaco para o ferro fundido cinzento é mostrado na figura 2.5. No início, a ferramenta comprime o material que cria uma fratura, que se propaga adiante e abaixo da aresta de corte (a). O movimento da aresta de corte prossegue e o fragmento do material é completamente arrancado (b). Para algumas situações, especialmente com ferro cinzento, uma parte de material é arrancada para fora da ferramenta, perdendo temporariamente o contato entre peça e ferramenta, até a próxima formação de cavaco (c). O desprendimento do material contribui para a aspereza de superfície da peça (d).

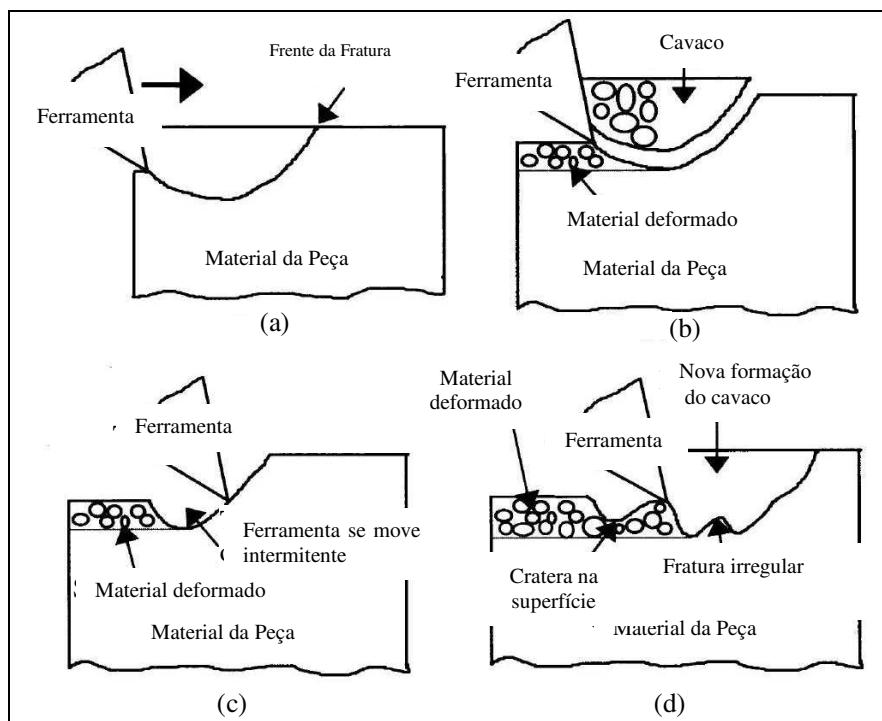


Figura 2.5 - Seqüência da formação de cavaco no ferro fundido cinzento (COHEN et al., 2000).

Grafitas na forma nodular sempre estarão presentes na estrutura do ferro fundido vermicular. Com isto a resistência mecânica e a tenacidade aumentam. Por outro lado, a fundição, usinabilidade e condutividade térmica serão prejudicadas (GUESSER, SCHROEDER E DAWSON, 2001). Sendo assim a microestrutura deve ser cuidadosamente especificada conforme exigência de desempenho do produto final e custos de produção

A grafita, por ser um componente de dureza relativamente baixa se comparada com os constituintes da matriz, produz descontinuidades no material, facilitando a quebra do cavaco na usinagem (GUEDES et al., 1987). A grafita também atua como um agente lubrificante, reduzindo o atrito entre a peça e a ferramentas além de reduzir o risco de micro solda do cavaco com a ferramenta.

2.5.2 - Efeitos da Perlita

Os ferros fundidos são formados por partículas de grafita em uma matriz ferrítica ou perlítica. Durante a solidificação o material passa por uma faixa de temperatura na qual se encontra sob a forma austenítica. Abaixo de 725°C o material se transforma em ferrita ou perlita.

Se a velocidade de resfriamento é lenta o suficiente e as condições químicas são favoráveis, os átomos de carbono saem da matriz para formar grafitas e a matriz se torna preferencialmente ferrítica. Entretanto, se os átomos não conseguirem sair da matriz ocorrerá a formação de perlita. A perlita é constituída por uma estrutura lamelar alternada entre ferrita e cementita (Fe_3C). Essas lamelas de Fe_3C reforçam a matriz tornando-as mais dura e resistente (MOCELLIN, 2002). A razão perlita/ferrita é outro fator determinante na resistência mecânica do material. Um aumento de 15% para a razão de 95% de perlita no ferro fundido vermicular mantendo as demais variáveis inalteradas, induz a um aumento de tensão de limite de resistência de 300 Mpa para 480 Mpa refletindo na usinagem.

Blocos de motor em ferro fundido vermicular contendo 70% de perlita em sua matriz possuem a mesma dureza de um bloco em ferro fundido cinzento 100% perlítico (DAWSON et al., 1999).

A maior ou menor quantidade de perlita influencia a usinabilidade do ferro fundido, fato este estudado por Dawson através de fresamento (DAWSON, 2001) e torneamento (DAWSON, 1999) do ferro vermicular contendo de 50 a 95% de perlita em sua matriz. Os resultados mostraram que, em geral, a vida da ferramenta no fresamento cresce com o aumento do conteúdo de perlita. Isto, provavelmente, porque os elementos perlitizantes propiciam boa deformação e fácil clivagem e formação do cavaco em cortes interrompidos.

Nos testes de torneamento o cobre (Cu) e o estanho (Sn) foram usados como elementos estabilizantes. A fim de alcançar 100% de perlita, o manganês também foi adicionado. Os testes foram realizados com ferramentas de metal duro, com velocidades do corte entre 150 e 250 m/min (figura 2.6). Para a escala da perlita entre 70% e 97.5%, com v_c de 150m/min, a vida da ferramenta mostrou-se de forma inesperada maior em 75% de perlita.

A vida da ferramenta usada para a liga com manganês (perlita 100%) caiu drasticamente com relação ao que ocorreu com teor de 97,5%, independente da velocidade de corte (figura 2.6). Isto não é devido ao aumento de 2,5% no teor de Mn, mas às mudanças da micro dureza da ferrita e das outras variações da microestrutura (DAWSON et al., 1999).

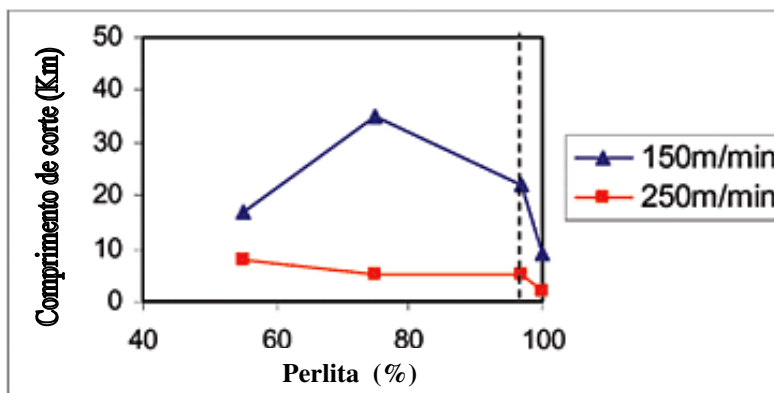


Figura 2.6 - Influência da perlita na usinagem do CGI (DAWSON et al., 1999).

2.5.3 - Nodularidade

Basicamente a forma da grafita, o teor de carbono e a perlita nos ferros fundidos tem sido de fundamental importância para determinar as propriedades mecânicas e físicas dos fundidos. As propriedades do CGI diminuem cerca de 20-25% com o aparecimento da grafita lamelar na estrutura e aumentam gradualmente quando a nodularidade excede 20%. Com o excesso de nodularidade, a condutividade térmica e usinabilidade são reduzidas e também o processo de fundição se torna mais difícil.

A microestrutura dos ferros fundidos é influenciada pela velocidade de resfriamento, observando-se maiores porcentagem de nódulos em seções que resfriam rapidamente. Em peças complexas como bloco e cabeçotes, as velocidades de resfriamento de diferentes partes das peças dependem não só das espessuras de paredes, como também do modo como o metal preenche a peça.

Para a maioria dos blocos, as velocidades de resfriamento das paredes com espessuras a partir de cinco milímetros são suficientemente baixas para manter a taxa de nodularidade dentro da faixa de 0% a 20%. Espessuras menores, que resultam nodularidades na faixa de 30 a 50%, geralmente ficam restritas a paredes externas, aletas, não sendo prejudicial à fundibilidade ou ao desempenho (ANDRADE, 2005).

2.5.4 - Influência dos elementos químicos

Os principais elementos químicos da composição do CGI, bem como suas influências na usinabilidade estão a seguir:

a) Enxofre (S)

O menor teor de enxofre tem fundamental importância na menor usinabilidade do ferro fundido vermicular em relação ao cinzento. O teor deste elemento no ferro cinzento situa-se entre 0,08 a 0,12%. Já no vermicular ele se encontra no intervalo de 0,005 a 0,025%, pois as grafitas compactas são estáveis somente em baixos teores de oxigênio e enxofre (CHIAVERINI, 1986).

O enxofre presente no ferro cinzento reage com o manganês (Mn), formando inclusões de MnS_2 , as quais podem lubrificar as arestas da ferramenta ao formar uma camada protetora entre esta e o material usinado, servindo como barreira contra os mecanismos de abrasão e difusão (MOCELLIN et al., 2004). O CGI, entretanto, não apresenta a formação de tal camada, visto que, além de possuir praticamente um décimo do teor de enxofre do ferro cinzento, o magnésio (Mg), adicionado como elemento necessário para a formação das grafitas compactas, possui mais afinidade química com o S do que o Mn. Consequentemente há a formação do sulfeto de magnésio em detrimento da formação do sulfeto de manganês, não havendo daí a formação da camada protetora.

b) Silício (Si)

O silício, que é formador de ferrita e, consequentemente, grafita, apresenta teor de até 3% na estrutura, melhora a usinabilidade do material. Entretanto, acima do percentual citado o silício tende a endurecer a ferrita por solução sólida, apresentando neste sentido queda da usinabilidade (DAWSON et al., 2001).

c) Titânio (Ti)

O titânio está presente nos ferros fundidos em teores variando de 0,005 a 0,02%. Na quantidade em torno de 0,01% pode formar carbonetos de dureza maior do que certos materiais de corte, como por exemplo, o carboneto de tungstênio, ao reagir com o carbono e com o nitrogênio presentes no ferro líquido (MOCELLIN et al., 2001).

d) Cromo (Cr)

Presente no ferro através da sucata de aço ou intencionalmente como elemento de liga para obtenção de maior resistência em altas temperaturas. Segrega-se facilmente promovendo a formação de carbonetos, principalmente nas últimas regiões em solidificação (DAWSON et al, 2001). O cromo é um perlitizante potente, quando comparado ao manganês, pois o aumento do seu teor provoca a formação da perlita fina, ou seja, um aumento da quantidade de cementita, que é de difícil usinabilidade. Dawson et al (2001) afirmaram ainda que a redução de 0,18 para 0,10% do teor de Cr no ferro fundido vermicular pode propiciar aumento de aproximadamente 40% da vida da ferramenta.

2.5.5 - Dificuldades na usinagem do bloco de motor

O ferro fundido vermicular inclui invariavelmente partículas esferoidais de grafita nodular. Enquanto a nodularidade aumenta, aumentam também as forças de corte e a rigidez, diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica (WEBER, 2005). Além disso, com o aumento da nodularidade a resistência do material também é elevada influenciando diretamente na usinabilidade. (DAWSON, 2004).

Assim, no processo de usinagem das partes do bloco de motor, o processo de fresamento é de fundamental importância, principalmente no fresamento da face do fogo (figura 2.2). Esta face requer elevado grau de acabamento (R_z), assim como precisão geométrica de forma e posição, porque é acoplada a outros componentes, com o objetivo de evitar vazamento de óleo do bloco do motor.

Um fator que dificulta a usinagem desta parte do bloco é o grande número de interrupções na superfície devido às nervuras e bolachas para reforço da estrutura do bloco, assim como devido aos furos do cilindro e demais furações de refrigeração e fixação do cabeçote, além de alívios de peso. Cuidados especiais são levados em conta na escolha da fresa, pois fresas muito positivas reduzem o esforço de corte da usinagem, reduzindo a tendência ao lascamento das bordas da superfície, porém têm uma vida relativamente baixa, quando comparada às fresas com geometria da aresta de corte negativa devido à pouca resistência ao impacto.

Na usinagem de ferro fundido, um dos fatores que determinam o fim de vida de uma fresa é o lascamento de borda da superfície usinada, que é influenciado pelo aumento do desgaste frontal na aresta principal de corte da ferramenta e esforços de corte. Para se minimizar esta ocorrência, é necessário que se utilize avanço por dente pequeno. Sendo assim, as fresas de passo fino são indicadas para desbaste e acabamento nestas partes do bloco, que permitem grandes velocidades de avanço, mesmo com um pequeno avanço por dente, proporcionando uma economia grande no tempo de corte (SANDVIK COROMANT, 2003).

Porém, o uso de fresas de passo fino e de geometrias negativas da fresa é limitado pela falta de estabilidade da peça, máquina e dispositivo, fazendo com que este tipo de fresas gerem elevados esforços de corte, causando irregularidade dimensionais na superfície a ser usinada.

2.6 - Processo de usinagem por fresamento no CGI

A empresa Walter AG (1997), fabricante de ferramentas de corte realizou diversos testes de usinabilidade do CGI nas operações de fresamento. Os testes foram realizados com fresa de facear de diâmetro 200 mm e 1 aresta de corte (Z). A fresa possuía ângulo de posição de 75° e ângulo efetivo de saída de 5°.

Para a pastilha tipo SPMW120408-A57, diferentes tamanhos de grão de metal duro foram utilizados, assim como diferentes espessuras de cobertura, sendo classificadas como cobertura bicolor. As superfícies da pastilha têm a coloração preta do óxido de alumínio, e as superfícies de folga têm a cor amarela do nitreto de titânio, conforme mostra a tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Descrição técnica das pastilhas de metal duro utilizadas no teste de usinagem (WALTER, 1997).

Teste	Tamanho de grão	Classe Metal Duro	Cobertura CVD	Esp. da cobertura
1	1,0 a 1,3 μm (fino)	K15-1	TiCN+Al ₂ O ₃ + (TiN)	16 μm
2	0,5 a 0,9 μm (extra fino)	K15-2	TiCN+ Al ₂ O ₃ + (TiN)	16 μm
3	1,0 a 1,3 μm (fino)	K25	TiCN+ Al ₂ O ₃ + (TiN)	10 μm
4	1,4 a 2,0 μm (médio)	K25	TiCN+ Al ₂ O ₃ + (TiN)	10 μm

A figura 2.7 apresenta uma referência básica sobre o tamanho de grão utilizado nas pastilhas de metal duro para os testes.

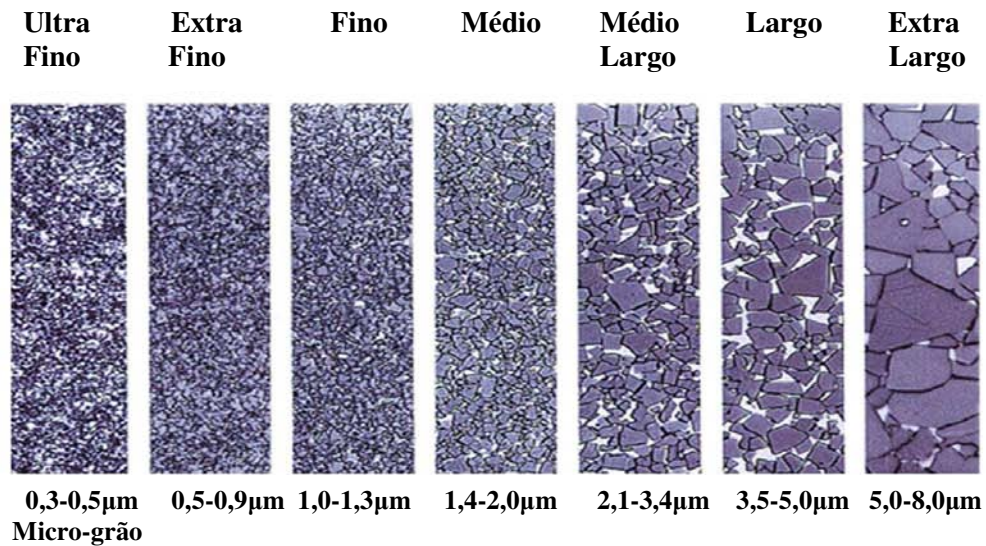


Figura 2.7 - Granulometria do metal duro utilizado para fabricação das pastilhas realizadas nos testes (WALTER AG, 1997)

A estrutura do CGI a ser usinado no teste é de 98% de perlita e dureza média de 230 HB. Os testes foram realizados sem refrigeração.

A figura 2.8 mostra a influência da velocidade de corte na vida da ferramenta. Com o aumento da velocidade de corte a vida da ferramenta cai rapidamente, principalmente entre as velocidades de 140 e 220 m/min.

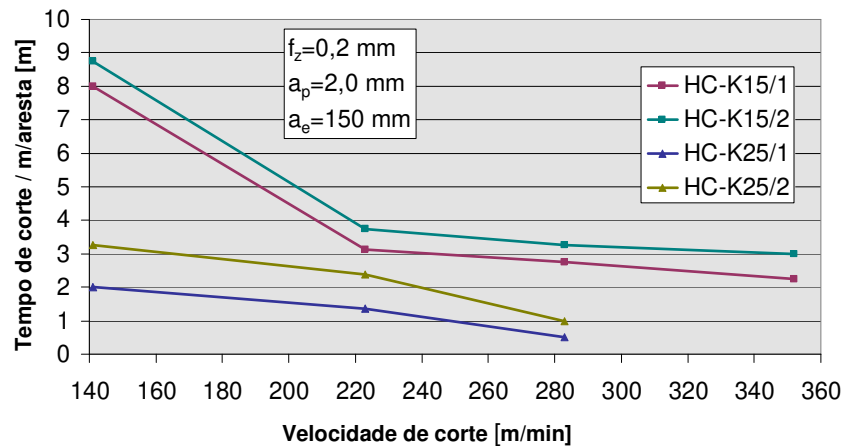


Figura 2.8 - Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta (WALTER AG, 1997)

Para velocidade de corte acima de 280 m/min, a vida útil para as classes de metal duro HC-K25, foram muito baixas e deixaram de ser acompanhadas.

A figura 2.9 mostra a evolução dos desgastes nas pastilhas, de acordo com as suas respectivas classes de metal duro e comprimento usinado com velocidade de corte de 280 m/min.

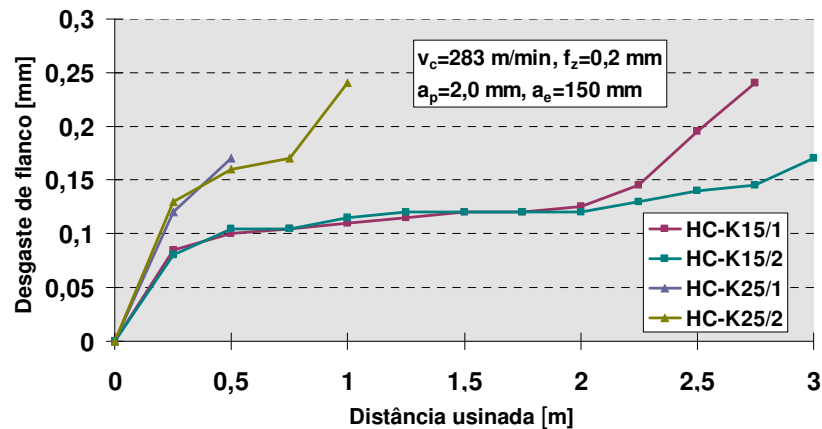


Figura 2.9 - Evolução do desgaste de flanco com aumento do comprimento usinado (WALTER AG, 1997)

A pastilha HC-K15-2 cujo substrato apresenta tamanho de grão entre 0,5 e 0,9 μm , apresentou uma melhor desempenho quando comparado com as demais pastilhas. Isso se deu

devido ao menor tamanho de grão de metal duro, o que proporciona maior dureza e tenacidade ao mesmo.

A figura 2.10 mostra os desgastes e avarias nas pastilhas em função do comprimento de corte. Na figura 2-10.a vê-se que a pastilha K15-1 apresentou desgaste frontal uniforme da aresta principal de corte com um comprimento de usinagem de corte de 2,7 metros. Já a pastilha K15-2 (figura 2.10.b) que apresentou o melhor desempenho dentre todas as ferramentas, usinou 3,0 metros e atingindo um desgaste de flanco V_B menor que a anterior. Porém, nota-se uma pequena lasca na aresta de corte.

As pastilhas K25-1 e K25-2 (figuras 2.10.c e 2.10.d), devido à baixa dureza do substrato de metal duro, apresentaram desgastes excessivos na aresta de corte com menos de 1 metro linear usinado. É possível verificar a presença de avaria por deformação plástica na figura 2.10.d, gerada em função da alta velocidade de corte na aresta de corte.

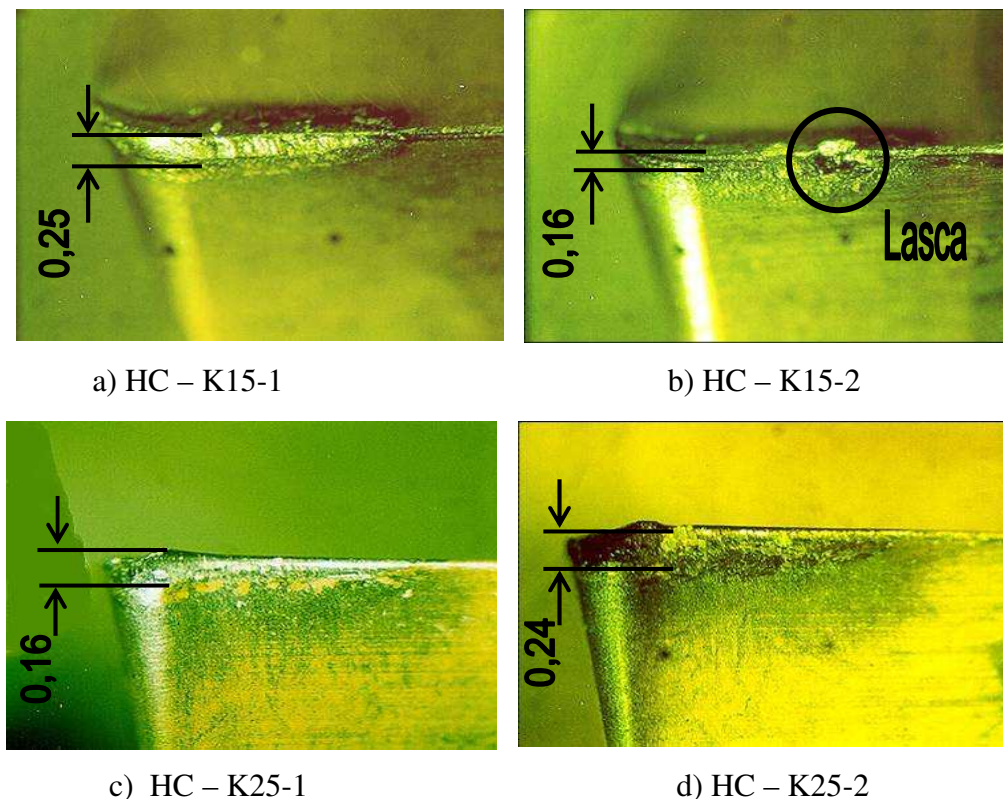


Figura 2.10 - Desgastes nas pastilhas de metal duro com ampliação de 20 X (WALTER AG, 1997).

A figura 2.11 compara a vida da ferramenta em comprimento de corte na usinagem do CGI e do GG25 com velocidade de corte de 352 m/min. O critério para o final da vida foi em função do desgaste de flanco. Nota-se que a classe de metal HC-K15-2, cujo substrato é extra fino, obteve melhor desempenho também na usinagem do ferro fundido cinzento (GG25). Além disso, a vida da ferramenta que usinou o ferro cinzento foi cerca de quatro vezes maior que a da ferramenta usada no CGI.

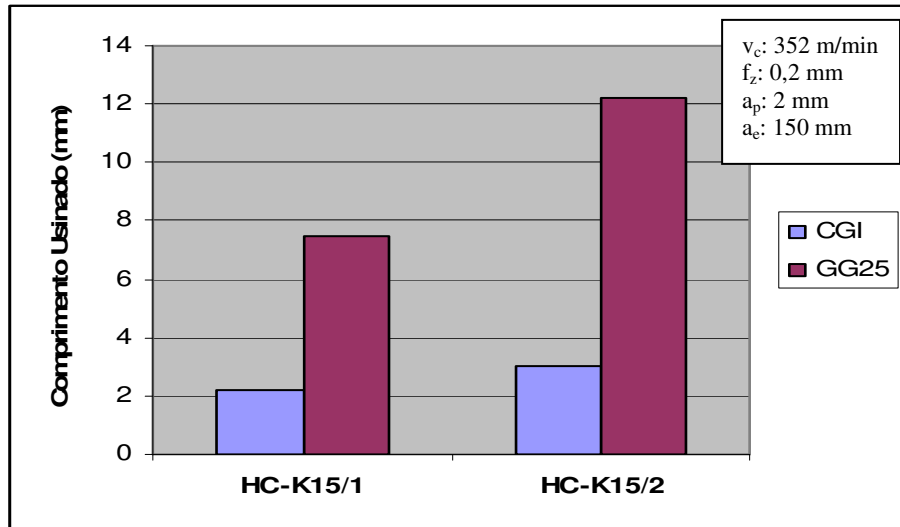


Figura 2.11 – Comprimento usinado em metros para diferentes materiais de corte na usinagem de ferro fundido cinzento e CGI (WALTER AG, 1997).

Na figura 2.12 verifica-se que o ferro fundido nodular tem pior usinabilidade, quando comparado com o ferro fundido vermicular. O ferro fundido nodular é mais abrasivo que o CGI, gerando desgaste de flanco muito elevado, assim como uma craterização na superfície da ferramenta (cavaco longo), gerando também maior esforço de corte, devido à grande força específica de corte do GGG70 (nodular).

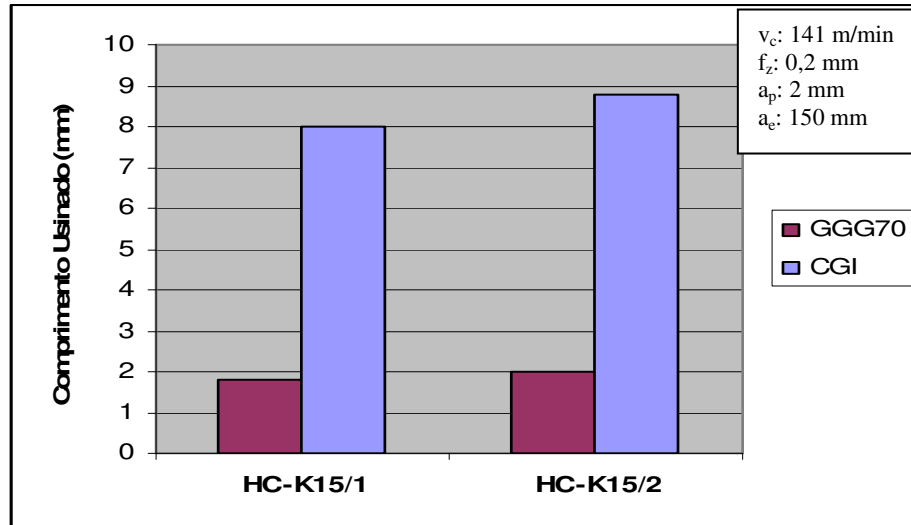


Figura 2.12 - Comprimento usinado da ferramenta de corte comparando a usinagem entre CGI e GGG70 com velocidade de corte de 141m/min (WALTER AG, 1997).

A figura 2.13 compara a usinagem dos três diferentes materiais: o GG25 (cinzento), CGI e o GGG70 (nodular), com a melhor classe de metal duro encontrada nos testes anteriores, a classe HC-K15-2, com grão de metal duro extrafino e espessura de cobertura de 16 μm . De novo verifica-se que a estrutura nodular apresenta a maior dificuldade para a usinagem, gerando assim menor vida da ferramenta de corte, mesmo quando comparada com o CGI.

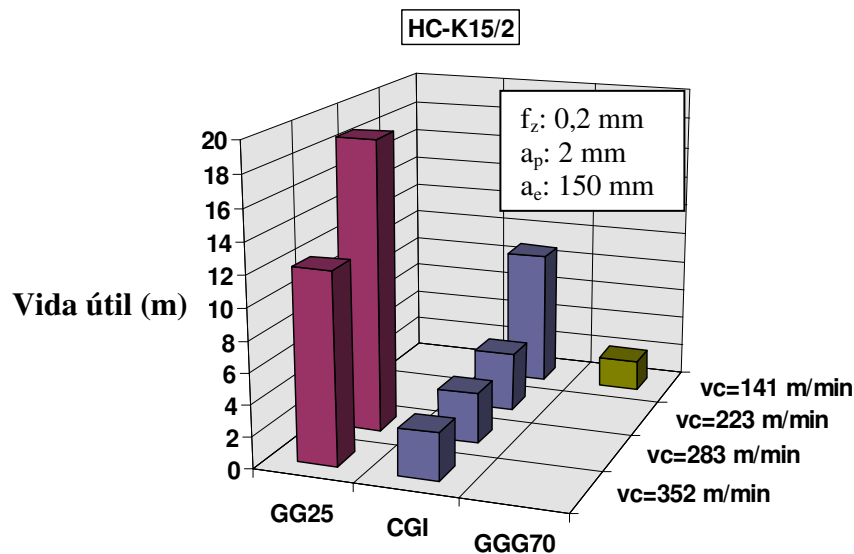


Figura 2.13 - Comprimento usinado com diferentes materiais e velocidades de corte com a classe de metal duro HC-K15-2 (WALTER AG, 1997)

De um modo geral, o processo de fresamento do CGI com diferentes classes de metal duro e comparado com os ferros fundidos cinzentos e nodulares, pode ser resumido como:

- A influência da velocidade de corte é fundamental para a vida da ferramenta de corte (quanto maior for a velocidade de corte, menor é a vida da pastilha).
- Com o aumento da velocidade de corte, pode ocorrer a avaria de deformação plástica na pastilha.
- O melhor desempenho da ferramenta foi obtido com maiores espessuras de cobertura e menor tamanho de grão.
- A usinagem de CGI (vermicular) gera maiores desgastes quando comparado com o fresamento de GG25 (cinzento).
- O CGI tem melhor usinabilidade que o GGG70 (nodular).

Lucasiewicz et al. (2007) realizou ensaios na empresa Tupy Fundições na linha de bloco de motores em “V” com seis cilindros com dimensões de 320 mm de altura e 140 mm de largura, sendo composto por duas faces e superfícies previamente desbastadas. O objetivo foi analisar o comportamento mecânico e térmico e também a evolução dos desgastes nas pastilhas de cerâmica a base de Si_3N_4 (OPHN050412-A57 WSN10) e pastilhas de metal duro da classe K15 (OPHN0504ZZN-A57 WAK15) nas operações de acabamento da face do fogo do bloco do motor.

O CGI utilizado neste ensaio tinha a mesma composição utilizada nos blocos de motores, estando dentro da faixa recomendada pela literatura (tabela 2.3). O ensaio foi realizado com uma fresa de facear de passo fino código do fabricante Walter F2146, com diâmetro de corte de 250 mm e 18 dentes de corte. Os testes foram realizados em um centro de usinagem Mazak FH6800, com potência de 22 kW.

A tabela 2.5 mostra as características das pastilhas e os parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

Tabela 2.5 – Características das ferramentas de corte e dados de corte

Ensaio	Material de Corte	Cobertura	Raio de ponta	v_c (m/min)	f_z (mm)
1	HC-K15	TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN	0,8	350	0,1
2	Si ₃ N ₄	-	0,8 + fase plana	700	0,1
3	Si ₃ N ₄	-	1,6	700	0,1

O fim da vida da ferramenta se dava quando a ferramenta atingia um desgaste de flanco V_B máx de 0,2mm. A figura 2.14 mostra os resultados destes ensaios em termos de desgaste da ferramenta.

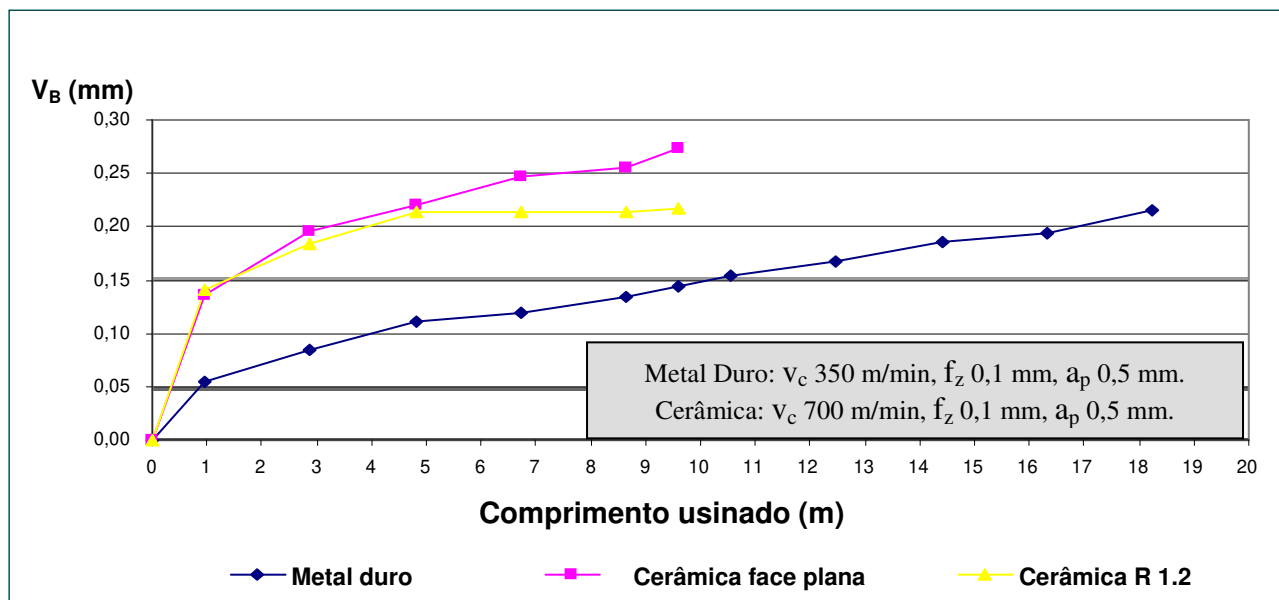


Figura 2.14 – Evolução dos desgastes na usinagem de CGI com ferramentas de Metal Duro e Cerâmica (LUCASIEVCZ et al., 2007).

Conforme a figura 2.14, para os dois tipos de materiais de corte utilizados, as curvas de evolução do desgaste apresentaram uma tendência similar ao longo do tempo de corte, isto é desgaste acentuado nos primeiros momentos devido à adaptação e ajuste da aresta, com posterior crescimento mais lento. Esta tendência foi mais visível na cerâmica. Ao se observar o desgaste de $V_{Bmáx}$ evidencia-se que o metal duro comparado tem a sua vida prolongada em relação à cerâmica em aproximadamente 100%, porém com uma taxa de remoção 50% menor. No entanto, enquanto as ferramentas cerâmicas atingiram o desgaste limite com algo entre 3 a 4 metros de

comprimento usinado, a ferramenta de metal duro conseguiu cortar cerca de 17 metros antes de atingir aquele valor de desgaste. Neste ensaio, o maior desgaste na pastilha de fase plana, deve-se ao maior contato entre a ferramenta de corte e a peça, neste teste não foi medido o esforço de corte. Teoricamente na usinagem com a pastilha de fase plana, a força de corte é maior que na usinagem com a pastilha com raio, devido também ao maior contato entre peça e ferramenta.

2.7 - Processo de usinagem por torneamento no CGI

Doré et al. (2007) realizou testes de torneamento de longa duração com o objetivo de avaliar a influência que a variação na forma da grafita no ferro fundido vermicular tem sobre o desgaste e tempo de vida nas ferramentas de corte de metal duro.

Para a realização dos ensaios foram escolhidas ferramentas com três diferentes classes de metal duro e com coberturas pelo processo CVD (deposição química à vapor). O revestimento utilizado foi o nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e o óxido de alumínio (Al_2O_3). Os parâmetros de corte utilizados foram definidos com base na literatura de fornecedores de ferramentas e são: velocidade de corte de 160 m/min, avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de corte de 0,5 mm. O critério para fim da vida das ferramentas foi adotado como sendo V_B máx de 0,3 mm.

Dois corpos de prova de ferro fundido vermicular foram escolhidos e denominados de VER-1 e VER-3. A tabela 2.6 mostra a caracterização dos corpos de prova através de análise da microestrutura.

Tabela 2.6 – Características da microestrutura dos corpos de prova

Material	Vermicular	Nodular	Forma da grafita	Perlita	Ferrita	Dureza Superficial
VER-1	94%	6%	III e IV	98%	2%	278 HB
VER-3	64%	36%	III e IV	95%	5%	241HB

Na liga VER-1 foi observado o aparecimento de inclusões duras (carbonetos) oriundas do processo de fundição. Entre esses carbonetos podemos citar a cementita.

As ferramentas neste trabalho foram definidas como a geometria de corte da pastilha tipo SNMG120408 nas classes MD-3215 (metal duro ISO K15), MD 3005 (metal duro ISO K05) e MD-AC700 (metal duro ISO K10-20), de acordo com o revestimento e fabricante. Na usinagem da liga com baixa nodularização da grafita (VER-1), houve pequena variação nos resultados, sendo a ferramenta MD-3215 a que teve maior tempo de vida. Já na liga com maior nodularização (VER-3) a ferramenta MD-AC700 foi a que teve melhor vida útil.

Essa diferença de resultado pode ser associada as diferentes espessuras de camadas do revestimento da ferramenta e classe ISO do metal duro. Outro fator verificado foi que com o aumento da nodularização da grafita de 6% na liga VER-1 para 36% na liga VER-3 houve o aumento na vida das ferramentas MD-AC700 e MD-3005, contrariando a literatura que afirma que com o aumento da nodularização diminui a usinabilidade do material pelo aumento da resistência a tração e diminuição da condutividade térmica. Os desgastes observados nas ferramentas de corte é puramente abrasivo. A figura 2.15 mostra um comparativo geral entre as ferramentas de metal duro.

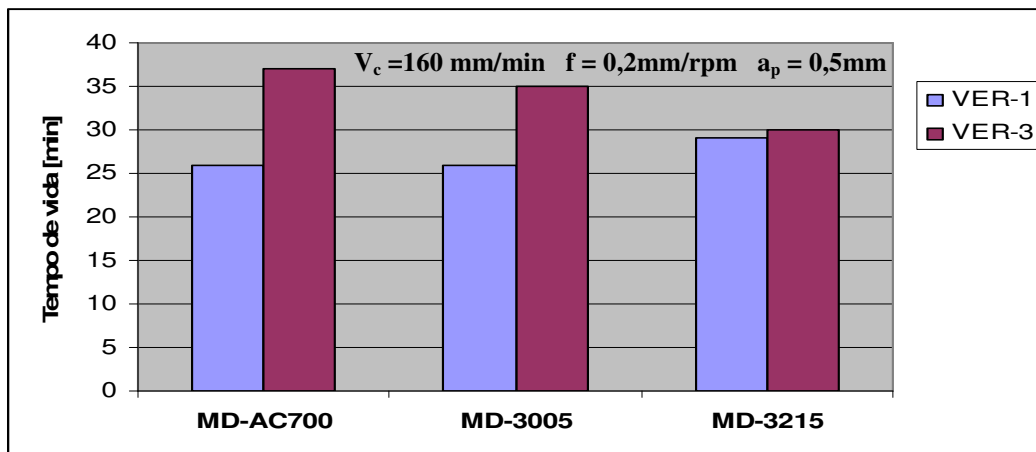


Figura 2.15 – Vida útil das pastilhas de metal na usinagem de diferentes ligas de CGI (DORÉ et al., 2007)

Pode se concluir que a liga que ofereceu maior resistência na usinagem com ferramenta de metal duro foi a VER-1, principalmente às ferramentas MD-AC700 e MD-3005. A baixa usinabilidade da liga VER-1 apesar de sua baixa nodularização da grafita, pode ser atribuída às

inclusões duras como a cementsita presentes na liga devida à diminuição da inoculação para obtenção de uma liga com menor quantidade de nódulos. O mecanismo de desgaste foi predominantemente abrasivo, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça e pelo aumento da temperatura na região de contato (DORÉ et al., 2007).

Estudos de Reuter et al. (1999c), observando os mecanismos de desgastes nas ferramentas, concluiu que o CGI é 33% mais abrasivo e 15% mais adesivo que o ferro fundido cinzento. A combinação do aumento da abrasividade e da resistência à abrasão ajuda a explicar porque as vidas das ferramentas utilizadas na usinagem do CGI alcançam apenas entre 30 a 50% da vida da ferramenta utilizada em um ferro fundido cinzento. O CGI possui o dobro da resistência mecânica do cinzento. Porém, o uso da tecnologia de corte convencional no corte do ferro vermicular pode não atingir a produtividade necessária em uma linha de produção, significando maiores investimentos em máquinas, espaço físico e mão-de-obra.

2.8 - Análise de processos na usinagem comparando o CGI e o Ferro Fundido Cinzento

Estudos apresentados por Sahm et al. (2002) mostram que as diferenças básicas entre a usinabilidade do CGI e do ferro fundido cinzento nos processos de usinagem são:

- A usinagem do CGI gera aproximadamente 20% mais forças de corte de corte,
- O CGI é mais abrasivo, mesmo com a mesma dureza que o ferro fundido cinzento,
- Na usinagem do CGI há um ligeiro aumento das temperaturas de corte,
- Devido à maior ductilidade do CGI quando comparado com o ferro fundido cinzento, há um maior contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta,
- As melhores vidas das ferramentas de corte na usinagem do CGI são encontradas na usinagem com pastilhas de metal duro, tanto em operações de torneamento, quanto em fresamento,
- O cavaco de CGI tem maior tendência à adesão que os cavacos de ferro fundido cinzento,

- Na usinagem de CGI em alta velocidade há uma forte tendência a desgaste por craterização.

2.9 - Ferramentas de Corte

O processo de usinagem, que utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça, é a operação mais comum entre os processos de fabricação existentes. Baseado no princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribui para o aparecimento de novos materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem (DOYLE, 1986).

Por outro lado, a usinagem de materiais frágeis e/ou operações de cortes interrompidos (como o caso do fresamento, por exemplo) requerem materiais de ferramentas com suficiente tenacidade para suportarem os choques e os impactos inerentes a tais processos.

Como dureza e tenacidade são duas propriedades frequentemente opostas (normalmente alta dureza significa baixa tenacidade e vice-versa), o balanço destas propriedades nos materiais de ferramenta de corte se tornou um desafio para os fabricantes. Mais uma vez a dedicação em estudos e investimentos na pesquisa mostra-se eficientes, pois hoje se pode encontrar no mercado grande número de ferramentas com invejáveis características simultâneas de tenacidade e dureza. A conciliação dessas propriedades foi conseguida com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, tamanho de grãos finos e total controle dos processos de fabricação e tratamento térmico, o que lhes confere um grau de pureza e qualidade excepcionais.

A ferramenta de corte ideal deve ter as seguintes características (MODERN METAL CUTTING, 1994):

- Ter alta dureza, resistência ao desgaste de flanco e deformações plásticas.
- Ter alta tenacidade para resistir a choques e quebras
- Ser quimicamente inerte com o material a ser usinado e resistir em altas temperaturas ao desgaste por oxidação e difusão (craterização).
- Ter boa resistência a choques térmicos.

A característica da ferramenta escolhida influenciará diretamente em sua vida útil, na escolha da máquina, tempos de fabricação, custo do operador, entre outros fatores (HEISEL, 2007).

Os materiais para ferramentas mais utilizados nas operações de usinagem não apresentam uma classificação geral (FERRARESI, 1990). Entretanto, com base nas suas características químicas, elas podem ser agrupadas da seguinte maneira (DINIZ et al, 2008).

- Aços-rápidos
- Metal duro
- Cerâmica de corte;
- Nitreto de boro cúbico,
- Diamante.

A figura 2.16 mostra a relação entre tenacidade e dureza dos principais materiais de corte disponíveis no mercado. O aço rápido apresenta grande tenacidade e consequentemente uma baixa dureza, o que impede sua utilização em velocidades de acima de 60 m/min quando comparado da usinagem de aço ou ferro fundido.

Os materiais de corte nobres, como por exemplo, a cerâmica, o CBN e o PCD, possuem elevada dureza e baixa tenacidade. Portanto, necessitam de condições de corte de alta estabilidade, como por exemplo, alta rigidez da fixação da peça e da ferramenta de corte, assim como cortes contínuo ou pouco interrompido e máquinas com altas rotações, pois trabalham com altas velocidades de corte (acima de 500 m/min).

Neste contexto, o metal duro é o material que possui a melhor relação entre tenacidade e dureza. O metal duro é o material de corte mais utilizado para a usinagem em nível mundial. Cerca de 45% de tudo que é usinado é feito com ferramentas de metal duro. A tendência para os próximos anos é aumentar ainda mais a utilização do metal duro devido ao seu contínuo desenvolvimento (HEISEL, 2003).

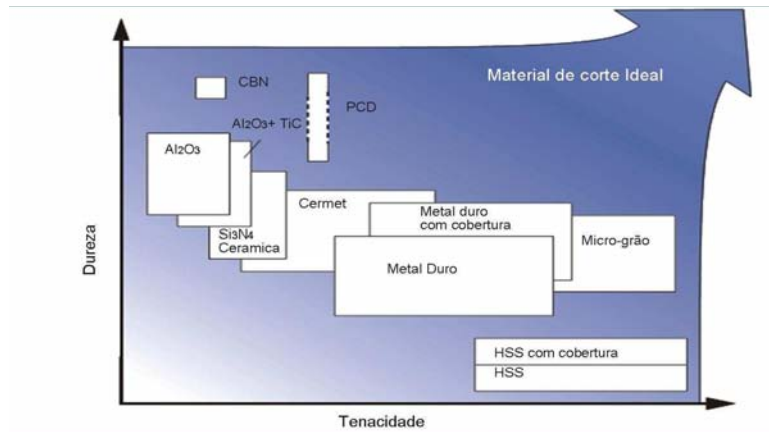


Figura 2.16 - Desenvolvimento das ferramentas de corte (HEISEL, 2007)

Na usinagem do ferro fundido vermicular, três tipos de materiais são largamente usados para fabricar ferramentas de corte. São eles: o metal duro, a cerâmica e o CBN.

Sabe-se que todos os materiais de engenharia apresentam uma queda de resistência com o aumento da temperatura. A Figura 2.17 mostra o comportamento da dureza dos principais grupos de ferramentas de corte com a temperatura de trabalho.

Nota-se que até mesmo o metal duro e as cerâmicas têm sua dureza reduzida, com o aumento da temperatura de corte, mas numa taxa bem menor que aquelas apresentadas pelos aços-rápidos. Isto garante a aplicação destas ferramentas em condições de corte bem mais desfavoráveis que aquelas a que podem se submeter os aços-rápidos.

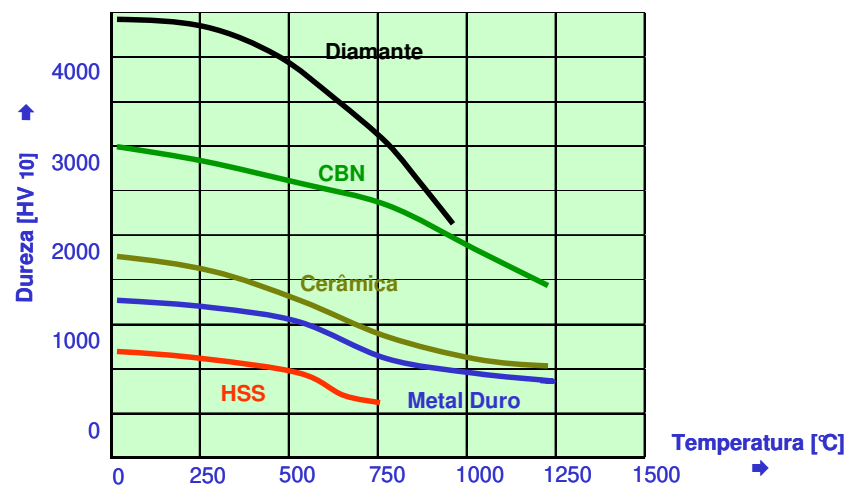


Figura 2.17 - Variação da dureza de alguns materiais de ferramentas de corte com a temperatura (HEISEL, 2007)

A seguir será feita uma descrição detalhada dos materiais de ferramentas mais utilizados no corte do ferro fundido, o metal duro e a cerâmica.

2.9.1 - Metal duro

O metal duro é o mais importante material para ferramentas de corte utilizado na indústria moderna, devido a sua combinação de dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, combinação essa possível de obter-se pela variação da sua composição (FERRARESI, 1995). É um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto – o mais usual é o cobalto) formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são carbonetos de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbonetos, como carbonetos de titânio, tântalo e nióbio. O tamanho destas partículas varia geralmente entre 1 a 10 μm e ocupam de 60 a 95% do volume do material (SANDVIK COROMANT, 2003).

Dureza em altas temperaturas e tenacidade (ou capacidade de resistência ao choque) são propriedades que se exigem de qualquer material utilizado em ferramentas de usinagem e que encontram um compromisso bastante bom no metal duro. Podem se ter metais duros de elevada tenacidade, como também metais duros com alta resistência ao desgaste ou dureza a quente. Outras características que são normalmente controladas, pois afetam a capacidade de corte do metal duro, são a porosidade e a microestrutura.

A tabela 2.7 apresenta a composição química e algumas características correspondentes a diversas classes de metal duro. Pode-se ver nesta tabela que à medida que a quantidade de carbonetos sobe, a densidade cai e a dureza aumenta. Quando se introduz TaC (com ou sem nióbio), melhora-se tenacidade em relação às composições isentas deste carboneto. A substituição de TiC pelo TaC aparentemente não traz vantagens apreciáveis sob o ponto de vista de melhora da capacidade de corte. Entretanto, é certo que o aumento simultâneo dos dois carbonetos produz melhores resultados na usinagem, provavelmente devido à dureza a quente dessas composições. Vê-se também nesta tabela que à medida que o volume de cobalto cresce (e, com isso, diminui o volume de carbonetos) a tenacidade (medida pela resistência à ruptura transversal) aumenta.

Tabela 2.7 - Composição química do Metal Duro (SANDVIK COROMANT, 2003)

<i>Designação</i>	<i>% WC</i>	<i>%TiC + Tac</i>	<i>%Co</i>	<i>Densd.</i> <i>(g/cm³)</i>	<i>Dureza</i> <i>(HV)</i>	<i>Tenacide</i> <i>(Kg/mm²)</i>
<i>ISO</i>						
<i>P01</i>	<i>30</i>	<i>64</i>	<i>6</i>	<i>7,2</i>	<i>1800</i>	<i>75</i>
<i>P10</i>	<i>55</i>	<i>36</i>	<i>9</i>	<i>10,4</i>	<i>1600</i>	<i>140</i>
<i>P20</i>	<i>76</i>	<i>14</i>	<i>10</i>	<i>11,9</i>	<i>1500</i>	<i>150</i>
<i>P30</i>	<i>82</i>	<i>8</i>	<i>10</i>	<i>13</i>	<i>1450</i>	<i>170</i>
<i>P40</i>	<i>77</i>	<i>12</i>	<i>11</i>	<i>13,1</i>	<i>1400</i>	<i>180</i>
<i>P50</i>	<i>70</i>	<i>14</i>	<i>16</i>	<i>12,9</i>	<i>1300</i>	<i>200</i>
<i>K01</i>	<i>93</i>	<i>2</i>	<i>5</i>	<i>14,8</i>	<i>1750</i>	<i>120</i>
<i>K10</i>	<i>92</i>	<i>2</i>	<i>6</i>	<i>14,8</i>	<i>1650</i>	<i>150</i>
<i>K20</i>	<i>91,5</i>	<i>2,5</i>	<i>6</i>	<i>14,8</i>	<i>1550</i>	<i>170</i>
<i>K30</i>	<i>89</i>	<i>2</i>	<i>9</i>	<i>14,5</i>	<i>1450</i>	<i>190</i>
<i>K40</i>	<i>88</i>	<i>—</i>	<i>12</i>	<i>14,3</i>	<i>1300</i>	<i>210</i>
<i>M10</i>	<i>84</i>	<i>10</i>	<i>6</i>	<i>13,1</i>	<i>1650</i>	<i>140</i>
<i>M20</i>	<i>82</i>	<i>10</i>	<i>8</i>	<i>13,4</i>	<i>1550</i>	<i>160</i>
<i>M30</i>	<i>81</i>	<i>10</i>	<i>9</i>	<i>14,4</i>	<i>1450</i>	<i>180</i>
<i>M40</i>	<i>78</i>	<i>7</i>	<i>15</i>	<i>13,5</i>	<i>1300</i>	<i>200</i>

Atualmente, já são produzidos metais duros com partículas com cerca de 0,1 μm , o que melhora várias das características desejáveis a um material para ferramenta. Estes metais duros com micro grãos micrométricos ou sub-micrométricos podem ser classificados de acordo com o tamanho do grão de sua estrutura com: fino (0,8 a 1,3 μm), sub-micrométrico (0,5 a 0,8 μm), ultrafino (0,2 a 0,5 μm) e nanométrico (menor de 0,2 μm). Devido ao maior fator de empacotamento que grãos muito pequenos propiciam, à medida que se diminui o tamanho de grão do metal duro aumenta-se a dureza, resistência ao desgaste e tenacidade do material (DINIZ et al., 2008).

Como exemplo, pode-se citar que um metal duro com grão fino e teor de cobalto de 6% tem dureza Vickers da ordem de 1600 HV30, enquanto os metais duros submicrométrico e ultrafino com o mesmo teor de cobalto têm dureza da ordem de 1800 e 2050 HV30, respectivamente. Exemplo similar pode ser dado com relação à tenacidade. Um metal duro com grão fino e 6% de cobalto têm resistência à ruptura transversal (propriedade que estima a tenacidade de um material) na casa de 2150 N/mm², enquanto que os metais duros submicrométrico e ultrafino tem esta propriedade na casa de 2950 e 3450 N/mm², respectivamente. Também a condutividade térmica do metal duro diminui quando se diminui seu tamanho de grão, o que faz com que uma menor porcentagem do calor gerado no processo flua

pela ferramenta, o que torna adequada à utilização em processos com altas velocidades de corte (DINIZ et al., 2008).

O metal duro do grupo K (usinagem de ferro fundido) foi o primeiro tipo de metal duro a ser desenvolvido. O metal duro desta classe é composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. Este tipo de metal duro não é resistente ao mecanismo que gera o desgaste de cratera e, assim, os metais duros desta classe são indicados para a usinagem de materiais frágeis, que formam cavacos curtos (ferros fundidos e latões), e que não atrim muito com a superfície de saída da ferramenta, pois ao sofrerem uma pequena deformação, já se rompem e pulam fora da região de corte (DINIZ et al., 2008).

2.9.2 - Metal duro com cobertura

O metal duro com cobertura tem a cada dia mais conquistado um maior espaço na usinagem moderna. As primeiras pastilhas de metal duro com cobertura foram desenvolvidas no final década de 60 (MODERN METAL CUTTING, 1994). Atualmente elas são muito aplicadas devido à extrema tenacidade aplicada aos substratos do metal duro, aliado à extrema dureza da cobertura. Isto tem possibilitado o aumento dos parâmetros de corte, assim como um processo de corte estável, isentos de quebras ou lascas.

O metal duro coberto é a primeira escolha para usinagens de varias ligas metálicas, nas operações de fresamento, torneamento e furação. As espessuras das coberturas geralmente variam entre 2 e 22 μm , sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade original da classe de metal duro.

2.9.3 - As principais características das coberturas

A seguir tem-se uma descrição dos principais materiais utilizados como coberturas de ferramentas de usinagem.

a) Carboneto de titânio (TiC) ou carbonitreto de titânio (TiCN) - possui excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de funcionar como elemento que promove a adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo. A presença desta camada é importante, pois o óxido de

alumínio (camada que normalmente está por cima do TiC) não possui alta afinidade física – química com o metal duro a fim de conseguir uma forte adesão com o núcleo. Na verdade, se outra camada que não seja o TiC (ou TiCN) for colocada sobre o metal duro utilizando-se o processo CVD, que exige altas temperaturas, a diferença na dilatação e contração térmica das camadas com o substrato de metal duro pode causar trincas na interface (BALSERS, 2009). Em geral, uma dessas camadas (TiC ou TiCN) é a única camada de cobertura ou é a camada de cobertura que está por debaixo das outras camadas (DINIZ et al., 2008, WERTHEIM et al., 2000).

b) Óxido de alumínio - garante a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas devido ao fato de ser um material cerâmico refratário e por possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a ataques químicos e à oxidação. É o principal responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das ferramentas de metal duro recoberto, devido à sua alta estabilidade química. Por outro lado, apresenta pequena resistência a choques térmicos e mecânicos (DINIZ et al., 2008).

c) Nitreto de titânio - reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC, ou seja, tem menor tendência à difusão com aços. A espessura de camada está entre 5 a 7 μm (DINIZ et al., 2008).

d) Nitreto de háfnio - a vantagem do nitreto de háfnio quando comparado com o TiN é que ele proporciona à cobertura um maior coeficiente de expansão na base do metal, melhor dureza a quente e melhor resistência à abrasão. Esta cobertura é principalmente indicada para a usinagem de aços inoxidáveis e também para a usinagem de ligas termo resistente (DROBNIEWSKI, 2007).

A figura 2.18 faz comparação das características mecânicas e químicas de diversas camadas de cobertura.

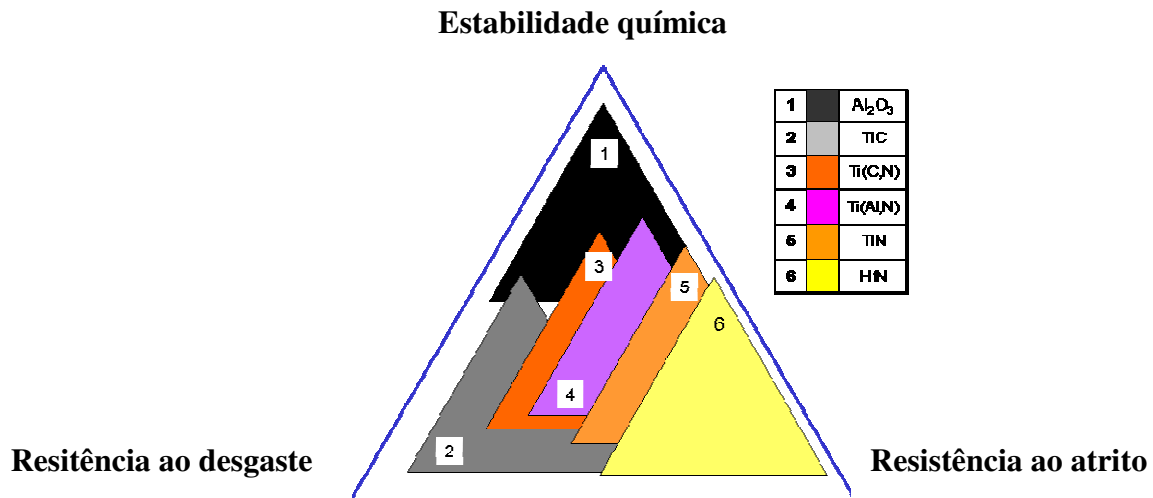


Figura 2.18 - Coberturas para ferramentas de corte e suas características (DROBNIEWSKI, 2003).

A figura 2.19 faz comparação das diferentes camadas de cobertura e suas respectivas durezas.

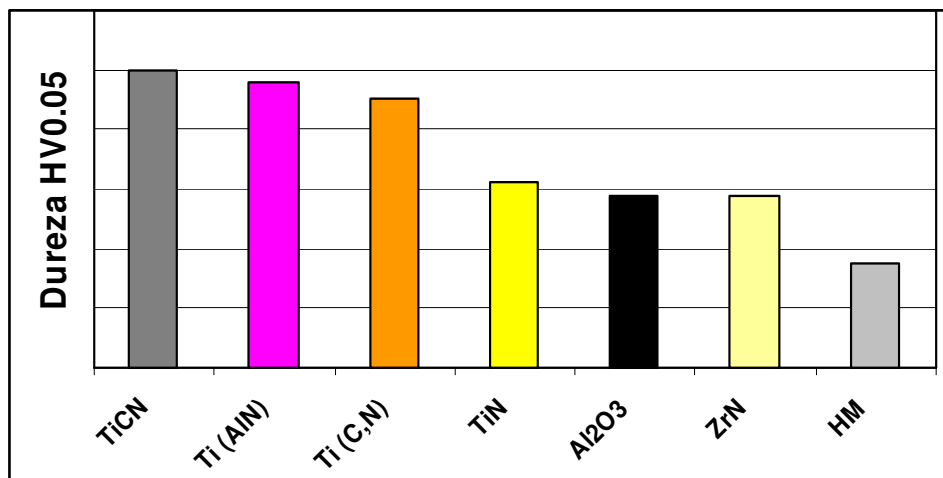


Figura 2.19 - Dureza e coloração das coberturas (WERTHEIM et al., 2000).

2.9.4 - Material Cerâmico

O material cerâmico é considerado ferramenta de usinagem desde a década de 50, quando as primeiras ferramentas foram utilizadas, mas só passou a ser um material com uma porcentagem não desprezível do mercado de ferramentas de corte na década de 80, depois dos desenvolvimentos conseguidos no campo das propriedades de cerâmica (DINIZ et al., 2008).

As ferramentas de óxidos metálicos ou de cerâmica, como são também designadas, possibilitam altas velocidade de corte. Sendo assim as máquinas ferramentas necessitam altas potências de corte e rigidez mecânica. Segundo Trent (2000), a cerâmica utilizada como ferramenta de corte consiste de grão finos com alta densidade, contendo menos de 2% porosidade. Diferentes métodos têm sido utilizados para fazer os blanks, como por exemplo, a prensagem e sinterização dos blanks por um processo similar ao utilizado para pastilhas de metal duro. A sinterização é realizada a ar, e, neste caso, os blanks são brancos para a cerâmica de Al_2O_3 . Um outro método é por pressão a quente de largos cilindros de alumina em moldes de grafite. Os blanks são cortados com ferramentas de diamante. Neste caso, os blanks das ferramentas são cinza escuro (TRENT, 2000).

A estabilidade química é muito importante quando se usina em altas velocidades e temperaturas. Algumas propriedades desses materiais fazem com que sua utilização na usinagem não seja tão fácil, quais sejam: baixa condutividade térmica, o que, logicamente dificulta a transferência de calor e faz com que a região próxima do contato cavaco-ferramenta e peça-ferramenta atinjam temperaturas muito altas e, principalmente, baixa tenacidade, o que facilita a formação de trincas e a quebra da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

Essa baixa tenacidade foi a principal razão que fez com que o material cerâmico não fizesse parte do mercado de ferramentas de corte há mais tempo. Nos últimos anos, grande esforço tem sido feito no sentido de aumentar a tenacidade desse material e bons resultados têm sido obtidos.

Em geral, as cerâmicas possuem as seguintes propriedades:

- Capacidade de suportar altas temperaturas (materiais refratários);
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;

- Alta dureza;
- Alta fragilidade;
- Baixa condutividade térmica;
- Alta estabilidade química e térmica;
- Boa resistência à fluência;
- Alta resistência à compressão e baixa resistência à tração.

É lógico que, dependendo da classe de cerâmica, ela pode ter mais intensamente algumas destas propriedades e menos intensamente outras delas. Quando comparado com o aço, a cerâmica apresenta um terço da densidade do aço, maior tensão de compressão e baixa elasticidade (duas vezes menor que no aço) (MODERN METAL CUTTING, 1994).

As cerâmicas se classificam em:

a) Base de óxido de alumínio (Al_2O_3)

Dividem-se em cerâmicas puras, cerâmicas mistas e alumina reforçada com “whiskers”. As cerâmicas puras são aquelas constituídas somente de óxidos. Podem ser alumina pura, constituída basicamente de finos grãos de Al_2O_3 sinterizados, podendo ter também algum teor de MgO para inibir o crescimento de grão e óxido de cromo, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica, ou alumina com baixos percentuais de zircônio (ZrO_2) que aumenta a tenacidade do material (Diniz et al., 2008). As cerâmicas mistas contêm além de alumina, ou o carboneto de titânio (TiC) ou o nitreto de titânio (TiN). A alumina reforçada com “whiskers” é constituída por inclusões de monocristais de SiC chamadas “whiskers” em uma matriz cerâmica (Al_2O_3).

b) Cerâmica a base de nitreto de silício (Si_3N_4)

São cristais de Si_3N_4 com uma fase intergranular de SiO_2 que são sinterizados na presença da alumina e o óxido de ítrio (Y_2O_3) e manganês (MgO). Este tipo de cerâmica também é chamado de Sialon. Tem excelentes propriedades como alta dureza, melhor tenacidade quando

comparado com a Alumina e baixo coeficiente de expansão térmica, resultando em boa resistência a choques térmicos. Os insertos de sialon são fabricados pelo processo similar ao processo do metal duro sinterizado (TRENT, 2000).

A tabela 2.8 mostra algumas propriedades relativas dos diversos tipos de materiais cerâmicos comparados com o metal duro.

Tabela 2.8 - Propriedades relativas dos cerâmicos comparadas com as do metal duro (DINIZ et al., 2008).

Material de Corte	Tenacidade	Dureza a Quente	Resistência ao Choque Térmico	Estabilidade Química (Fe)	Estabilidade Térmica
Cerâmica Pura	2	2	1	5	5
Cerâmica Mista	1	3	2	4	4
Cerâmica com Whisker	4	3	3	2	3
Sialon	3	5	4	1	2
Metal Duro	5	1	5	3	1

A tabela 2.8 mostra que a cerâmica pura é ótima com relação à estabilidade química, mas é sofrível com relação à tenacidade e dureza a quente e é péssima com relação à resistência ao choque térmico. Por isso, ela é utilizada somente em operações de acabamento (em que não se precisa de muita tenacidade) de peças endurecidas ou em ferro fundido, em que as temperaturas atingidas são altas e também quando a tendência ao desgaste por difusão é grande (necessita-se de estabilidade química).

Já a cerâmica mista apresenta um compromisso um pouco melhor entre dureza a quente e estabilidade química que a cerâmica pura (estabilidade química um pouco pior e dureza a quente um pouco melhor). Porém a tenacidade é péssima. Assim, ferramentas com esse material são a primeira recomendação para o torneamento em acabamento de aços endurecidos, em que se necessita tanto dureza a quente quanto estabilidade química e, como este tipo de operação é geralmente um acabamento fino, a tenacidade não é tão importante.

Os Sialons são ótimos em termos de dureza a quente e resistência ao choque térmico e são bons com relação à tenacidade, porém são péssimos com relação à estabilidade química. Devido a isso, são principalmente utilizados na usinagem de ferro fundido (em que o cavaco curto formado não tende a causar difusão na superfície de saída da ferramenta - não é necessário que a ferramenta tenha estabilidade química), principalmente em desbaste, onde dureza a quente, resistência ao choque térmico e tenacidade são fundamentais, ou em fresamento (em que se deseja resistência ao choque térmico e tenacidade). Outra razão para este material se adequar ao uso no fresamento é que, devido ao corte interrompido, a ferramenta não atinge temperaturas muito altas e, assim, a tendência à difusão é menor.

As cerâmicas reforçadas com whiskers têm todas as suas propriedades em um nível intermediário. Uma de suas aplicações é o torneamento de aço endurecido com superfícies interrompidas. Neste tipo de operação, a estabilidade química não é tão importante devido à menor temperatura da ferramenta causada pelo corte interrompido. Por outro lado, dureza (devido à dureza do material usinado) e tenacidade (devido à interrupção do corte) são propriedades que devem existir na ferramenta.

Devido à sua fragilidade, a utilização do material cerâmico no processo de usinagem deve vir acompanhada de alguns cuidados para evitar quebra ou lascamento da aresta de corte. Assim, as pastilhas cerâmicas possuem um chanfro na região da aresta de corte cuja dimensão varia de 0,05 a 0,3 mm, com ângulos entre 20° e 30°. É importante que o ângulo do chanfro não seja muito grande, pois ele tende a aumentar os esforços de corte. Outro cuidado a ser tomado é a usinagem de um chanfro na peça antes da operação com a ferramenta cerâmica, a fim de que o primeiro contato ferramenta-peça se de em condições mais suaves. Além disso, em operações de desbaste, as pastilhas cerâmicas costumam ser mais espessas que as pastilhas de metal duro, exceto as de Si_3N_4 que, por serem mais dúcteis, não necessitam de uma maior área para resistir aos esforços de corte e aos choques (DINIZ et al., 2008). Outros cuidados são: o corte deve ser feito sem fluido de corte e o sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça tem que ser bem rígido (SANDVIK COROMANT, 2003).

2.10 - Mecanismos de desgastes das ferramentas de corte

Em função das condições de processos de usinagem, a ferramenta fica sujeita a uma combinação de vários fatores de origem mecânica, térmica, física e abrasiva. Entretanto dependendo das condições de corte e do próprio material da ferramenta, ocorre o predomínio de um tipo de mecanismo desgaste sobre os demais.

Os principais mecanismos de desgastes de uma ferramenta de usinagem são:

a) Abrasão Mecânica

O movimento relativo entre peça e ferramenta e entre cavaco e ferramenta causa o desgaste abrasivo, principalmente se a peça possuir partículas duras (figura 2.20-1). O desgaste frontal e o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém, ela se faz mais proeminente no desgaste frontal, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível que é o cavaco (DINIZ et al., 2008). Além disso, na interface cavaco-ferramenta ocorre aderência entre estes dois elementos, gerando a formação da zona de fluxo (cisalhamento da porção inferior do cavaco, próxima à interface), impossibilitando a abrasão. Somente sob condições de deslizamento na interface peça/ferramenta, onde a aderência acontece de forma intermitente, a abrasão pode ocupar um papel mais importante (TRENT, 2000). Ferramentas de corte com maior dureza tendem a resistir mais a este mecanismo de desgaste. A utilização de ferramentas de maior dureza a quente minimiza o desgaste por abrasão, como por exemplo, a cobertura de óxido de alumínio (SANDVIK COROMANT, 2003). A região de desgaste causado por abrasão tem um aspecto sulcado, cheio de riscos paralelos à direção de corte.

b) Difusão

É o mecanismo de desgaste causado pela transferência de átomos de um material para o outro, sendo bastante dependente da temperatura de corte e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de cisalhamento secundário (interface cavaco-ferramenta) (figura 2.20-2). Pode atuar tanto na superfície de saída como na superfície de folga da ferramenta, porém é o principal responsável pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, pois na superfície de saída têm-se as condições propícias para as reações químicas. Um exemplo típico de desgaste por

difusão é aquele que acontece na ferramenta de diamante quando se usina ligas ferrosas, a partir de altas temperaturas (em torno de 600 °C), devido à alta afinidade entre o carbono do diamante e o ferro do cavaco (TRENT, 2000; DINIZ et al., 2008). Para se inibir o desgaste de origem difusiva sugere-se a utilização de ferramentas de elevada estabilidade química, como por exemplo, pastilhas de cerâmica ou pastilhas com cobertura de óxido de alumínio (SANDVIK COROMANT, 2003). A região da ferramenta desgastada por difusão tem aspecto liso.

c) Oxidação

Durante o processo de corte, as altas temperaturas e a presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) podem gerar oxidações para a maioria dos metais (figura 2.20-3). O tungstênio e o cobalto formam filmes de óxidos porosos sobre a ferramenta que são facilmente levados pelo atrito gerando desgaste (SANDVIK COROMANT, 2003). Ferramenta com cobertura de óxido de alumínio possibilita maior resistência à oxidação por conta de sua dureza extremamente alta (em torno de 2300 HV) e também por conta de sua estabilidade química. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades de contato cavaco-ferramenta devido ao acesso de ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o desgaste de entalhe (DINIZ et al., 2008).

d) Aderência

O mecanismo de desgaste por aderência, conhecido também como *attrition*, geralmente ocorre em baixas velocidades de corte, em que o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular (figura 2.20-4). A aresta postiça de corte (APC) pode aparecer e o contato com a ferramenta se torna menos contínuo. Nestas condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface cavaco-ferramenta (TRENT, 2000). Uma das soluções para se minimizar o desgaste por aderência, é utilizar ferramentas com coberturas que diminuem o coeficiente de atrito da mesma, amenizando o desgaste.

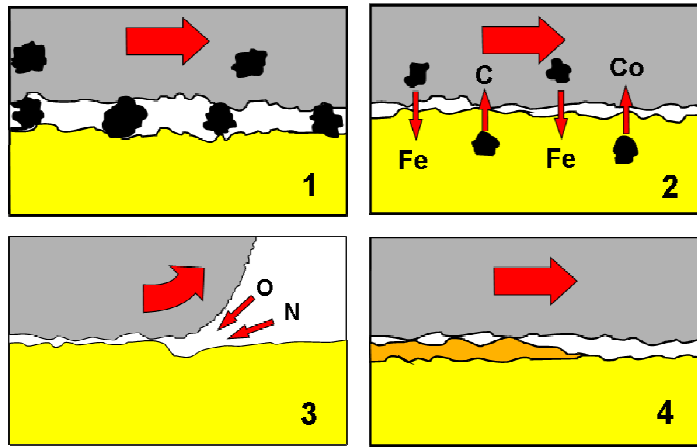


Figura 2.20 - Mecanismos formadores dos desgastes, (1) abrasão, (2) difusão, (3) oxidação e (4) aderência (WALTER AG, 2008).

2.11 - Desgastes e avarias nas ferramentas de corte

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de destruição que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. Esta substituição da ferramenta se dá em função dos desgastes e avarias. A diferença entre desgaste e avaria pode ser analisada a partir da definição clássica de desgaste: “é a mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”. No desgaste, ao contrário da avaria, esta perda acontece de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes a nível atômico, às vezes em nível granular ou granulares. Assim, pode ocorrer segundo vários mecanismos. Neste processo a temperatura desenvolvida durante o corte tem um papel decisivo, e atinge ferramentas de corte de qualquer tipo de material (ISO 3685, 1977).

O desgaste altera a geometria original da ferramenta de corte, modificando a área de contato na interface cavaco-ferramenta. Como consequência, várias outras modificações irão surgir, sendo as mais importantes: o aumento na geração do calor e o aumento das forças de usinagem (MACHADO et al., 2009). As formas de desgaste mais comuns incluem: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe.

Avaria é um processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da ferramenta de corte (TRENT, 2000). As

formas mais comuns para avarias incluem: deformação plástica da aresta de corte, trincas de origem térmica e mecânica, lascamento e quebras. Entre as avarias, a quebra e a lasca levam à perda de uma quantidade considerável de material da ferramenta de corte instantaneamente, enquanto a trinca promove a abertura de uma fenda no corpo da ferramenta de corte. A quebra é mais comum em ferramentas com baixa tenacidade, como as cerâmicas e metal duro de alta dureza. Já a lasca, depende também da tenacidade da ferramenta, mas pode ocorrer até mesmo em ferramentas de aço-rápido. No caso da trinca não existe a perda de material, mas sua presença pode comprometer a continuidade do processo de corte pela sua transformação em sulco (no caso de trincas de origem térmica) ou pela promoção de uma lasca ou mesmo a quebra da ferramenta de corte.

As trincas são comumente observadas em ferramentas de metal duro e cermets, podendo também aparecer em materiais ultraduros e aço-rápido, enquanto que as cerâmicas, normalmente, são frágeis demais para conseguirem absorver a deformação plástica necessária para impedir a sua propagação. Assim, normalmente, uma trinca na ferramenta cerâmica é levada às consequências mais graves, isto é, promove instantaneamente a lasca ou a quebra da ferramenta.

A deformação plástica é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos vai levar à total destruição da cunha cortante da ferramenta, podendo até perder massa. É mais comum ocorrer em ferramentas com resistência ao cisalhamento relativamente baixa e com maior tenacidade, como o aço-rápido, as ligas fundidas e o metal duro. A ocorrência nas cerâmicas é mais rara porque, devido à grande fragilidade deste grupo de materiais, elas não apresentam campo plástico suficiente para permitir o deslocamento de material, promovendo, antes, a quebra ou a fratura (SANDVIK COROMANT, 2003).

A figura de 2.21 mostra os principais tipos de desgastes e avarias encontradas nas ferramentas de corte e a figura 2.22 mostra os parâmetros de medição destes desgastes.

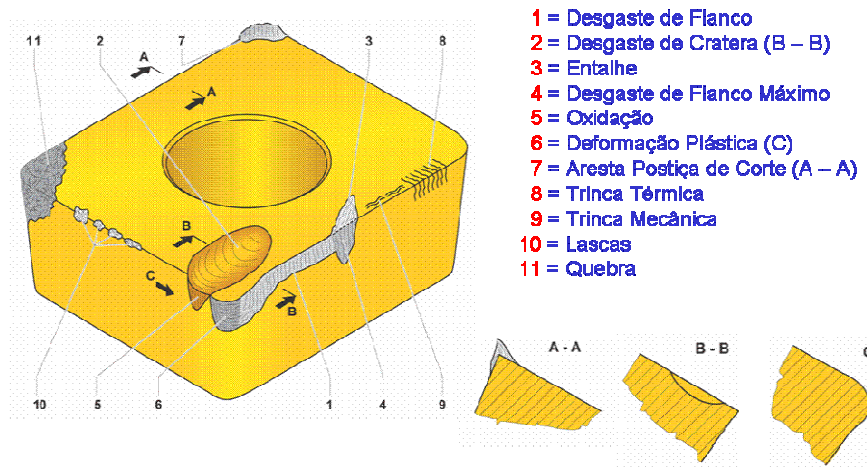


Figura 2.21 - Tipos de desgastes e avarias (SANDVIK COROMANT, 2003).

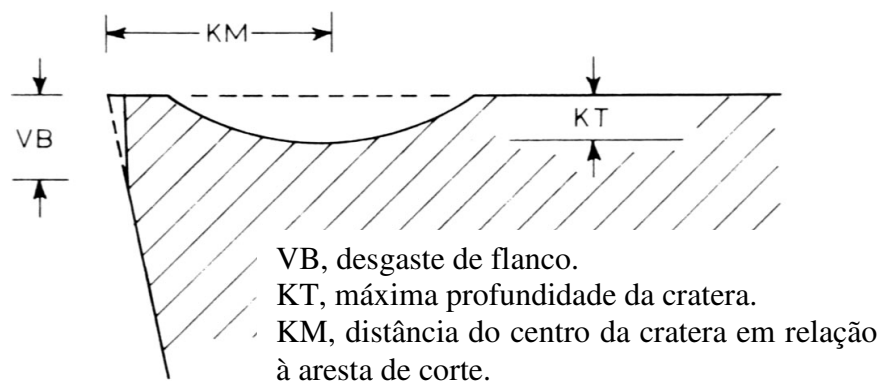


Figura 2.22 - Sistema convencional para medição dos desgastes (TRENT, 2000)

A seguir estudaremos os principais desgastes e avarias encontradas no processo de fresamento

2.11.1 - Desgaste de flanco

Ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. É o tipo de desgaste mais comum. Esse tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a

peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. É incentivado pelo aumento de velocidade de corte (DINIZ et al., 2008).

2.11.2 - Desgaste de cratera

É um tipo de falha decorrente de interações físicas e químicas entre o material da peça e o material da ferramenta. Acontece na superfície de saída da ferramenta, típico quando se usina aços com elevada velocidade de corte. Diferentemente do desgaste abrasivo, é a interação química entre o cavaco quente e o material da ferramenta que provoca este tipo de desgaste. Em elevada velocidade de corte, o material da ferramenta pode se dissolver no cavaco, finas partículas da ferramenta aderem ao cavaco e são levadas embora junto com ele, formando a cratera na superfície de saída da ferramenta. Excessivo desgaste de cratera debilita a aresta de corte, inibe o fluxo adequado de cavaco e incrementa o calor e a pressão sobre a ferramenta, levando inclusive a provocar a fratura da mesma. Para minimizar o desgaste de cratera, deve-se aumentar a estabilidade química do material da ferramenta, adicionando TiC ao WC do metal duro. O uso de revestimentos duros minimiza também o desgaste de cratera, principalmente o revestimento de Al_2O_3 que é muito estável quimicamente. A geometria da ferramenta também é importante. O uso de ferramenta com ângulo de saída positiva reduz a pressão sobre a ferramenta e diminui o contato entre o cavaco e o inserto, reduzindo o desgaste de cratera (WALTER AG, 2003).

2.11.3 - Desgaste de entalhe

Esse tipo de desgaste pode acontecer por um mecanismo de oxidação ou por adesão. O entalhe forma-se no extremo da aresta que corresponde à profundidade de corte ou no extremo do contato da aresta secundária de corte com a peça, onde o ar entra em contato com a zona de corte. Esse tipo de desgaste pode provocar rebarba e debilitar a aresta de corte, provocando aumento da rugosidade da peça e até provocar a quebra da ferramenta (SANDVIK COROMANT, 2003). Para minimizá-lo, é conveniente utilizar ferramenta de metal duro com elevado conteúdo de Co e coberturas com alumina ou TiN. Também quando se varia a profundidade de corte no programa de usinagem este problema é minimizado.

2.11.4 - Deformação plástica da aresta de corte

A elevada pressão e a alta temperatura da ferramenta podem causar seu amolecimento, permitindo que grãos de carboneto se desloquem. O raio da ponta da ferramenta tende a distorcer. Para minimizar esse problema, recomenda-se usar ferramenta de metal duro com baixo conteúdo de elemento de liga (Co), substrato do tipo micro-grão e conteúdo de carbonetos com estrutura centrada como é o carboneto de Tântalo (SECO TOOLS, 2007).

A escolha de um raio de ponta grande (devido melhor distribuição do calor gerado) e de revestimentos duros (devido maior dureza a quente) também ajuda a minimizar a deformação plástica.

2.11.5 - Lascamento

É um tipo de avaria da ferramenta. Ao contrário do desgaste frontal e de cratera, que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento partículas maiores são retiradas subitamente. Ocorre principalmente em ferramentas frágeis ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Prejudicam o acabamento da superfície da peça e, se continuam crescendo, provocam a quebra da ferramenta (WALTER AG, 2003).

2.11.6 - Trincas

As trincas também são consideradas como avarias e são causadas pela variação da temperatura e/ou variação dos esforços mecânicos (DINIZ et al., 2008).

As trincas são divididas em origens térmicas e mecânicas, conforme abaixo.

2.11.6.1 - Trincas térmicas

As trincas de origem térmica ocorrem em função da variação de temperatura do processo. São provocadas pelo processo alternado de expansão e contração das camadas da ferramenta de corte que acontece em forma cíclica, quando elas são aquecidas e resfriadas ao entrar e sair do corte, respectivamente (TRENT, 2000). Usualmente elas são perpendiculares à aresta de corte (SANDVIK COROMANT, 2003). Em fresamento, a temperatura eleva-se rapidamente, enquanto a aresta está no corte, devido à espessura variável do cavaco e também a distribuição da

temperatura na aresta é irregular. Durante o tempo no qual a aresta não corta em cada revolução, o contato com o ar causa esfriamento. Estas variações geram tensões térmicas originando trincas térmicas. Se prematuras, podem prejudicar a vida da ferramenta. Partículas de metal duro se desprenderão entre as fissuras provocando lascamento da aresta de corte e acabamento superficial ruim. No processo de usinagem por fresamento, o aquecimento e o resfriamento da ferramenta de corte é contínuo. A utilização de fluido de corte faz aumentar a variação da temperatura nas arestas quando entram e saem do contato com a peça. Esse choque térmico acelera as fadigas e trincas térmicas, que certamente resultarão num fim prematuro da aresta de corte.

2.11.6.2 - Trincas mecânicas

No fresamento, no momento de entrada no corte, a aresta sofre impacto mecânico, fazendo com que as forças cresçam rapidamente e depois variam conforme a direção e espessura do cavaco, podendo resultar em trincas por fadiga de material que geralmente aparecem em sentido paralelo à aresta. Como resultado pode ocorrer a ruptura da aresta de corte. Cavacos demasiadamente espessos na saída também podem ser muito prejudiciais, causando diminuição súbita dos esforços sobre a ferramenta e facilitando a ocorrência de trincas (WALTER AG, 2003).

2.11.7 - Quebra

O crescimento acima de um determinado limite de todos os desgastes e avarias pode gerar a quebra das ferramentas de corte. Porém, a quebra pode ocorrer inesperadamente devido a alguns fatores como material de corte muito duro, carga excessiva sobre a ponta da ferramenta, raio de ponta ou ângulo de ponta muito pequeno, peças com corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos bolsões de armazenamento de cavaco. A quebra da ferramenta, não ocasiona somente dano à ferramenta, mas na maioria das vezes danifica a peça e até mesmo pode causar avarias nas máquinas (DINIZ et al., 2008).

Capítulo 3

Materiais, Equipamentos e Procedimento Experimental.

Este capítulo aborda as condições em que os ensaios foram realizados, em especial o material utilizado, os equipamentos e o procedimento experimental adotado.

A parte experimental deste trabalho foi realizada no laboratório de usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica (F.E.M.) da Universidade de Campinas.

3.1 - Materiais

A empresa Tupy Fundições situada na cidade de Joinville no estado de Santa Catarina realizou a fundição dos *blanks* de ferro fundido vermicular (CGI-450). Os *blanks* fundidos foram preparados com as dimensões de 450 x 250 x 30 mm.

A preparação dos corpos de prova a partir dos *blanks* fundidos foi realizado no centro de treinamento da empresa Walter do Brasil situado na cidade de Sorocaba no estado de São Paulo. Os materiais foram preparados para simular a usinagem da face do fogo de um bloco de motor Ford V-6 em escala reduzida em 3,17 vezes. A figura 3.1 mostra o bloco de motor Ford V-6 fundido e usinado pela empresa Tupy Fundições. A figura 3.2 mostra um esquema dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

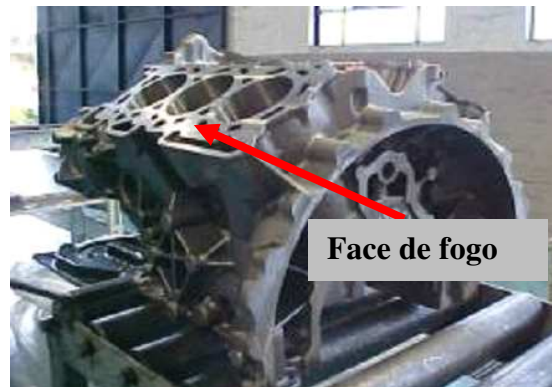


Figura 3.1 - Bloco de motor Ford V-6

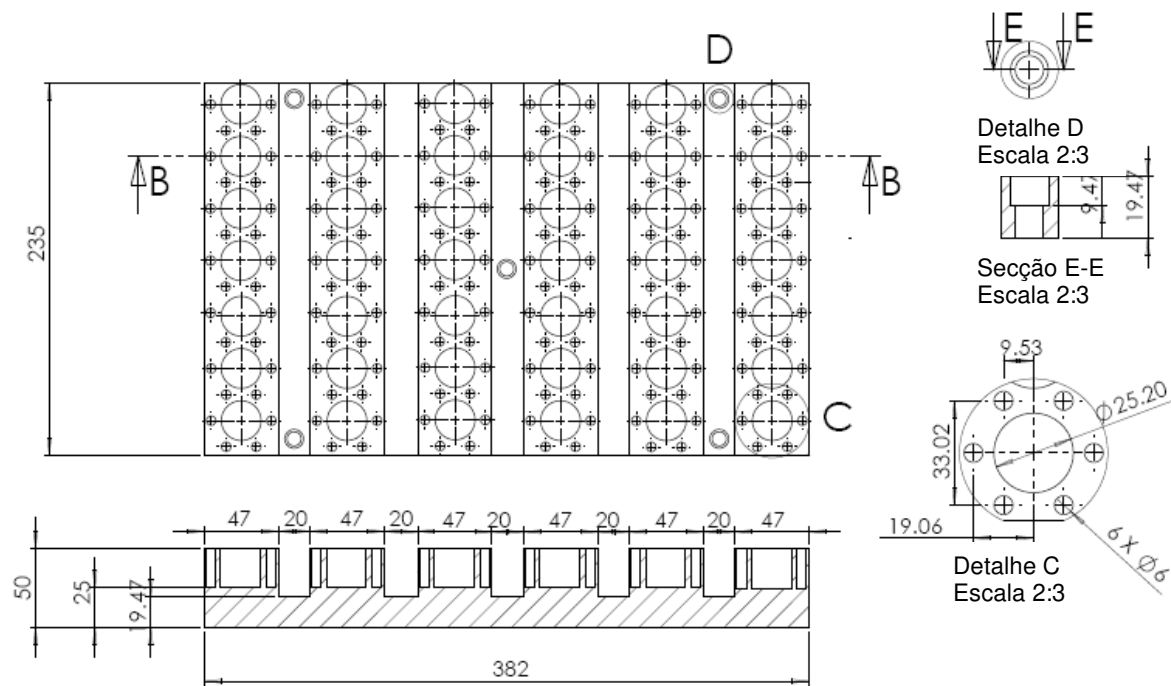


Figura 3.2 - Projeto do *blank* usinado.

A figura 3.3 mostra o *blank* usinado após todo processo de usinagem e pronto para a realização dos ensaios. Cada *blank* usinado é composto de seis superfícies com 250 mm lineares e 27 mm de altura úteis para a usinagem.



Figura 3.3 - *Blank* usinado.

3.2 - Propriedades e Microestrutura

O material usado neste trabalho é o ferro fundido vermicular. A composição da liga é a mesma utilizada na fabricação de blocos de motores, estando dentro das faixas recomendadas pela literatura.

A análise química dos materiais foi fornecida pela empresa TUPY. Os dados são apresentados na tabela 3.1. Segundo a Empresa, as amostras fornecidas para análise, estão com propriedades e composições químicas iguais às dos blocos de motores.

Tabela 3.1 - Composição química do ferro fundido vermicular.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)
3,44	2,22	0,31	0,005

Para a realização da análise micro estrutural foram retiradas amostras semicirculares dos corpos de prova, analisando-se a microestrutura da superfície na sua secção transversal. As amostras foram submetidas a um polimento e através de fotos, foram avaliados os tipos de grafita e a percentagem de grafita nodular e vermicular. Estas mesmas amostras foram submetidas a ataque de nital 3% para a quantificação da percentagem de perlita e grafita.

Os resultados das análises de imagens são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Percentual e forma das grafitas e fases presentes na matriz.

Material	% Vermicular	% Nodular	Forma da Grafita	% Perlita	% Ferrita
Vermicular	93-94%	6-7 %	Forma III e VI	92	8

Outro ensaio utilizado para a caracterização do material usinado foi a medição da dureza Brinell, por meio do durômetro da marca Wolpert, modelo Testor HT1a, com carga máxima de 250,0 kg. As medições foram realizadas com esfera de 2,5 mm de diâmetro, carga de 187,5 Kg. Os valores obtidos estão contidos na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Dureza Brinell média e desvio padrão dos corpos de prova.

Dureza média	228 HB
Desvio Padrão	10

As imagens utilizadas para a caracterização dos materiais foram obtidas pelo microscópio óptico, com aumento de 100 vezes, sendo que os valores das quantidades contidas na análise das tabelas 3.2 e 3.3 representam à média de várias regiões da amostra do material. A figura 3.4 ilustra as micrografias do ferro fundido vermicular com ataque de nital 3%.

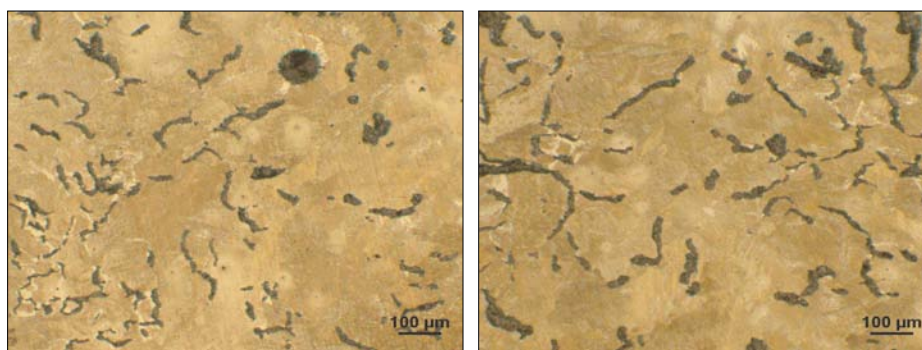


Figura 3.4 - Micrografia representativa de uma região do núcleo das amostras 1 e 2, onde se observam as grafitas vermicular e nodular e a matriz perlítica com pouca ferrita. Ataque nital 3%.

3.3 - Geometrias ensaiadas

O *blank* usinado a ser utilizado nos ensaios foi desenvolvido respeitando as características geométricas originais de um bloco de motor, principalmente o diâmetro do furo do cilindro e a largura da face do fogo.

Para se aproximar das condições de usinagem, como por exemplo, choques mecânicos da aresta de corte com a peça, foram realizados diversos furos com diâmetro de 6 mm ao redor do furo maior, com o objetivo de simular o contato entre peça e ferramenta nos furos das galerias de refrigeração do bloco do motor e nos furos roscados para a fixação do cabeçote no bloco, conforme figura 3.5.



Figura 3.5 - Representação do furo de refrigeração e fixação do cabeçote.

Utilizando os conceitos da programação de máquinas CNC, para efeitos de análise de usinagem, consideramos que a peça está fixa na mesa, a peça se movimenta nos eixos X e Y, e o eixo árvore da máquina (eixo Z), realiza o movimento de profundidade de corte (a_p). Essa consideração foi adotada para representar os sentidos de usinagem no desenho a seguir (figura 3.6). As setas indicam o sentido de movimento da fresa.

Conforme visto na figura 3.6, a fresa trabalha em corte simétrico com a peça (corte concordante e discordante), realizando a usinagem no sentido +X e -X na máquina CNC. Ao final de cada passada da ferramenta sobre a peça, é realizado o movimento de profundidade de corte (eixo Z) de 1 mm e se inicia novo ciclo de corte.

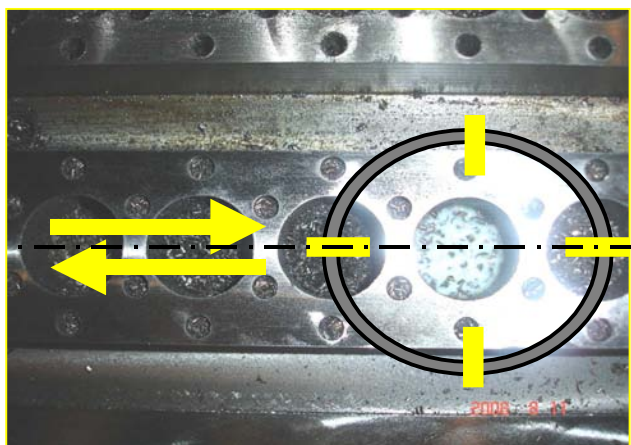


Figura 3.6 - Sentido de usinagem da fresa no blank usinado.

Em função da boa estabilidade de corte e rigidez da máquina, ferramenta e fixação (isento de vibração), não houve redução da velocidade de avanço no contato inicial e final entre peça e ferramenta.

3.4 - Equipamentos

A máquina utilizada (figura 3.7) nos ensaios foi um centro de usinagem vertical CNC de 3 eixos da marca Mori Seiki, modelo SV-40 com potência de 22,4 kW e rotação máxima de 12.000 RPM. O comando numérico da máquina é o GE Fanuc 18M.



Figura 3.7 - Centro de Usinagem Vertical do Laboratório de Usinagem da F.E.M. - Unicamp.

Os desgastes das ferramentas foram medidos durante os ensaios utilizando-se um microscópio estereoscópio com ampliação máxima de 50x, interligado a um sistema de aquisição de imagens composto de uma câmera CCD e um computador com software de aquisição de imagens com recurso de medição (Software Global Lab. Image).

A figura 3.8 mostra o microscópio utilizado para a análise e também o dispositivo de fixação da fresa para medição dos desgastes.



Figura 3.8 - Microscópio óptico e dispositivo de fixação da fresa.

Para analisar o mecanismo de desgaste das pastilhas as arestas desgastadas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) usando recurso de EDS (*energy dispersive system*). O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado pertence ao laboratório de microscopia eletrônica da FEM.

3.5 - Sistema de aquisição de dados de potência.

Através de uma porta de comunicação serial disponibilizada pelo fabricante do CNC, fez-se a aquisição do sinal elétrico do motor para o micro computador por intermédio de uma placa A/D, modelo PCi6025E/CB-100, fabricada pela National Instruments. Através de uma rotina computacional em Lab View, fez-se o gerenciamento do sinal.

3.6 - Ferramentas de corte

3.6.1 - Corpo da fresa

A fresa utilizada nos ensaios tem características similares às ferramentas utilizadas no processo de usinagem de blocos de motores de ferro fundido vermicular. Conforme citado anteriormente, o blank usinado a ser ensaiado foi produzido em escala reduzida, visto que a fresa utilizada no processo atual de usinagem na empresa TUPY tem diâmetro de corte de 250 mm e a fresa a ser utilizada nos ensaios tem diâmetro de corte de 63 mm.

Em operações de desbaste e acabamento de blocos de motores em ferro fundido, são indicadas fresas de facear a 43° (com pastilhas octogonais positivas ou negativas) ou fresas de facear a 45° (com pastilhas quadradas positivas ou negativas) devido à tendência de lascamento de borda nas peças. Para o diâmetro de 63 mm a fresa escolhida tem ângulo de posição de 43° e 4 dentes de corte (figura 3.9).

O cabeçote foi cedido pela empresa Walter do Brasil para a realização dos ensaios e apresenta a característica de utilizar pastilhas de metal duro e cerâmica com a mesma geometria de corte.



Figura 3.9 - Cabeçote de Fresamento (WALTER AG)

A montagem da ferramenta de corte (cabeçote e pastilha) apresenta uma geometria dupla positiva, isto é, um ângulo axialmente positivo (7° efetivos com pastilha de geometria tipo A57 e 23° com geometria tipo F57) que reduz os esforços de corte, tendências à vibração, e um ângulo radialmente positivo (3° efetivos) tanto no contato inicial entre peça e ferramenta na ponta da pastilha. Essa geometria de corte gera um corte extremamente suave da ferramenta com a peça.

3.6.2 - Pastilhas e cobertura

Nos ensaios foram utilizadas pastilhas de metal duro e cerâmica para operação de acabamento.

A pastilha de metal duro, conforme norma ISO 1832 e código do fabricante Walter AG, era do tipo ODMW060508-A57 WAK15, com classe de tolerância M (tolerância do circunscrito $\pm 0,05$ a $0,15$ mm, dependendo do tamanho da pastilha, conforme norma ISO1832), dimensões de circunscrito de $15,88$ mm e espessura de $5,56$ mm, ângulo de folga de 15° e raio de ponta de $0,8$ mm. A classe de metal duro utilizado equivale à classe HC-K15 cujas principais características são:

- Tamanho de grão: $0,9 - 1,2 \mu\text{m}$
- Cobalto (aglomerante): $<6 \%$
- Carboneto de tungstênio: $>94 \%$
- Carbonetos de tântalo e titânio: 0%
- Cobertura CVD: $\text{TiN} + \text{TiCN} (5\mu\text{m}) + \text{Al}_2\text{O}_3 (4\mu\text{m}) + (\text{TiN})$, com espessura total entre 10 e $12 \mu\text{m}$
- Dureza: 1580 HV

A pastilha de cerâmica, conforme norma ISO1832 e código do fabricante Walter AG era do tipo ODHW060516-A57 WSN10, com classe de tolerância H (tolerância do circunscrito $\pm 0,013$ mm), dimensões de circunscrito de $15,88$ mm e espessura de $5,56$ mm, ângulo de folga de 15° e um raio de ponta de $1,6$ mm. O material cerâmico é de Nitreto de Silício (Si_3N_4),

conhecida como Sialon com estrutura de micro-grão equivalente à classe ISO CN-K20. A dureza da pastilha é de aproximadamente 2500 HV.

A cobertura denominada nACRo[®] realizada pela empresa PLATIT, situada na cidade de São José dos Pinhais no estado do Paraná, é uma cobertura multi-camada (nc-AlCrN) / (α - Si_3N_4), com sua estrutura nano composta com dureza ultra alta com 40 GPa. Também como característica apresenta alta resistência à oxidação por temperatura ($>1150^\circ\text{C}$) e tenacidade elevada. Os grãos da estrutura nano cristalina da camada são incrustados na matriz de Si_3N_4 , conforme se pode verificar na figura 3.10 e 3.11.

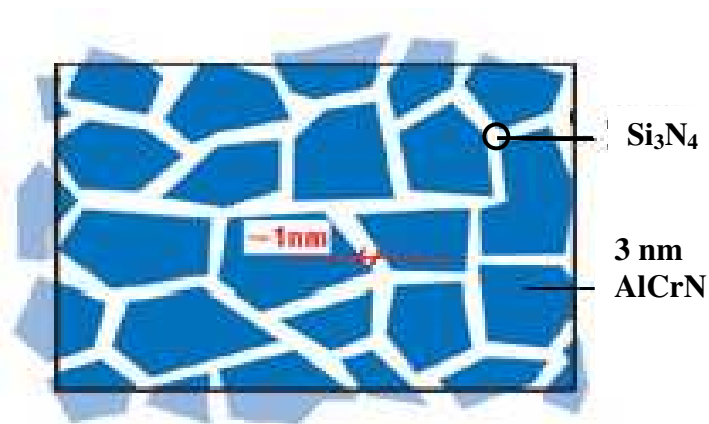


Figura 3.10 - Estrutura cristalina da camada da cobertura (esquemático) (PLATIT, 2008).

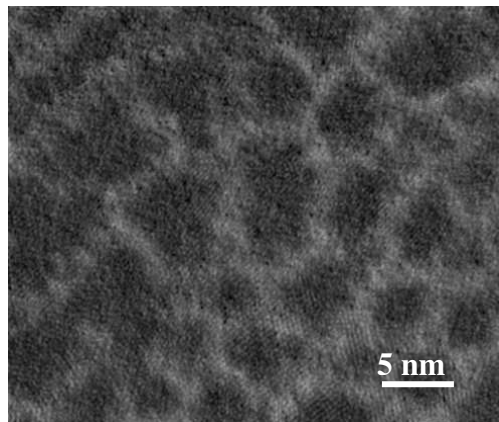


Figura 3.11 - Estrutura cristalina da cobertura (PLATIT, 2008).

A tabela 3.4 mostra as principais características da cobertura nACRo[®] (nc-AlCrN) / (a-Si₃N₄)

Tabela 3.4 - Características da camada nACRo[®]

Nome	Coloração	Nanodureza [GPa]	Espessura [μm]	Coeficiente de fricção	Temperatura máx. de aplicação [°C]
NACRo [®]	Cinza	40	1-7	0,35	1100

Segundo o fabricante, devido suas características, a cobertura tem desempenho acima das expectativas em usinagem HSC/HSM, usinagem de materiais endurecidos ou temperados e ferros fundidos, podendo trabalhar com ou sem refrigeração. Pode também ser empregada na usinagem convencional sem perda do desempenho sendo preferencialmente usada em ferramentas de metal duro. É disponível nas cores azul e cinza (GUIA de REVESTIMENTOS PLATIT, 2008).

Ainda segundo a Empresa que deposita este tipo de cobertura, a deposição de Silício (Si) na cobertura pode ser realizada em diferentes materiais para cobertura, como por exemplo, Titânio (Ti), Cromo (Cr), Alumínio (Al), entre outros. Esta nova estrutura não é completamente misturada, e uma segunda fase é criada. Por exemplo, na cobertura nACRo[®] uma camada de grãos nano cristalina de AlCrN é encrustada em uma matriz de nitreto de silício (Si₃N₄) e uma estrutura nano composta é criada.

O silício aumenta a tenacidade da cobertura, diminui a tensão residual interna da cobertura também mantém o bom grau de empacotamento da cobertura e evita o crescimento do grão, mantendo assim uma excelente dureza.

A figura 3.12 mostra a estrutura das coberturas universais (à direita), as coberturas nano compostas (central) e as estruturas nano compostas incrustadas em matriz de Nitreto de Silício (Si₃N₄).

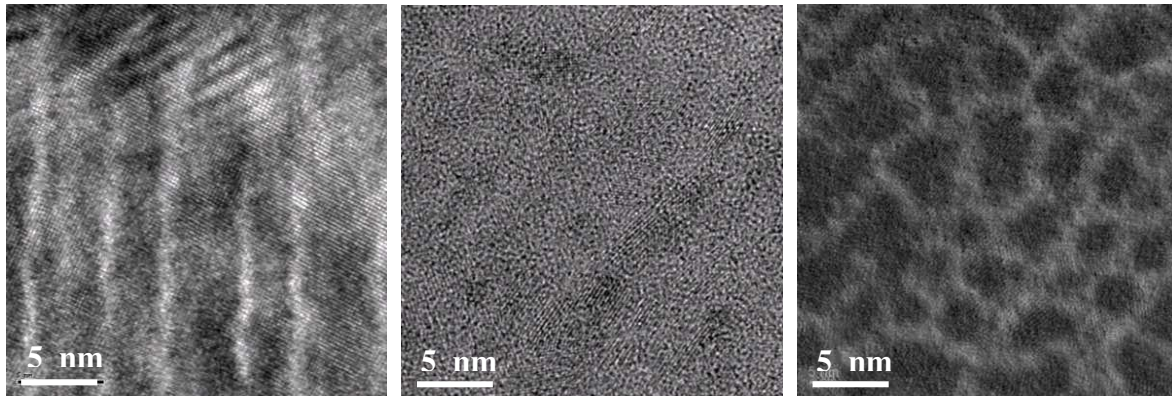


Figura 3.12 – Estruturas das coberturas das ferramentas de corte (PLATIT, 2008).

Os dois tipos de micro-geometrias de arestas de corte foram utilizados, denominadas A57 e F57, conforme mostra as figuras 3.13 e 3.14 respectivamente.

A geometria A57, não possui quebra-cavacos e tem chanfro de proteção da aresta principal de corte de 0,1 mm x 20°. Já a geometria F57 (desenvolvida para o ensaio) contém quebra-cavacos com 16° de ângulo de saída após uma fase plana de 0,16 mm mantendo o chanfro de proteção da aresta de 0,1mm x 20°.

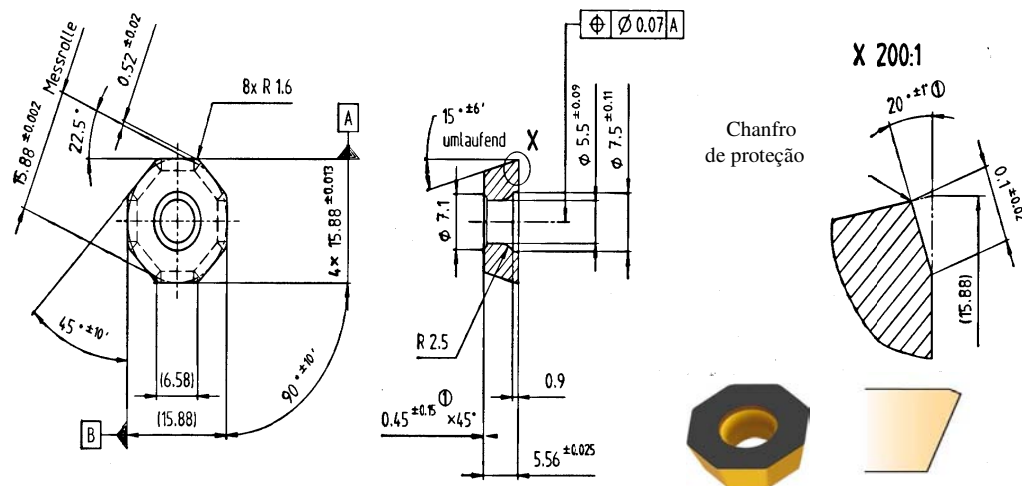


Figura 3.13 - Desenho de construção da pastilha de metal duro e cerâmica com micro geometria tipo A57 (WALTER AG, 2008).

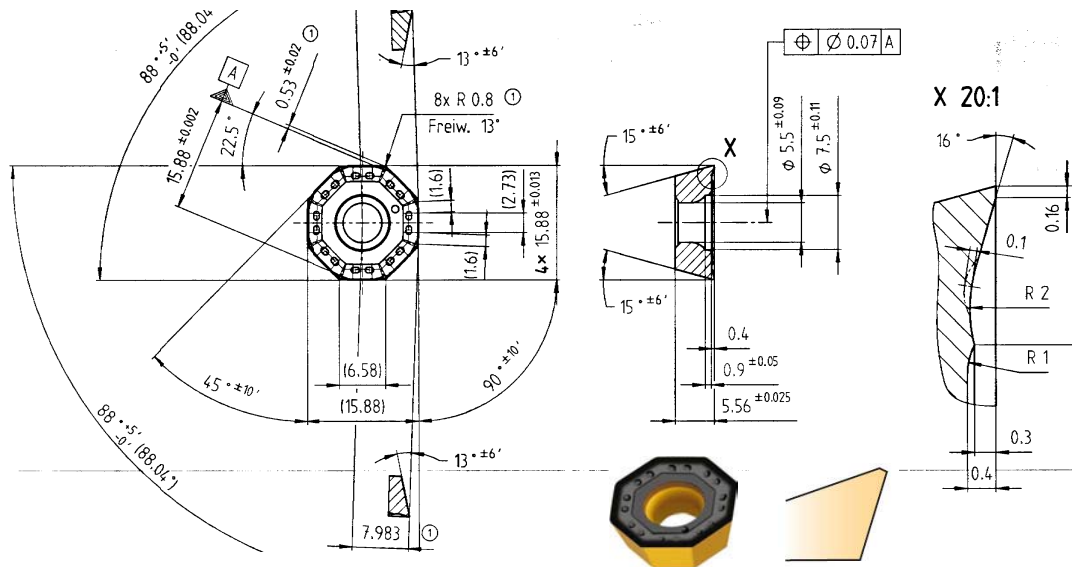


Figura 3.14 - Desenho de construção da pastilha de metal duro e cerâmica com micro geometria tipo F57 - geometria padrão. (WALTER AG, 2008)

3.7 - Procedimento Experimental

No presente trabalho foi adotado um critério de fim de vida útil baseado no desgaste de flanco máximo ($V_B \text{ máx} \geq 0,3 \text{ mm}$) em pelo menos três arestas de corte. No caso de lascamento em uma das pastilhas, foi determinado o fim da vida útil da ferramenta quando a extensão da lascamento fosse maior ou igual a 0,5 mm. A cada 10 passes (2500 mm usinados), o cabeçote era retirado da máquina para que os desgastes e/ou avarias de suas arestas de corte fossem medidos no microscópio óptico.

A figura 3.15 mostra os três pontos de análise do desgaste nas pastilhas. O ponto de análise nº 1 fica no vértice da aresta de corte (raio de ponta). O ponto de análise nº 2 fica a 0,5 mm do vértice da pastilha o que significa metade da profundidade de corte (a_p) do ensaio. O ponto de análise nº 3 fica a 1 mm do vértice da aresta de corte, o que significa o último ponto de contato entre peça e ferramentas. Esta é a área da pastilha onde se encontra o mecanismo de desgaste por oxidação, que é um possível gerador do desgaste tipo entalhe, o qual é muito comum na usinagem de ferro fundido (principalmente devido à casca dura e impurezas dos fundidos).

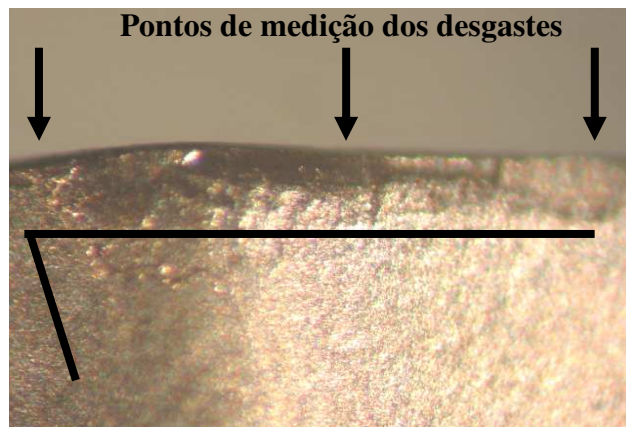


Figura 3.15 - Pontos de medição do desgaste na aresta de corte principal

A rugosidade das superfícies fresadas também foi analisada com o objetivo de verificar a influência das geometrias da aresta de corte na qualidade da peça usinada. A figura 3.16 mostra os pontos de medição para obter a rugosidade superficial (R_z). A medição foi realizada sempre no primeiro passe usinado pela ferramenta de corte do ensaio, e também realizado após o término do ensaio (após V_B máx. $\geq 0,3$ mm). Conforme visto na figura, dois pontos de medição da rugosidade foram avaliados no início da vida útil do ensaio após a primeira superfície fresada da ferramenta e dois pontos de medição após verificação do final de vida útil da ferramenta no ensaio (medição do desgaste no microscópio).

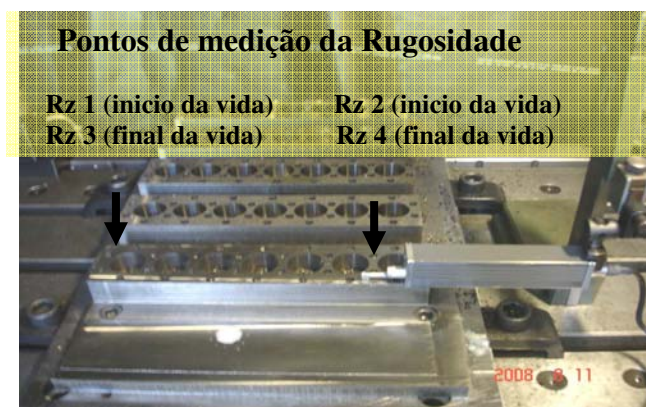


Figura 3.16 – Pontos de medição da rugosidade superficial

3.7.1 - Ensaio com Metal Duro

A tabela 3.5 mostra os valores das variáveis de entrada dos ensaios realizados com as pastilhas de metal duro. O avanço por dente (f_z) e a profundidade de corte (a_p), foram mantidas constantes em 0,1 mm e 1,0 mm respectivamente.

Tabela 3.5 - Valores das variáveis de entrada nos ensaios com ferramentas de metal duro

Nº Ensaio (repetições)	Geometria	Vc (m/min)	Repetição	Nrº blank usinado
1 (1.1, 1.2 e 1.3)	F57	350	3X	1/4/6/8
2 (2.1, 2.2, 2.3 e 2.4)	F57	280	4X	1/4/6
3 (3.1, 3.2 e 3.3)	A57	350	3X	1/4/6
4 (4.1, 4.2 e 4.3)	A57	280	3X	1/4/8

3.7.2 - Ensaio com Cerâmica

A tabela 3.6 mostra os valores das variáveis de entrada dos ensaios realizados com as pastilhas de cerâmica. O avanço por dente (f_z) e a profundidade de corte (a_p), foram mantidas constantes em 0,1 mm e 1 mm respectivamente.

Tabela 3.6 - Valores das variáveis de entrada nos ensaios com ferramentas de cerâmica.

Nº Ensaio (repetições)	Geometria	Cobertura	Vc (m/min)	Repetição	Nrº blank
5 (5.1 e 5.2)	F57	Sim	850	2X	1/5
6 (6.1 e 6.2)	F57	Sim	680	2X	1/5
7 (7.1, 7.2 e 7.3)	A57	Sim	850	3X	1/3/8
8 (8.1, 8.2 e 8.3)	A57	Sim	680	3X	1/3/8
9 (9.1, 9.2 e 9.3)	F57	Não	850	3X	1/3
10 (10.1 e 10.2)	F57	Não	680	2X	1/3
11 (11.1, 11.2 e 11.3)	A57	Não	850	3X	1/5/8
12 (12.1, 12.2 e 12.3)	A57	Não	680	3X	1/5/8

3.7.3 - Ensaios com velocidades de corte maiores

A tabela 3.7 mostra os valores das variáveis de entrada dos ensaios realizados com velocidade de corte maiores nas pastilhas de metal duro e cerâmica com cobertura na geometria de corte A57. O avanço por dente (f_z) e a profundidade de corte (a_p), foram mantidas constantes em 0,1 mm e 1,0 mm respectivamente.

Tabela 3.7 - Valores das variáveis de entrada nos ensaios com ferramentas de metal duro e cerâmica com cobertura com maiores velocidade de corte.

Nº Ensaio (repetições)	Geometria	Vc (m/min)	Repetição	Nrº blank usado
13 (13.1, 13.2 e 13.3)	Metal duro - A57	420	3X	8
14 (14.1, 14.2 e 14.3)	Cerâmica - A57 sem cobertura	1020	3X	8
15 (15.1, 15.2 e 15.3)	Cerâmica - A57 com cobertura	1020	3X	8
16 (16.1, 16.2 e 16.3)	Metal duro - A57	680	3X	9
17 (17.1, 17.2 e 17.3)	Metal duro - A57	850	3X	9

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Este capítulo abordará os resultados dos ensaios comparando a vida das pastilhas medida em tempo de corte e em volume de cavaco removido, a rugosidade da peça e potência de corte.

4.1 - Vida da ferramenta

4.1.1 - Pastilhas de metal duro

A figura 4.1 mostra a média aritmética da vida da ferramenta (em tempo de corte e em volume de cavaco removido), assim como suas dispersões nos ensaios realizados com as pastilhas metal duro. Pode-se verificar que a micro geometria de corte tem fundamental importância na usinagem do ferro fundido vermicular.

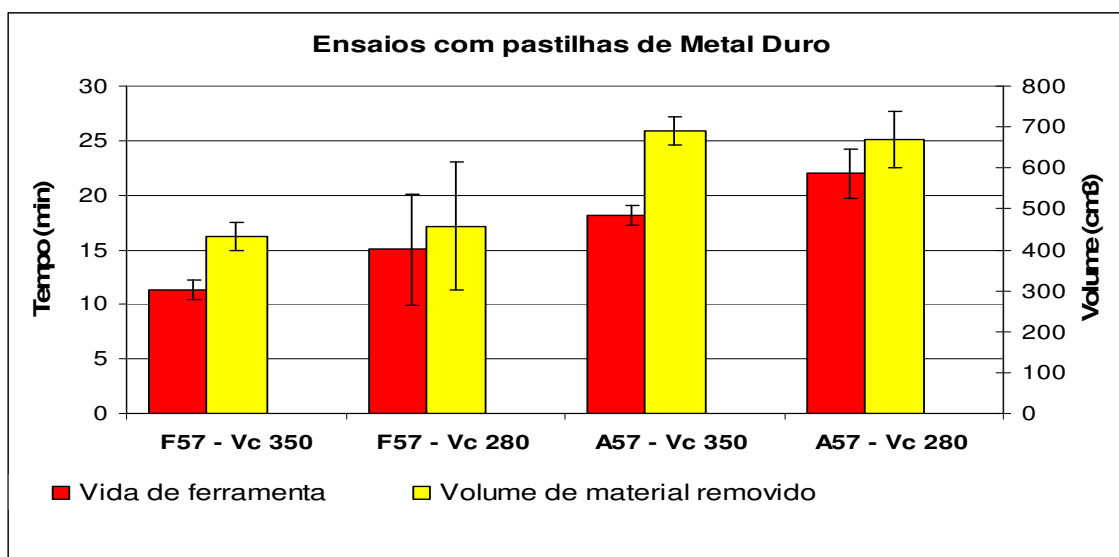


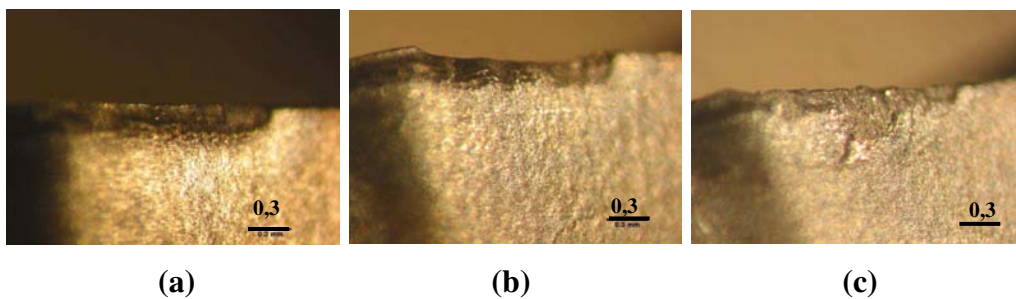
Figura 4.1 - Comparação da vida (em tempo de corte e em volume de cavaco removido nos ensaios com pastilhas de metal duro).

A geometria de corte A57 apresenta um melhor rendimento que a geometria F57 independente da velocidade de corte utilizada. Com velocidade de corte de 350 m/min, a geometria A57 foi 59,13% superior à geometria F57 e com velocidade de corte de 280 m/min essa superioridade foi de 46,21%. Assim, verifica-se que a micro geometria da aresta de corte tem influência direta na usinagem do ferro fundido vermicular. A chamada geometria “flat”, ou seja, lisa garante um melhor desempenho e segurança operacional quando comparada à geometria tipo F57 com ângulo de saída de +16°.

Quando analisamos a influência da velocidade de corte, há que se ressaltar o seguinte ponto. Com a redução da velocidade de corte de 350 para 280 m/min, a geometria F57 teve rendimento de 32,16% superior e a geometria A57 teve um incremento de vida útil de 21,42% em termos de tempo de corte. Porém, em termos de volume de cavaco removido, pode-se dizer que a variação da velocidade de corte não teve influência. Assim, é preferível utilizar velocidade de corte de 350 m/min, já que durante uma vida nesta velocidade a ferramenta remove o mesmo volume de cavaco em tempo menor quando comparada à velocidade de 280 m/min. Este resultado não concorda com a literatura (Diniz, Coppini e Marcondes, 2008) que afirma que a velocidade de corte, dentre todos os parâmetros de usinagem é o que mais influencia negativamente a vida da ferramenta.

As figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram as arestas de cortes após o término de vida útil dos ensaios (tabela 3.5) realizados com as geometrias F57 e A57.

A figura 4.2, mostra as ferramentas utilizadas nos ensaios realizados com pastilhas de metal duro, geometria de corte tipo F57 e velocidade de corte de 350 m/min. Verifica-se que no ensaio 1.1 (a) o desgaste de flanco se deu de uma forma mais uniforme. Nos ensaios 1.2 (b) e 1.3 (c) verifica-se um desgaste de flanco mais acentuado no ponto de medição nº 2. Há que se apontar também que, pelo menos nas ferramentas b e c da figura 4.2, as arestas estão bastante deterioradas, com formas bastante diferentes das originais.



**Figura 4.2 – Ensaio 1.1 (a), ensaio 1.2 (b) e ensaio 1.3 (c). Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de metal duro com cobertura.
Geometria F57, $v_c = 350$ m/min.**

A figura 4.3 mostra as ferramentas utilizadas nos ensaios realizados com pastilhas de metal duro, geometria de corte tipo F57 e velocidade de corte de 280 m/min. Verifica-se que o ensaio 2.3 (c) o desgaste de flanco ocorreu de uma forma ligeiramente mais uniforme quando comparado com os demais ensaios. No ensaio 2.4 (d) verifica-se um desgaste de flanco seguido de lasca no ponto de medição nº 2. Além disso, novamente as arestas já estão bastante deterioradas, com formas diferentes das originais.

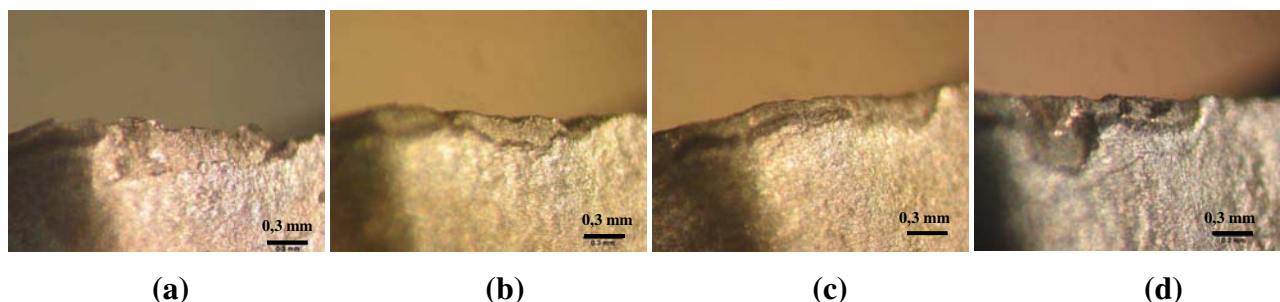


Figura 4.3 – Ensaio 2.1 (a), ensaio 2.2 (b), ensaio 2.3 (c) e ensaio 2.4 (d). Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de metal duro com cobertura. Fim da vida da ferramenta
Geometria F57, $v_c = 280$ m/min.

A figura 4.4 mostra as ferramentas utilizadas nos ensaios realizados com pastilhas de metal duro, geometria de corte tipo A57 e velocidade de corte de 350 m/min. Os desgastes ocorreram de forma homogênea para os três ensaios realizados. Diferentemente do ocorrido com as ferramentas mostradas nas figuras 4.2 e 4.3, nas ferramentas da figura 4.4, apesar dos desgastes apresentados, a forma da aresta é similar à das arestas originais, demonstrando que avarias do tipo micro lascamento não ocorreram nestas ferramentas, mas somente desgastes.

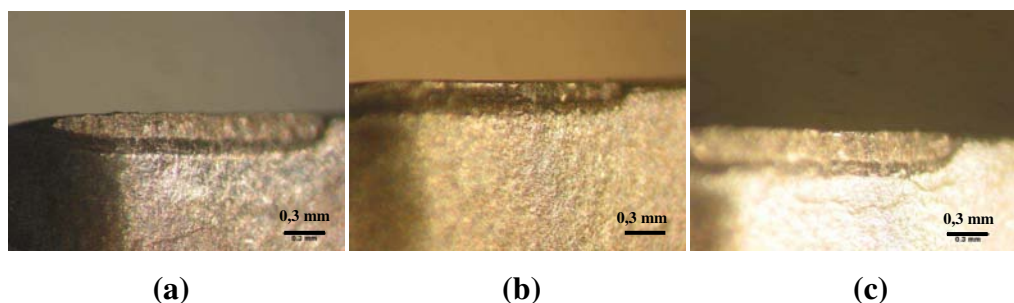


Figura 4.4 – Ensaio 3.1 (a), ensaio 3.2 (b) e ensaio 3.3 (c). Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de metal duro com cobertura. Fim da vida da ferramenta
Geometria A57, $v_c = 350$ m/min.

A figura 4.5 mostra as ferramentas utilizadas nos ensaios com pastilhas de metal duro, geometria de corte tipo A57 e velocidade de corte de 280 m/min. Os desgastes ocorreram de forma controlada para os três ensaios realizados, assim como os ensaios realizados com velocidade de corte de 350 m/min. De novo, não há indício de ocorrência de avarias nas ferramentas, mas somente desgastes.

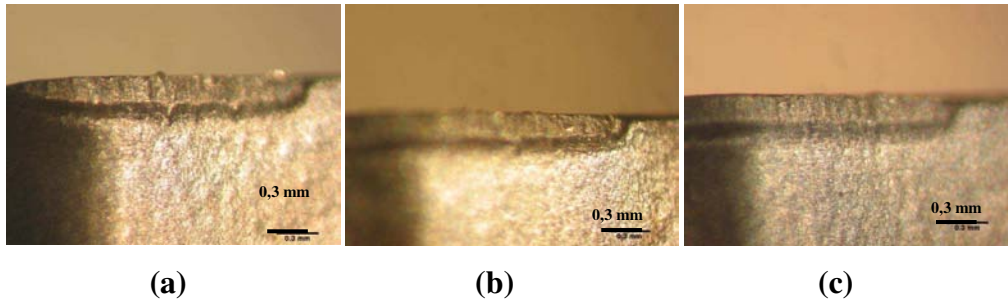


Figura 4.5 – Ensaio 4.1 (a), ensaio 4.2 (b) e ensaio 4.3 (c) Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de metal duro com cobertura. Fim da vida da ferramenta
Geometria A57, $V_c = 280$ m/min.

Já é possível apontar uma razão para maior vida das ferramentas com geometrias da aresta A57. A maior rigidez da aresta propiciou que avarias do tipo lascamento não ocorressem, mas somente desgastes, o que prolongou a vida das ferramentas em relação àquelas com aresta tipo F57.

4.1.2 - Pastilhas de cerâmica com cobertura

A figura 4.6 mostra a média aritmética da vida da ferramenta (em tempo de corte e em volume de cavaco removido) assim como suas dispersões nos ensaios realizados com as pastilhas de cerâmica com cobertura.

Similarmente ao que ocorreu nos ensaios com pastilhas de metal duro, nos ensaios realizados com as pastilhas de cerâmica com cobertura, o desempenho da pastilha com micro geometria tipo A57 em termos de vida da ferramenta foi melhor que da pastilha com geometria F57, independentemente da velocidade de corte.

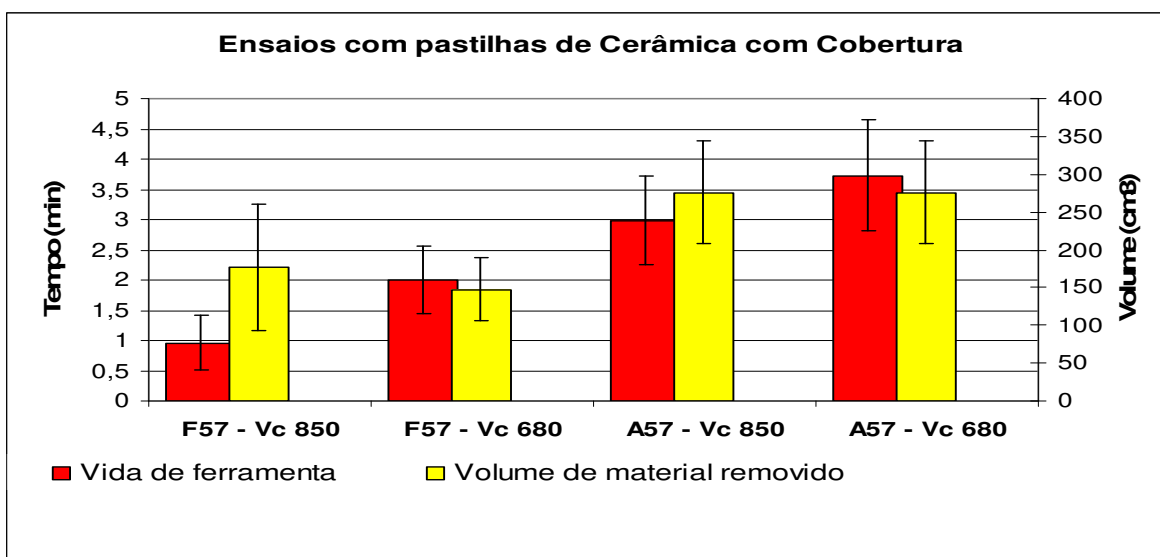


Figura 4.6 - Comparação da vida útil (em tempos de corte e em volume de cavaco removido) nos ensaios com pastilhas de cerâmica com cobertura

Com velocidade de corte de 850 m/min, a geometria A57 foi 210,41 % superior que a geometria F57 e com velocidade de corte de 680 m/min essa superioridade foi de 86,51%.

Similarmente ao que já ocorreu nos ensaios com ferramentas de metal duro, quando se aumentou a velocidade de corte, a vida da ferramenta em tempo de corte diminui, mas em volume de cavacos removidos permaneceu praticamente constante.

As figuras 4.7, 4.8, 4.9, e 4.10, mostram as arestas de cortes após o término de vida útil dos ensaios realizados com as geometrias F57 e A57 (tabela 3-6).

A figura 4.7 mostra os ensaios realizados com pastilhas de cerâmica com cobertura, geometria de corte tipo F57 e velocidade de corte de 850 m/min. Na figura 4.7 (a), verifica-se uma lasca na pastilha próxima ao ponto de análise de desgaste nº 2 que determinou o final de vida útil. Já na figura 4.7 (b), observamos também uma lasca, entretanto, próximo ao ponto de medição nº1.

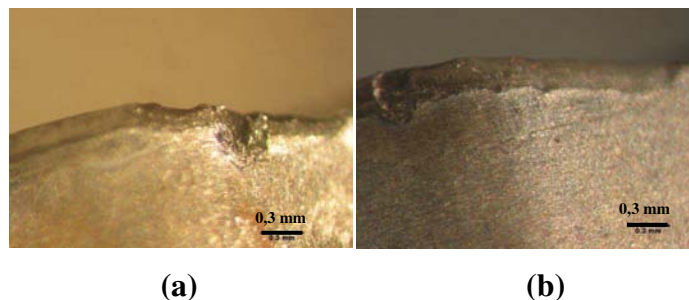


Figura 4.7 – Ensaio 5.1 (a) e ensaio 5.1 (b) – Aresta de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica recoberta. Fim da vida da ferramenta
Geometria F57, $v_c = 850$ m/min.

A figura 4.8 mostra as arestas de corte das ferramentas utilizada nos ensaios realizados com pastilhas de cerâmica com cobertura, geometria de corte tipo F57 e velocidade de corte de 680 m/min. Na figura 4.8 (a) verifica-se um desgaste mais uniforme da pastilha e uma lasca próxima ao ponto de análise de desgaste nº 3. Já na figura 4.8 (b), observamos uma grande lasca no ponto de medição nº3.

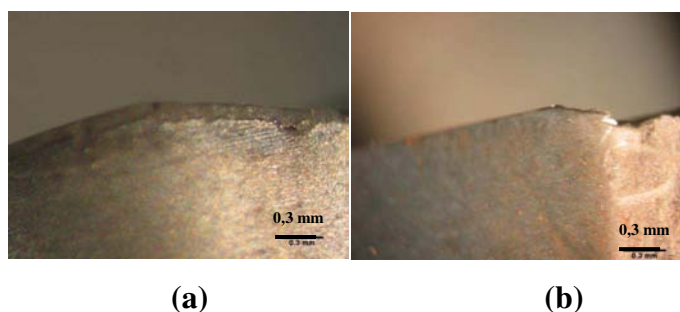


Figura 4.8 – Ensaio 6.1 (a) e ensaio 6.1 (b). Aresta de corte utilizada nos ensaios com ferramentas de cerâmica recoberta. Fim da vida da ferramenta
Geometria F57, $v_c = 680$ m/min.

A figura 4.9 mostra as arestas de corte utilizadas nos ensaios realizados com pastilhas de cerâmica com cobertura, geometria de corte tipo A57 e velocidade de corte de 850 m/min. Verifica-se na figura 4.9 (a) que o desgaste de flanco ocorreu de uma forma menos acentuada no ponto de análise nº 1 e uma melhor uniformidade nos pontos de análise nº 2 e nº 3. Nas arestas mostradas nas figuras 4.9 (b) e 4.9 (c) os desgastes ocorreram de forma uniforme, sem lascamento.

Um ponto importante a ser destacado, é que mesmo com um desgaste relativamente menor no ensaio 7.1, estando no limite para fim de vida útil apenas no ponto de análise nº 2, a vida útil foi 49,60% maior quando comparado com os ensaios nº 7.2 e 7.3.

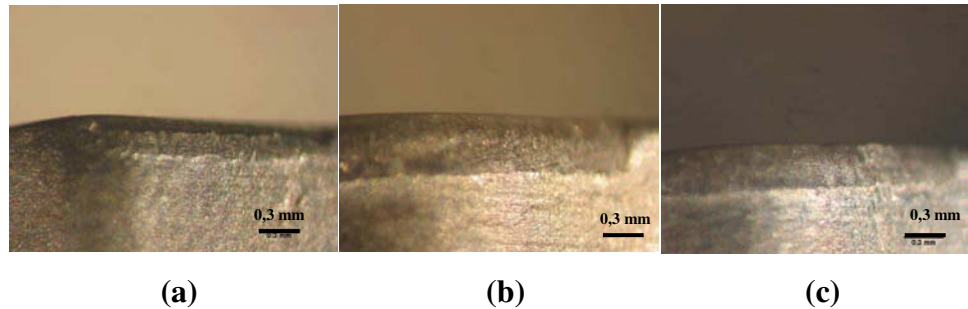


Figura 4.9 – Ensaio 7.1 (a), ensaio 7.2 (b) e ensaio 7.3 (c). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas cerâmicas com cobertura. Fim da vida da ferramenta
Geometria A57, $v_c = 850$ m/min.

A figura 4.10 mostra as arestas de corte das ferramentas utilizadas nos ensaios realizados com pastilhas de cerâmica com cobertura, geometria de corte tipo A57 e velocidade de corte de 680 m/min. Verifica-se que o ensaio 8.1 (a) apresenta pequenas lascas ao longo da aresta de corte.

Nos ensaios 8.2 e 8.3 os desgastes ocorreram de forma uniforme ao longo da aresta de corte e com valores iguais de vida útil.

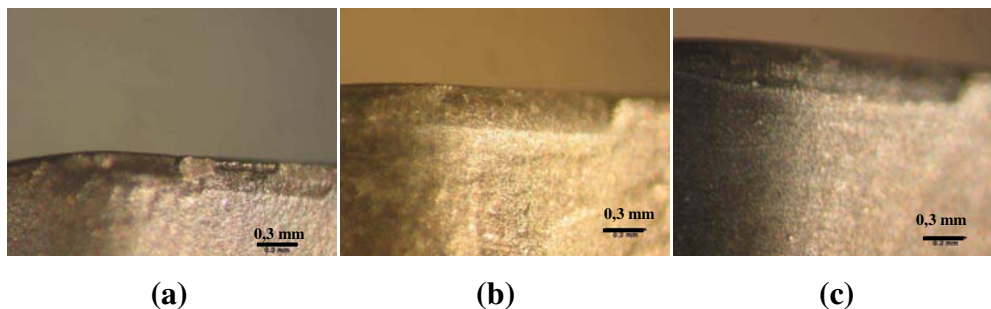


Figura 4.10 – Ensaio 8.1 (a), ensaio 8.2 (b) e ensaio 8.3 (c) Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica recoberta. Fim de vida da ferramenta
Geometria A57, $v_c = 680$ m/min.

Similarmente ao que havia ocorrido quando se utilizou ferramentas de metal duro, pode-se afirmar que nas ferramentas com cobertura com geometria A57 ocorreram principalmente

desgastes enquanto nas ferramentas com geometrias F57, que é mais positiva, portanto, com menor ângulo de cunha e menor rigidez da aresta de corte, ocorreram mais avarias. Esta é, com certeza, uma das razões para as maiores vidas de ferramentas quando se utilizou a geometria A57. É importante comentar que a maior rigidez da aresta A57 compensou a suposta falta de tenacidade da ferramenta cerâmica quando comparada ao metal duro e propiciou que ela suportasse bem todos os choques do tipo de fresamento utilizado nos ensaios, sem sofrer avarias do tipo trinca e/ou lascas.

4.1.3 - Pastilhas de cerâmica sem cobertura

A figura 4.11 mostra a média aritmética da vida da ferramenta (em tempo de corte e em volume de cavaco removido) assim como suas dispersões nos ensaios realizados com as pastilhas de cerâmica sem cobertura.

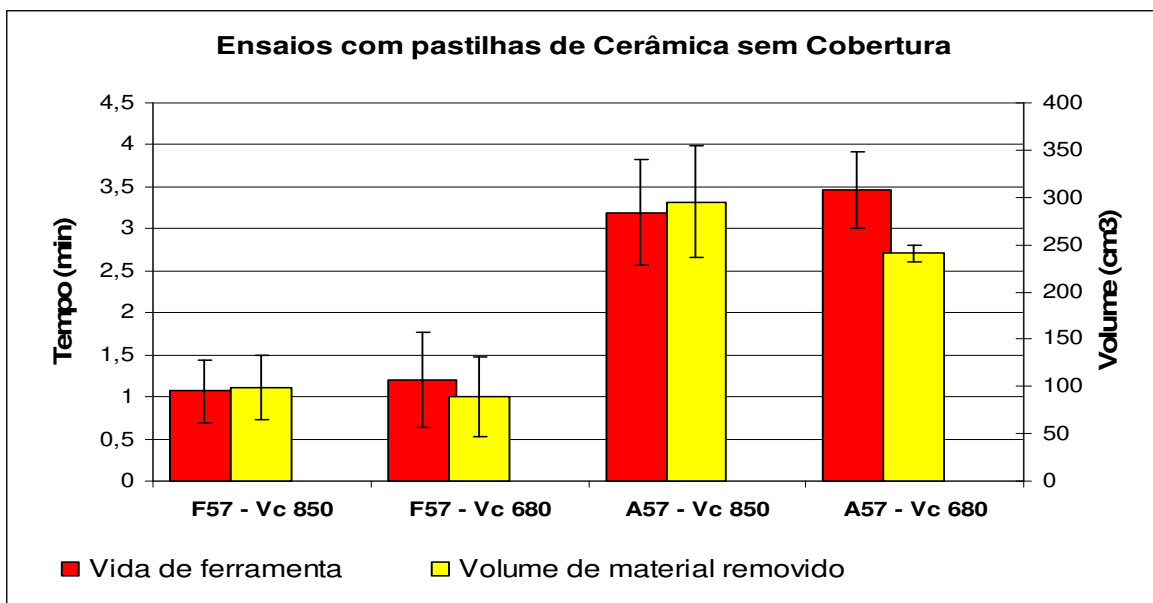


Figura 4.11 - Comparação da vida útil (em tempo de corte e em volume de cavaco removido) nos ensaios com pastilhas de cerâmica sem cobertura

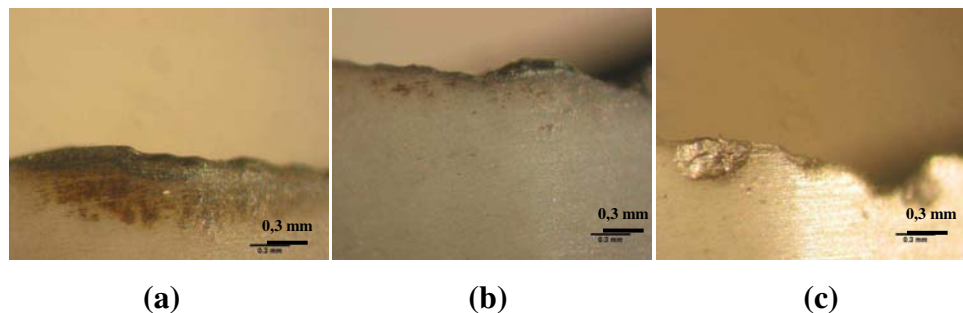
Novamente a geometria da ferramenta teve forte influência na vida da ferramenta. A geometria de corte A57 apresenta um melhor rendimento que a geometria F57 independente da velocidade de corte utilizada. Com velocidade de corte de 850 m/min, a geometria A57 foi

199,06 % superior que a geometria F57 e com velocidade de corte de 680 m/min essa superioridade foi de 188,33%.

A influência da velocidade de corte na vida da ferramenta novamente, contrariou a literatura (Diniz, Coppini e Marcondes, 2008). Com a variação da velocidade de corte de 850 para 680 m/min, a geometria F57 teve rendimento de 12,14% superior e a geometria A57 teve um incremento de vida útil de 8,12% em termos de tempo de corte. Estes valores não são estatisticamente significativos, dada à dispersão dos resultados. Em termos de volume de cavaco removido por vida da ferramenta, a redução da velocidade de corte provocou até uma certa redução da vida da ferramenta que, novamente não é estatisticamente significativa.

As figuras 4.12, 4.13, 4.14, e 4.15, mostram as arestas de cortes após o término de vida útil dos ensaios realizados com as geometrias F57 e A57 (tabela 3.6).

As figuras 4.12 e 4.13 mostram a aresta de corte após o término da vida útil dos ensaios com a pastilha de cerâmica sem cobertura, geometria de corte F57 e velocidade de corte de 850 e 680 m/min respectivamente. Todas as figuras apresentam lascas ao longo da aresta de corte.



**Figura 4.12 – Ensaio 9.1 (a), ensaio 9.2 (b) e ensaio 9.3 (c). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica sem cobertura. Fim da vida da ferramenta
Geometria F57, $v_c = 850$ m/min.**

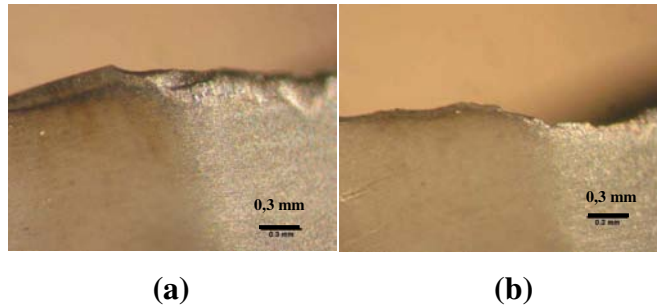


Figura 4.13 – Ensaio 10.1 (a) e ensaio 10.1 (b). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica sem cobertura. Fim da vida da ferramenta
Geometria F57, $v_c = 680$ m/min.

A figura 4.14 mostra a aresta de corte após o término da vida útil dos ensaios com a pastilha de cerâmica sem cobertura, geometria de corte A57 e velocidade de corte de 850 m/min. Verifica-se um desgaste de flanco uniforme das pastilhas nos três ensaios realizados.

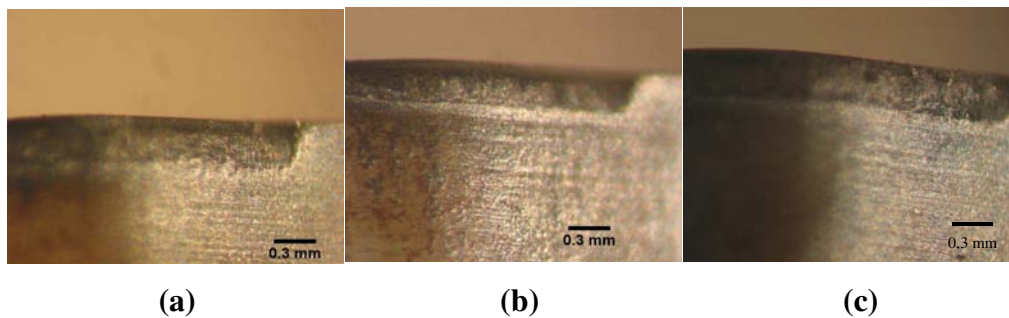


Figura 4.14 – Ensaio 11.1 (a), ensaio 11.2 (b) e ensaio 11.3 (c). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica sem cobertura. Fim da vida da ferramenta
Geometria A57, $v_c = 850$ m/min.

A figura 4.15 mostra a aresta de corte após o término da vida útil dos ensaios com a pastilha de cerâmica sem cobertura, geometria de corte A57 e velocidade de corte de 680 m/min. Assim como na figura 4.14, verifica-se um desgaste de flanco uniforme das pastilhas nos três ensaios realizados.

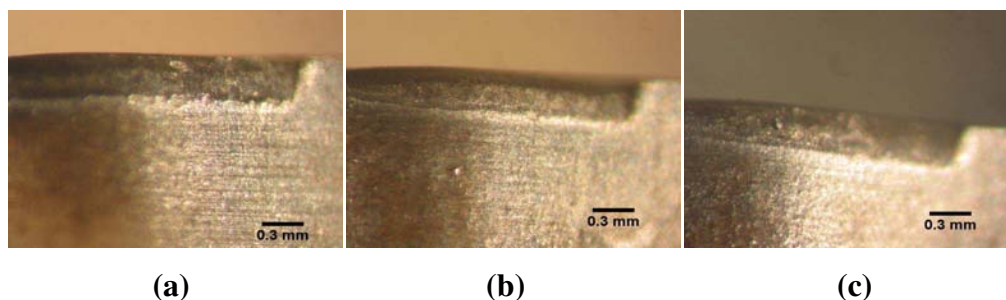


Figura 4.15 – Ensaio 12.1 (a), ensaio 12.2 (b) e ensaio 12.3 (c). Arestas de corte utilizadas nos ensaios com ferramentas de cerâmica sem cobertura. Fim da vida da ferramenta
Geometria A57, $v_c = 680$ m/min.

Similarmente ao que havia ocorrido quando se utilizou ferramentas de metal duro e também quando se utilizou ferramentas de cerâmica com cobertura, pode-se afirmar que nas ferramentas de cerâmica sem cobertura com geometria A57 ocorreram principalmente desgastes, enquanto nas ferramentas com geometria F57, que é mais positiva e, portanto com menor ângulo de cunha e menor rigidez da aresta, ocorrem mais avarias. Esta é, com certeza, uma das razões para as maiores vidas de ferramentas quando se utilizou a geometria A57.

Como visto nas figuras 4.1, 4.6 e 4.11, a velocidade de corte praticamente não influenciou a vida da ferramenta, pelo menos quando ela é medida em volume de cavaco removido, independentemente do material e da geometria da ferramenta, o que como citado, não está de acordo com o encontrado na literatura. Os ensaios também mostraram que a geometria de corte tem fundamental importância na usinagem do ferro fundido vermicular, sendo que as geometrias mais positivas (com ângulo de saída) tendem a fragilizar a aresta de corte, principalmente nas pastilhas de cerâmica, causando desgastes prematuros, e também avarias como lascas e quebras.

A comparação do desempenho das ferramentas de metal duro com as ferramentas de cerâmica utilizadas fica prejudicada devido a diferentes velocidades de corte utilizadas, mas há que se ressaltar que, enquanto a ferramenta de metal duro com melhor desempenho conseguiu remover perto de 700 cm^3 de cavaco por vida (figura 4.1), a ferramenta cerâmica com melhor desempenho removeu algo em torno de 300 cm^3 , apontando para o fato que a ferramenta de metal duro deve ser realmente a mais indicada para este tipo de corte. Este assunto será novamente abordado quando se comparar os resultados de vida da ferramenta em velocidades de corte idênticas (item 4.4.1).

4.2 - Acabamento superficial

Entre todas as operações da usinagem de um bloco de motor, aquelas de acabamento da face de fogo e face do cárter são de extrema importância, visto que, por exemplo, num motor de caminhão seis cilindros lineares com 1060 mm de comprimento e largura de 220 mm, a rugosidade da face de fogo é de no máximo de R_z 10 μ m e $R_{\text{máx}}$ 16 μ m para um *cut off* de 0,8 mm. A tolerância de planeza para este mesmo comprimento é de 0,04 mm e de paralelismo 0,02 mm entre a face do fogo e a linha de centro do furo do virabrequim.

A figura 4.16 mostra os valores médios de rugosidade encontrados nos ensaios com as pastilhas de metal duro. O método de medição da rugosidade foi abordado no capítulo 3 na figura 3.17 e a sequência dos ensaios foi abordada no capítulo 3, tabela 3.6 e 3.7.

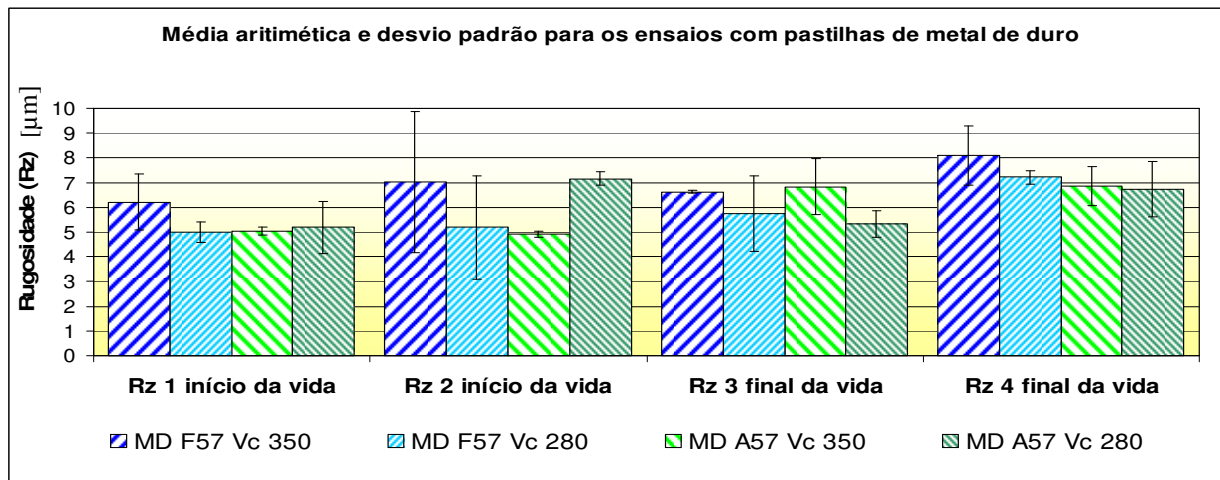


Figura 4.16 - Rugosidade da peça obtida com pastilhas de metal duro

Em linhas gerais, a forma do desgaste não influenciou na rugosidade. As ferramentas F57, que apresentaram desgastes irregulares e lascamento, não geraram maiores rugosidades na peça que as ferramentas A57, que apresentaram desgastes regulares. Somente nos ensaios com a ferramenta F57 e $v_c = 350$ m/min pode-se dizer que a rugosidade foi um pouco maior em 2 das medições (entrada da peça - R_{z1} - no início da vida e saída da peça - R_{z4} - no fim da vida da ferramenta). Isto é função do fato que a responsável pela rugosidade da peça não é a aresta principal de corte, onde os desgastes foram medidos, mas sim a aresta secundária, em que praticamente não ocorreram desgastes.

A velocidade de corte também não influenciou na rugosidade. Em alguns casos a diminuição das velocidades causou diminuição da rugosidade (exemplo, ferramenta F57, medição R_{z1}) e em outros casos gerou o aumento da rugosidade (exemplo, ferramenta A57, medição R_{z2}).

Em início de vida útil, esperava-se que a geometria mais positiva (F57) atingisse uma melhor rugosidade, o que não ocorreu. A geometria F57 gerou maior rugosidade e desvio quando comparado com a geometria de corte A57 (0° de ângulo de saída). Também não se pode dizer que o crescimento do desgaste da ferramenta influenciou na rugosidade, já que os valores em início e em fim de vida são similares, principalmente levando-se em conta as dispersões dos resultados. Isto se deve novamente ao fato de que a aresta secundária de corte, responsável pela geração da rugosidade praticamente não se desgastou.

A figura 4.17 mostra os valores médios de rugosidade encontrados nos ensaios com as pastilhas de cerâmica com e sem cobertura.

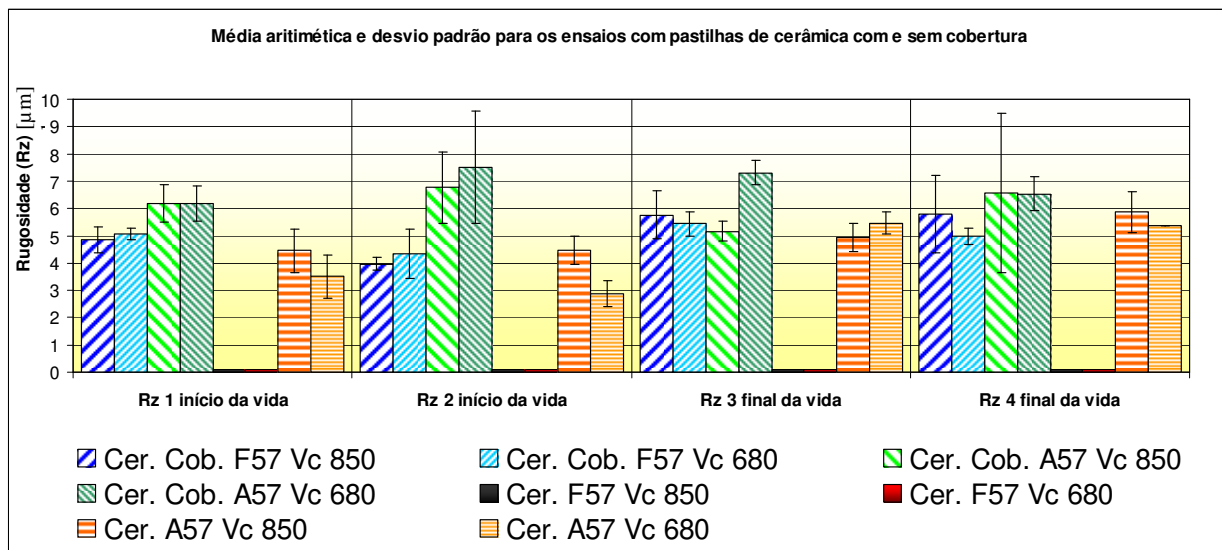


Figura 4.17 - Rugosidade da peça obtida com pastilhas de cerâmica com e sem cobertura

Diferentemente dos ensaios com pastilhas de metal duro, nos ensaios com pastilhas de cerâmica com e sem cobertura, a diferença da qualidade superficial é mais fácil de ser analisada. Nos ensaios com geometria A57, no início da vida da ferramenta, independentemente da velocidade de corte, é encontrado um melhor desempenho na usinagem com pastilhas sem cobertura. Esse fenômeno pode ser explicado pelo menor coeficiente de atrito da pastilha sem

cobertura quando comparado com a pastilha com cobertura e também em função da geometria sem cobertura não ter o arredondamento da aresta deixado pela aplicação da cobertura.

Nos ensaios realizados com as ferramentas com cobertura, a geometria F57, gerou rugosidade menor, pelo menos em início de vida, devido provavelmente ao seu maior ângulo de saída e, conseqüentemente, sua aresta mais afiada. Novamente os desgastes da ferramenta não geraram aumento na rugosidade da peça, isto é, os valores de rugosidade em início e fim de vida são similares. Isso se deve, principalmente, ao fato de que a aresta secundária de corte, cujo desgaste era mínimo, é a responsável pelo alisamento da superfície usinada e, conseqüentemente, pela sua rugosidade.

É importante notar que de todas as condições proporcionaram valores de rugosidade R_z menores que o limite usualmente exigido na superfície da face de fogo de um bloco de motor ($R_z = 10 \mu\text{m}$).

Para os ensaios com pastilha de cerâmica sem cobertura e geometria F57, não realizamos a medição da rugosidade inicial e final, devido à baixa vida útil da ferramenta.

A figura 4.18 mostra os valores médios gerais e desvio padrão de rugosidade encontrados nos ensaios com as pastilhas de metal duro, cerâmica com e sem cobertura.

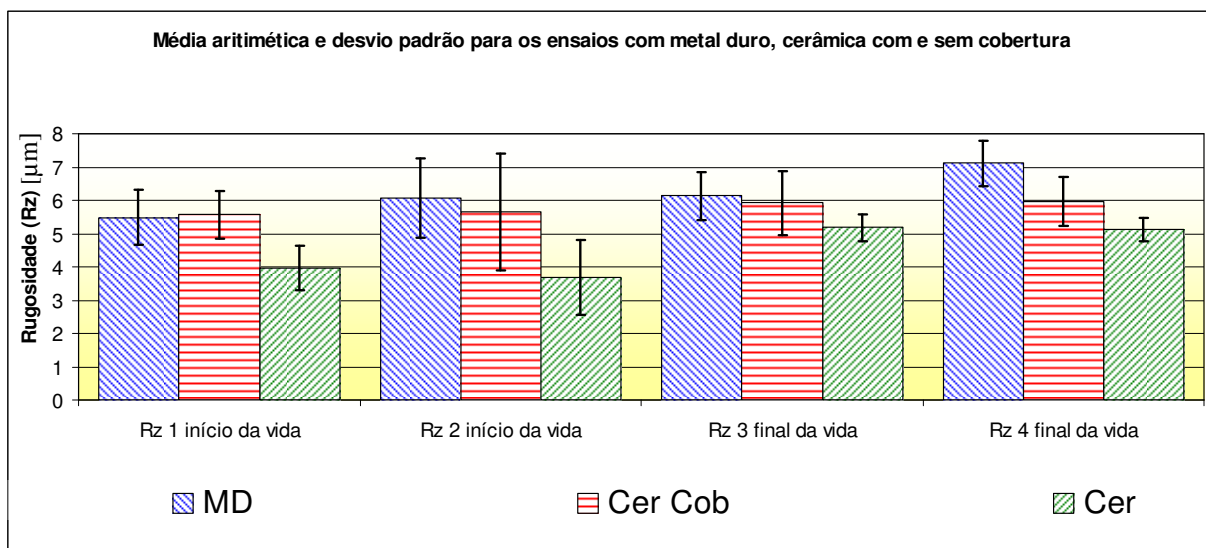


Figura 4.18 – Rugosidade com pastilhas de metal duro e cerâmica.

Em geral, realizando a média aritmética e desvio padrão entre os ensaios realizados com as duas geometrias de corte, as pastilhas de cerâmica com cobertura apresentaram uma menor variação da rugosidade nos quatro pontos de análise, não sendo superior a $0,4\text{ }\mu\text{m}$. Já com as pastilhas de metal duro essa variação foi de $1,62\text{ }\mu\text{m}$ e $1,50\text{ }\mu\text{m}$ com pastilha de cerâmica sem cobertura. Na média a ferramenta cerâmica sem cobertura gerou menores valores de rugosidade. Muito provavelmente isto ocorreu porque a ausência da cobertura (que estava presente nos outros 2 tipos de ferramentas) fez com que a aresta ficasse mais afiada, o que facilitou na deformação do cavaco e, assim diminuiu a rugosidade.

4.3 - Potência de corte

A potência de corte tem importante influência no processo de fresamento de bloco de motores. Com o aumento dos desgastes, a área de contato entre peça e ferramenta e a deformação do cavaco aumentam e, conseqüentemente o consumo de potência necessária para a realização do corte do material. Outro importante ponto a ser analisado principalmente pensando em longo prazo (e se a máquina não é bem dimensionada para a operação), é o fator da estabilidade da máquina durante a usinagem e manutenção, que é afetado pelo desgaste nos barramentos, rolamentos, guias, motores, etc.

As figuras 4.19 e 4.20 mostram o consumo de potência no início e final de vida útil para os ensaios com pastilhas de metal duro, cerâmica com e sem cobertura nas geometrias F57 e A57.

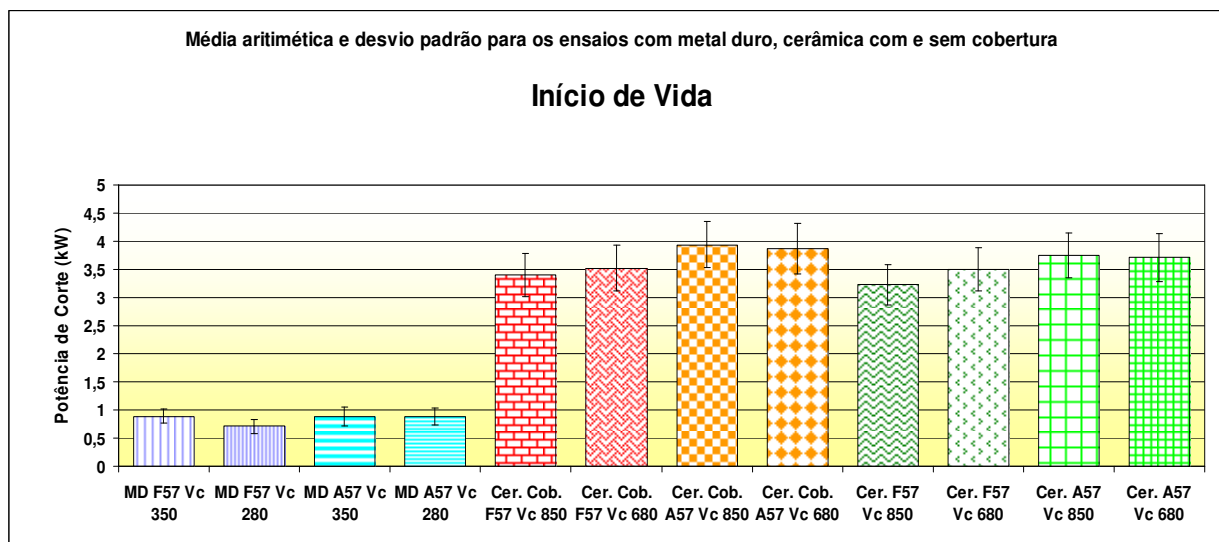


Figura 4.19 – Potência de corte no início de vida útil para ensaios com pastilhas de metal duro e cerâmica.

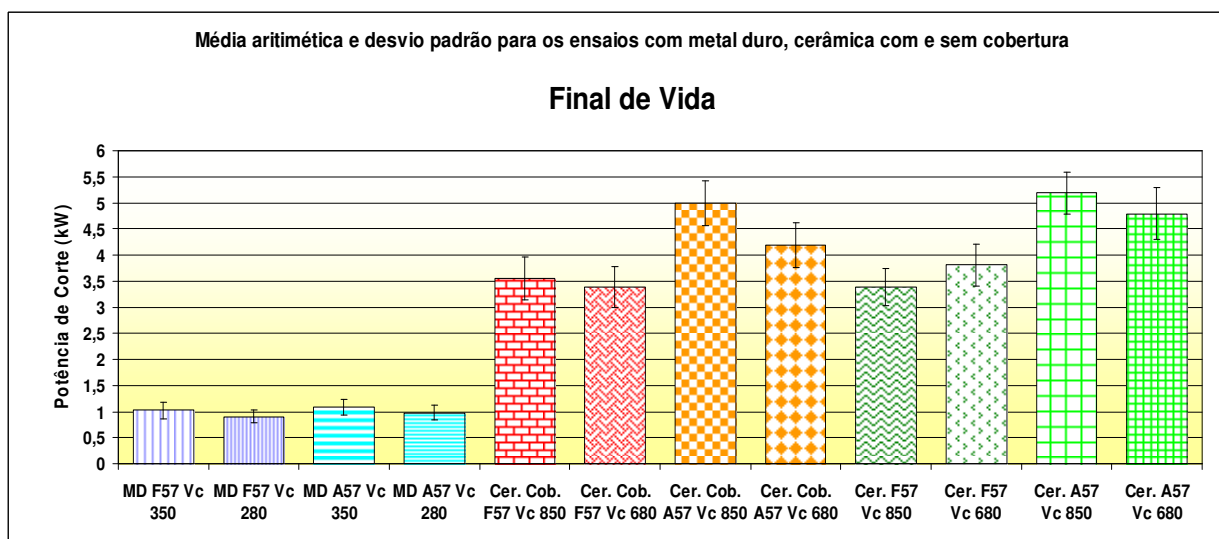


Figura 4.20 – Potência de corte no final de vida útil para ensaios com pastilhas de metal duro e cerâmica.

Para os ensaios realizados com as pastilhas de metal duro, independente da geometria de corte e velocidade de corte, a variação da potência de corte entre o início e o fim da vida da ferramenta não foi superior a 0,37 kW.

O fresamento feito com pastilhas cerâmicas gerou potência média aproximadamente 4 vezes maior que o fresamento feito com metal duro. Parte desta diferença se deve ao aumento da

velocidade de corte. Mas como a diferença entre as velocidades de corte utilizadas nos ensaios com estes 2 tipos de ferramentas não foi tão acentuada, nem toda esta variação pode ser atribuída ao acréscimo da velocidade. Como as geometrias das arestas são idênticas para as ferramentas dos 2 materiais, a maior potência consumida tem que ser atribuída também a um suposto aumento do coeficiente de atrito entre a ferramenta, peça e cavaco.

A presença da cobertura pouco influenciou na potência de corte. Vê-se na figura 4.11 que, no início da vida da ferramenta, os valores de potência variam de 3 a 4 kW, tanto para as ferramentas cerâmicas sem cobertura, quanto para as com cobertura. Também no fim da vida da ferramenta, a potência de corte variou entre 3,3 e 5,2 kW, independente da presença (ou não) da cobertura. Portanto, a suposta diminuição do coeficiente de atrito da ferramenta causada pela cobertura não ocorreu. Ainda abordando a usinagem com pastilhas cerâmicas, independentemente da presença ou não da cobertura, verifica-se um maior consumo de potência na usinagem com as pastilhas com geometria A57 quando comparado com a geometria F57. Isso se explica pelo maior esforço de corte gerado pela geometria mais negativa da pastilha A57 (0° de ângulo de saída).

A variação de potência de corte entre o início e o fim da vida útil da ferramenta foi de 0,58 kW para as pastilhas de cerâmica com geometria F57 e de 1,48 kW para as pastilhas de cerâmica com geometria tipo A57. Assim, claramente verificamos que principalmente para a geometria A57 (geometria que obtivemos melhor vida independente do material da ferramenta) com o aumento dos desgastes (seja ele pelo mecanismo de abrasão ou difusão) e conseqüentemente o final da vida, temos o aumento do esforço de corte na ferramenta e na potência de corte consumida pela máquina.

4.4 - Ensaios com maiores velocidades de corte

Conforme estudado no item 4.1, verificamos que a geometria de corte tem fundamental importância na vida útil da ferramenta de corte no fresamento de ferro fundido vermicular.

A geometria de corte tipo A57 apresentou excelente estabilidade tanto na usinagem com as pastilhas de metal duro, quanto na usinagem com as pastilhas de cerâmica. Os desgastes de flanco ocorreram de forma homogênea em toda a área de contato entre peça e ferramenta, gerando uma extrema segurança operacional para o processo de usinagem. Não foi verificado avarias, como por exemplo, pequenas lascas, trincas e possíveis quebras neste tipo de geometria.

Porém em todas as geometrias de ferramentas e materiais de corte ensaiados, o aumento da velocidade de corte gerou a diminuição da vida da ferramenta quando medida no tempo de corte, mas em termo de volume de cavaco removido por vida, ela se manteve estável ou até mesmo cresceu com a velocidade de corte. Assim realizou-se uma bateria de ensaios com velocidade de corte ainda maior, para verificar se esta tendência continuaria. Estes ensaios foram realizados somente com a ferramenta de geometria A57, já que esta geometria foi a que apresentou o melhor desempenho na 1° fase.

O objetivo deste novo ensaio é de verificar o limite de velocidade de corte que pode ser utilizado para cada material de corte, isto é, até que o ponto a influência da velocidade de corte na vida da ferramenta medida em volume de cavaco removido vai ser desprezível.

A figura 4.21 mostra os resultados dos ensaios realizados com a pastilha de metal duro geometria de corte A57 e velocidade de corte de 420 m/min. Para que uma comparação com os outros resultados anteriores pudesse ser feita, a figura mostra também os resultados obtidos com as velocidades de corte 280 e 350 m/min.

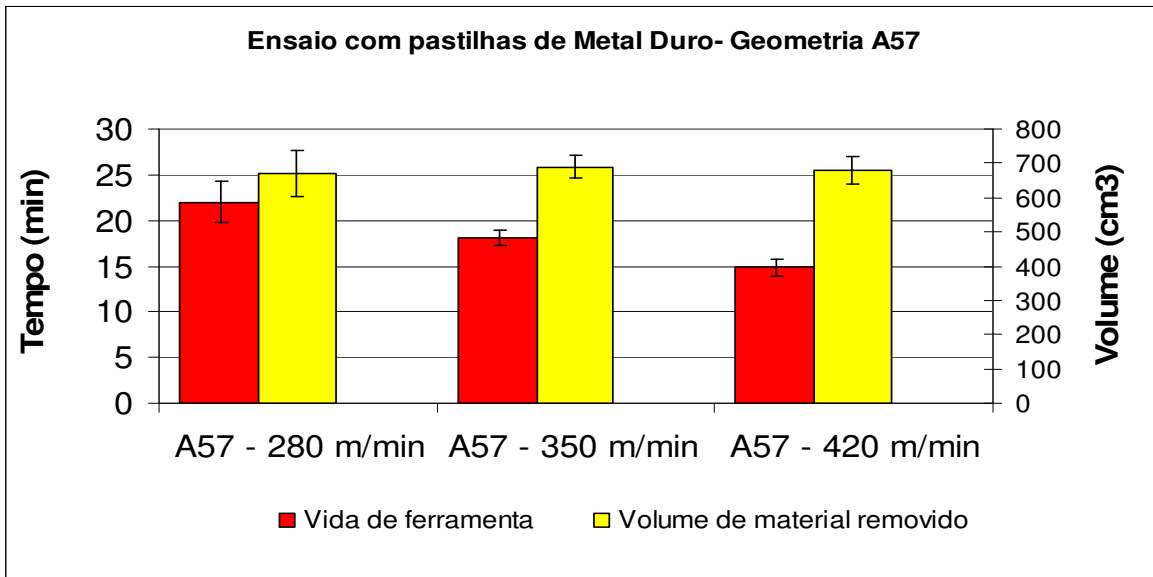


Figura 4.21 - Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas de metal duro e geometria A57.

Mesmo com velocidade ainda maiores ($v_c = 420$ m/min), pode-se afirmar que a tendência continua a mesma, isto é, o aumento da velocidade de corte causa diminuição da vida da ferramenta medida em tempo de corte, mas não influencia quando a vida é medida em volume de cavaco removido.

A figura 4.22 mostra os resultados dos ensaios realizados com a pastilha de cerâmica com cobertura, geometria de corte A57 e velocidade de corte de 1020 m/min.

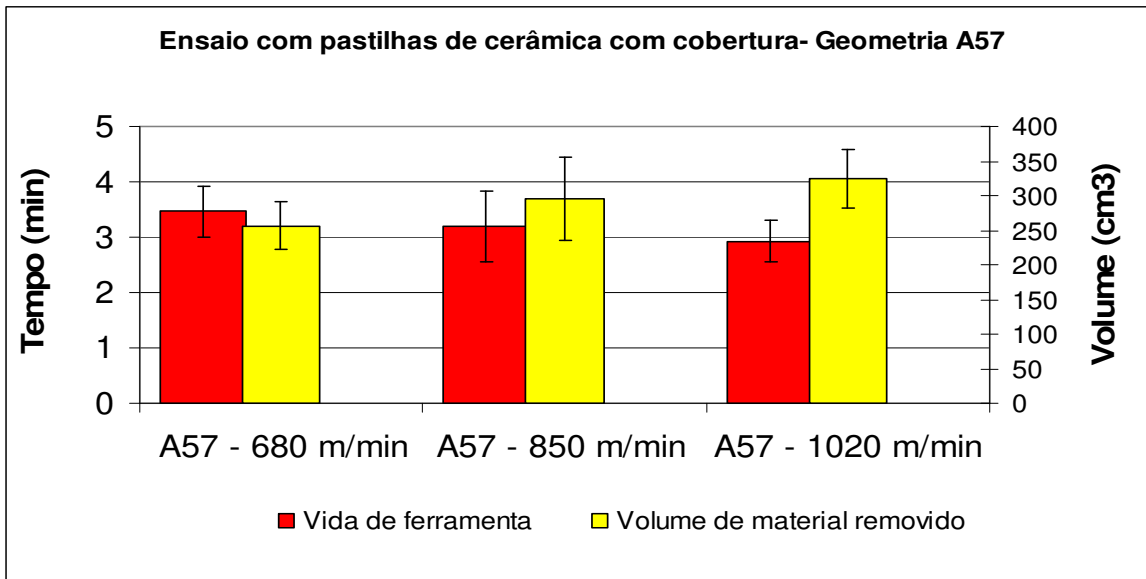


Figura 4.22 – Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas de cerâmica com cobertura e geometria A57.

Quando se utilizou ferramenta de cerâmica com cobertura, a tendência de aumento de vida da ferramenta medida em volume de cavaco removido com a velocidade de corte continuou.

A figura 4.23 mostra os resultados dos ensaios realizados com a pastilha de cerâmica sem cobertura, geometria de corte A57 e velocidade de corte de 1020 m/min.

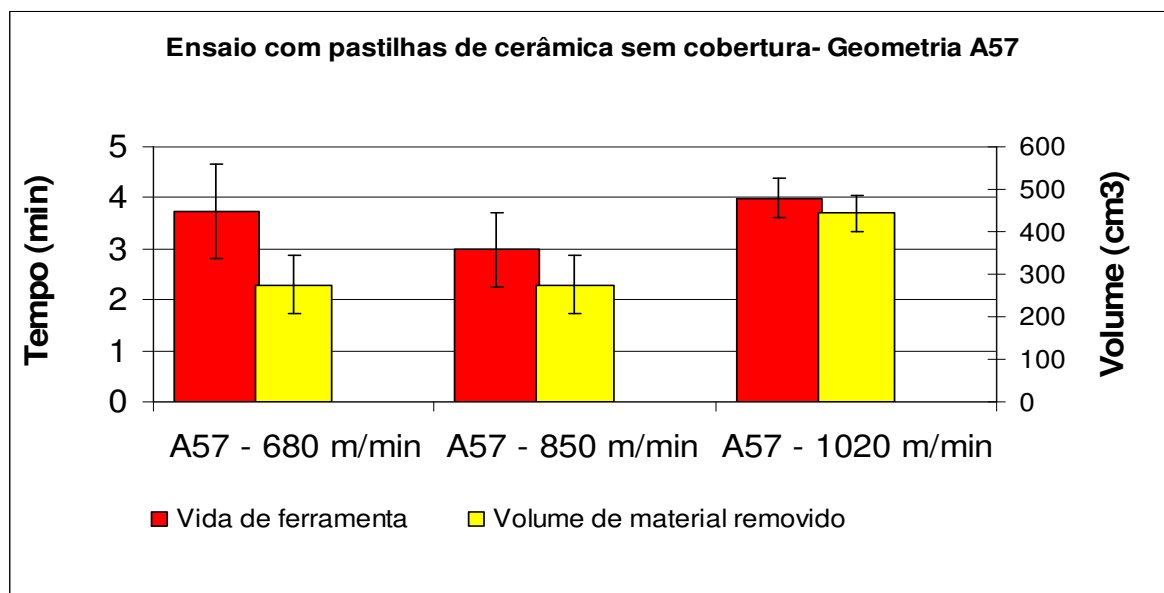


Figura 4.23 – Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas de cerâmica sem cobertura e geometria A57.

A vida da ferramenta medida em termos de volume de cavaco removido, que havia permanecido constante quando se passou de v_c 680 para 850 m/min, aumentou quando a velocidade utilizada foi 1020 m/min. Neste caso, até mesmo a vida medida em tempo de corte aumentou quando se utilizou $v_c = 1020$ m/min.

Os resultados mostrados nas figuras 4.21, 4.22 e 4.23 demonstram que as ferramentas utilizadas são bastante resistentes ao aumento da temperatura que, com certeza ocorreu quando se aumentou a velocidade de corte e também resistente a maior energia de impacto da aresta contra a peça que ocorre quando se aumenta a velocidade de corte. Procurar-se-á maiores detalhes de como isto ocorrem, quando se fizer a análise dos desgastes da ferramenta em microscópio eletrônico de varredura (item 4.4.2).

4.4.1 - Ensaios com metal duro nas mesmas condições de corte da cerâmica.

Após verificarmos que com o aumento da velocidade de corte de 280 para 420 m/min, com as pastilhas de metal duro, tivemos uma queda de 32,34 % em vida útil da ferramenta medida em tempo de corte, mas manteve-se a vida medida em volume de cavaco removido, decidiu investigar até onde iria esta tendência e, assim, realizou-se os ensaios com a pastilha de metal duro e geometria A57 com velocidades de corte que também haviam sido utilizadas com a ferramenta de cerâmica ($v_c = 680$ e 850 m/min).

As figuras 4.24 e 4.25 mostram os valores obtidos.

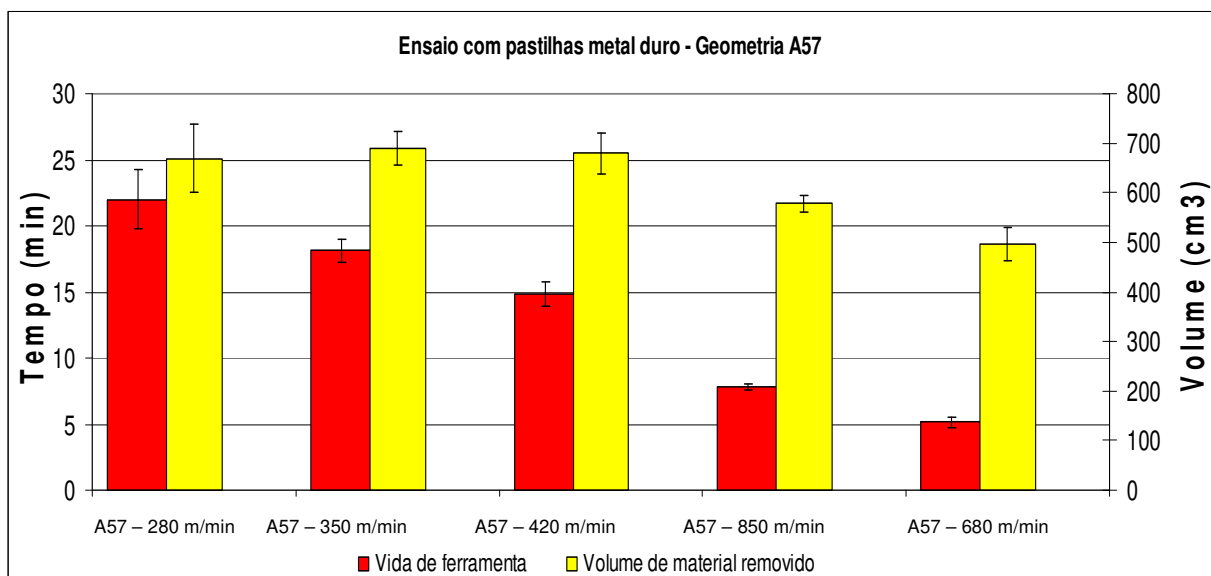


Figura 4.24 – Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas metal duro e geometria A57 nas velocidades de corte de 680 e 850 m/min.

Conforme figura 4.24, verifica-se que acima de 420 m/min, a vida da ferramenta cai tanto quando ela é medida em tempo de corte, quando ela é medida em volume de cavaco removido. A partir deste ponto então, o aumento da temperatura e da energia do impacto causado pelo aumento da velocidade de corte começa a se fazer sentir e a vida da ferramenta cai. Porém, há que se comparar os resultados obtidos com a ferramenta de metal duro com aqueles obtidos com a ferramenta cerâmica, já que realizou-se ensaios com ambas nos mesmos valores de velocidade de corte. Estes resultados estão mostrados na figura 4.25

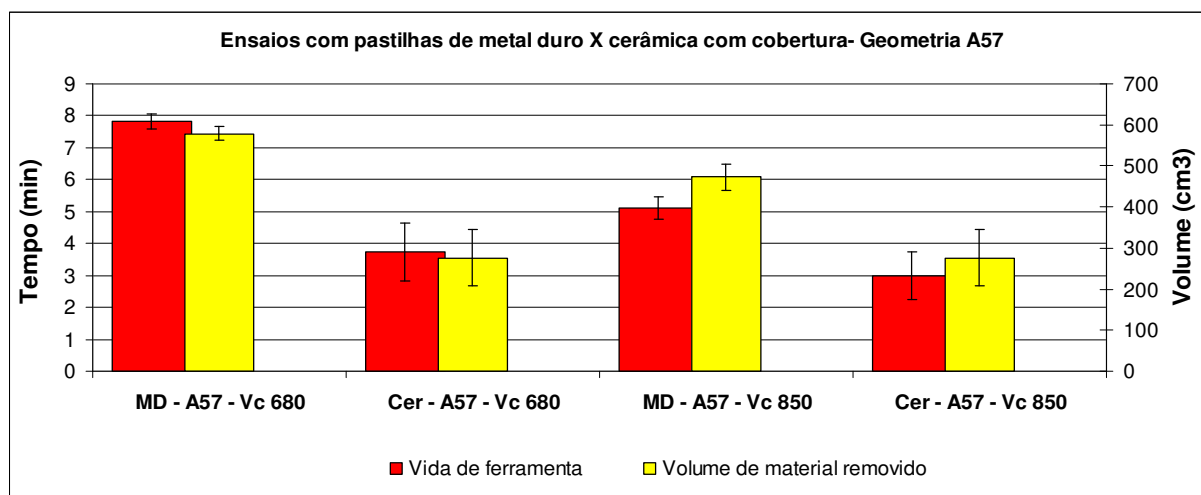


Figura 4.25 – Vida da ferramenta em tempo de corte e em volume de material removido, com pastilhas metal duro e geometria A57 nas velocidades de corte de 680 e 850 m/min.

Na figura 4.25, verificamos que as pastilhas de metal duro apresentaram vida bem superior as pastilhas de cerâmica com cobertura, o que definitivamente não era esperado. Existem algumas hipóteses para esta superioridade do metal duro em relação à cerâmica. A primeira poderia ser explicada caso tivéssemos encontrado carbonetos livres na micrografia das amostras. Esses carbonetos (principalmente de Titânio) podem ter dureza superior as das ferramentas de corte (metal duro e cerâmica), assim, geram micros lascas, lascas e até mesmo a quebra da aresta principal de corte.

Uma segunda hipótese está relacionada ao mecanismo de desgaste, tempo de corte e tipo de operação. Como este trabalho tem como finalidade estudar o processo de acabamento, limitamos o desgaste de flanco máximo em 0,3 mm. Até este nível de desgaste a cobertura ainda desempenha um papel fundamental na resistência ao desgaste da ferramenta. Assim, a ferramenta de metal duro pode ter resistência ao desgaste similar às ferramentas cerâmicas com e sem cobertura, já que ela enquanto possui cobertura, tem dureza também similar a estas ferramentas. Se a hipótese é correta, se estivéssemos considerando uma operação de desbaste, em que os desgastes de flanco poderiam chegar até 1,0 mm ou mais, as ferramentas de metal duro desgastar-se-iam muito mais rapidamente após a perda da cobertura, enquanto as ferramentas cerâmicas manteriam a mesma taxa de desgaste com qualquer nível de desgaste de flanco. Assim, nestes casos, a ferramenta cerâmica supostamente teria vida mais longa. Analisar o desempenho das

ferramentas cerâmicas e de metal duro em operações de desbaste e com valores de desgaste de flanco que limitam o fim de vida maior fica como sugestão para trabalhos futuros.

4.5 - Análise do desempenho dos revestimentos nas pastilhas de metal duro e cerâmica.

As pastilhas de metal duro foram utilizadas para os ensaios com velocidade de corte de 350, 420, 680 e 850 m/min (geometria A57), e as pastilhas de cerâmica com cobertura que foram utilizadas nos ensaios com velocidades de corte de 680 e 850 m/min, foram submetidas à análise por microscopia eletrônica de varredura e por micro-sonda (EDS) com o objetivo de se estudar o comportamento do revestimento sob cada velocidade de corte e no seu final de vida.

A figura 4.26 mostra a análise realizada na pastilha de metal duro com velocidade de corte de 350 m/min.

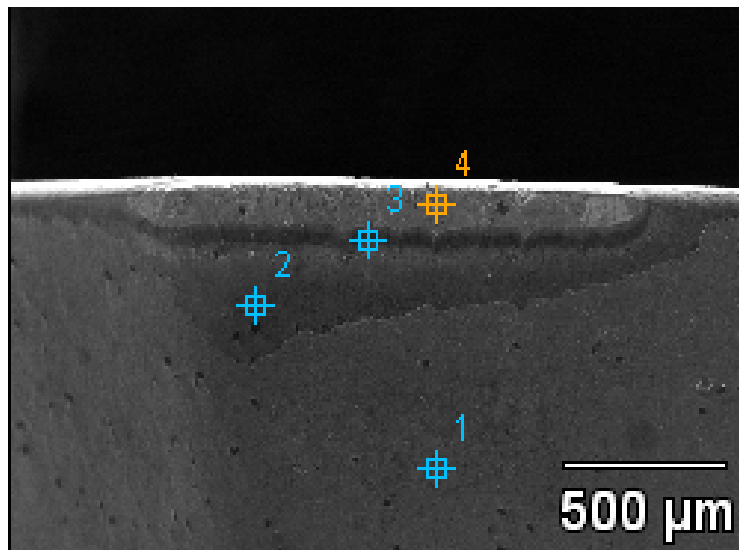


Figura 4.26 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 350 m/min (fim de vida da ferramenta)

A figura 4.27 mostra a quantidade de materiais encontrados na aresta de corte. No ponto de análise 4, é possível verificar a adição de ferro na superfície da pastilha. Nos pontos de análise 1,

2 e 3 são encontrados os elementos químicos alumínio e cromo, oriundos da cobertura da pastilha.

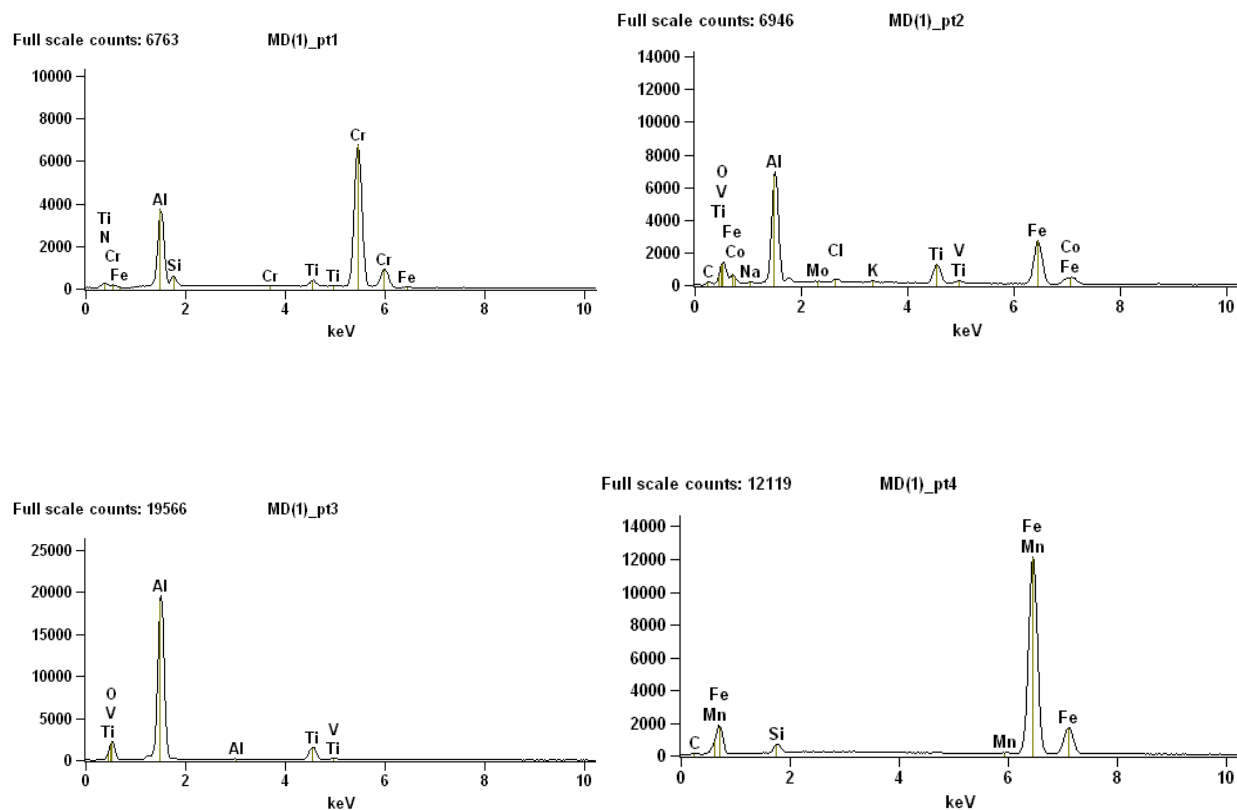


Figura 4.27- Elementos químicos encontrados nas pastilhas de metal duro e velocidade de corte de 350 m/min.

A figura 4.28, mostra a análise da mesma aresta de corte, entretanto com uma ampliação maior, o que mostra a aderência de ferro no ponto 4, conforme citado anteriormente, e uma pequena lasca na aresta de corte (lado esquerdo da figura), e também uma trinca térmica.

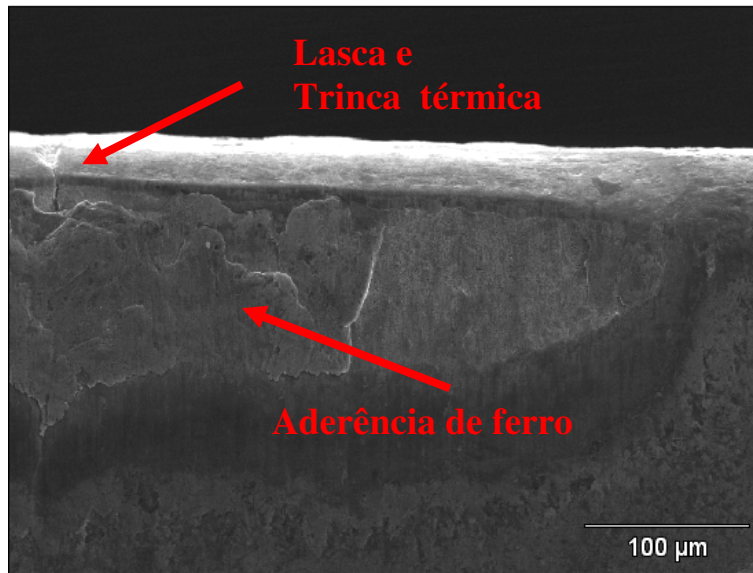


Figura 4.28 - Vista da região de desgaste de flanco e trinca térmica da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 350 m/min (fim de vida da ferramenta)

A figura 4.29 mostra a análise realizada na pastilha de metal duro com velocidade de corte de 420 m/min.

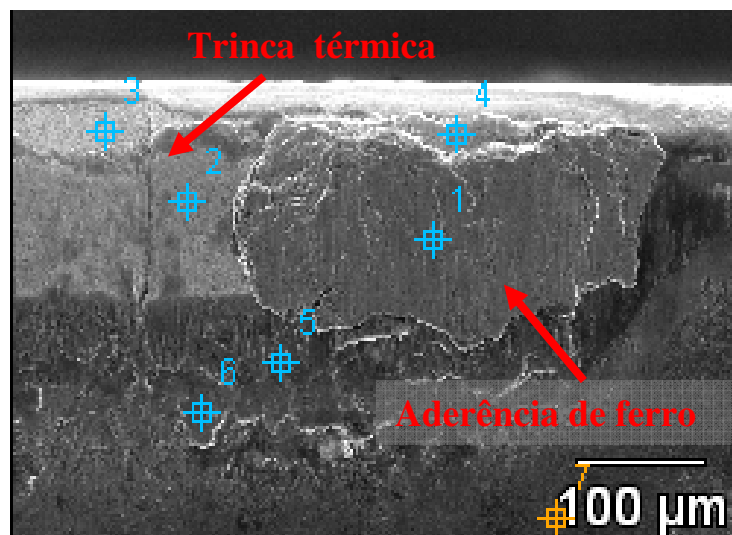
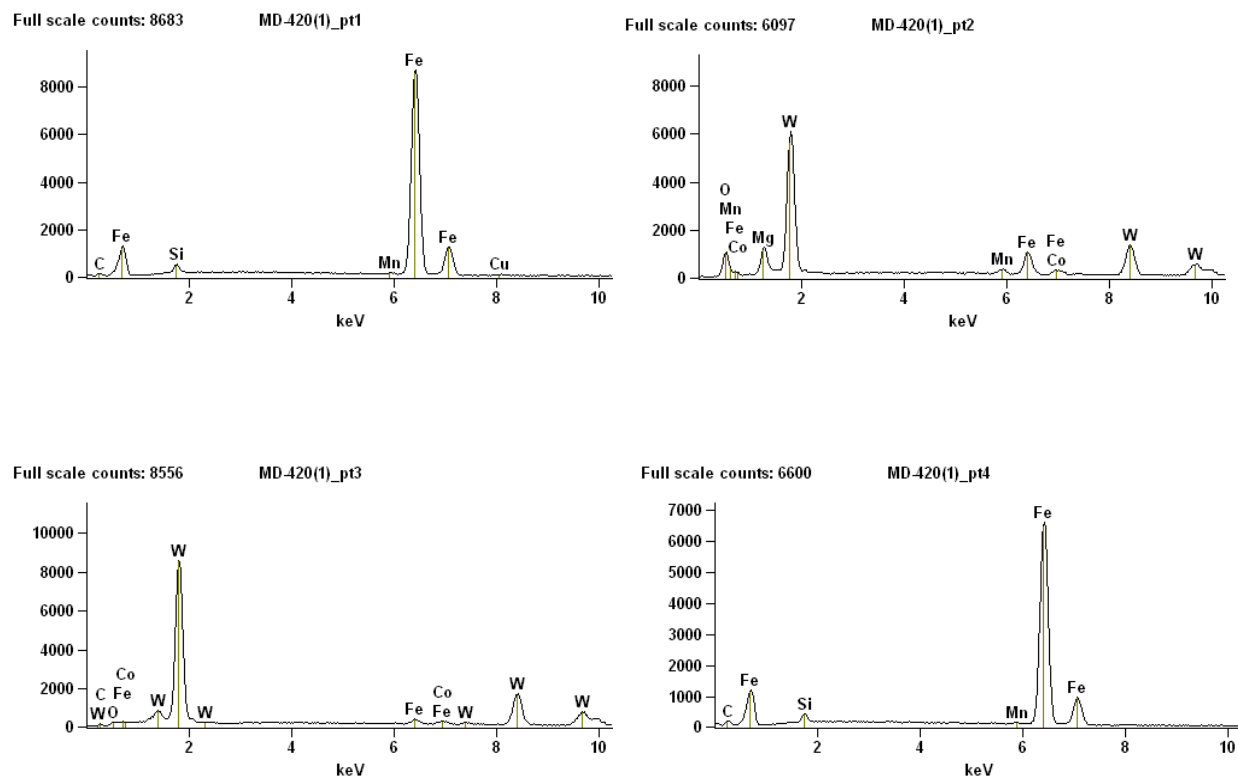


Figura 4.29 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 420 m/min (fim de vida da ferramenta)

A figura 4.30 mostra a quantidade de materiais encontrados na aresta de corte. Principalmente no ponto de análise 1, é possível verificar a adição de ferro na superfície da pastilha. Nos pontos de análise 2 e 3 é verificada a presença de tungstênio (que é o material do substrato do metal duro) possivelmente em função do aumento do desgaste de flanco e perda da cobertura. No ponto de análise 7, é encontrado o elemento químico alumínio, oriundo da cobertura da pastilha.

Não é nítida a presença de micro lascas no fio da aresta de corte, todavia, é possível verificar uma trinca entre os pontos 3 e 2.



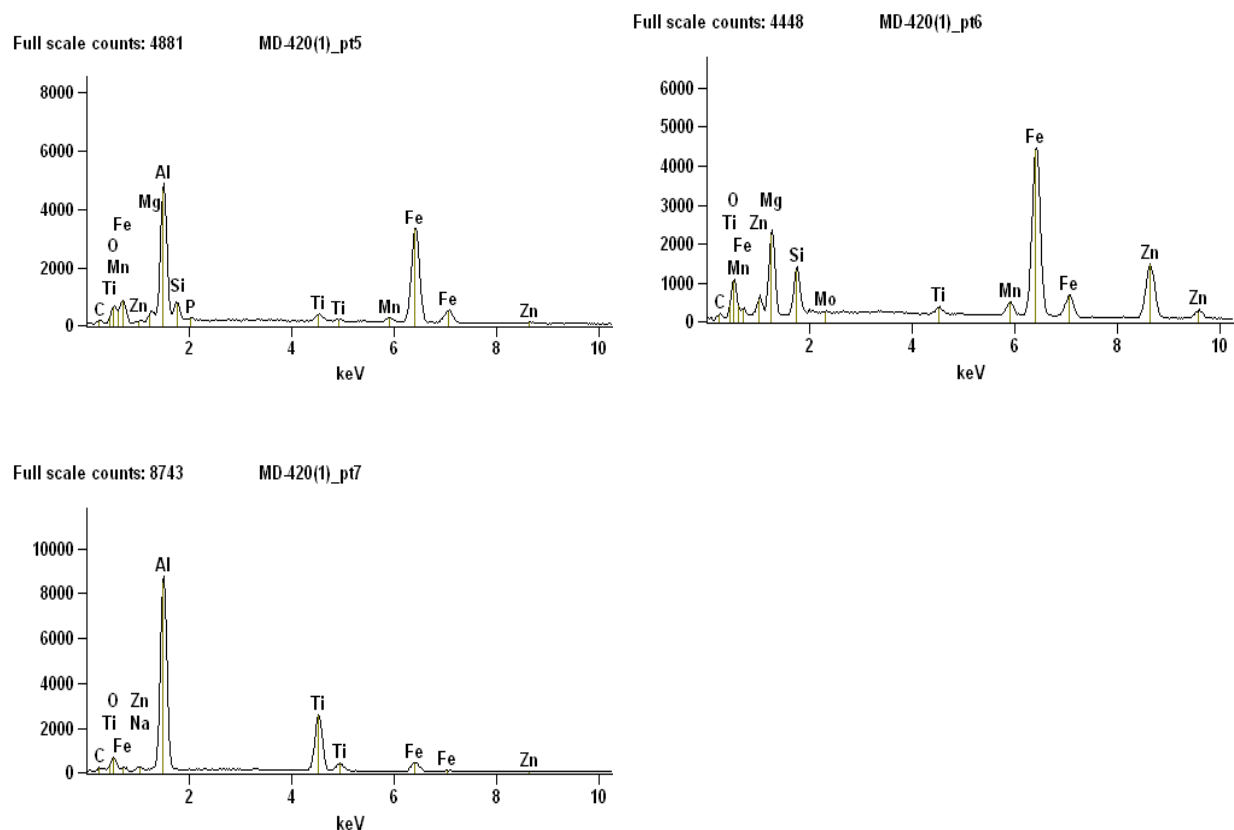


Figura 4.30- Elementos químicos encontrados nas pastilhas de metal duro e velocidade de corte de 420 m/min.

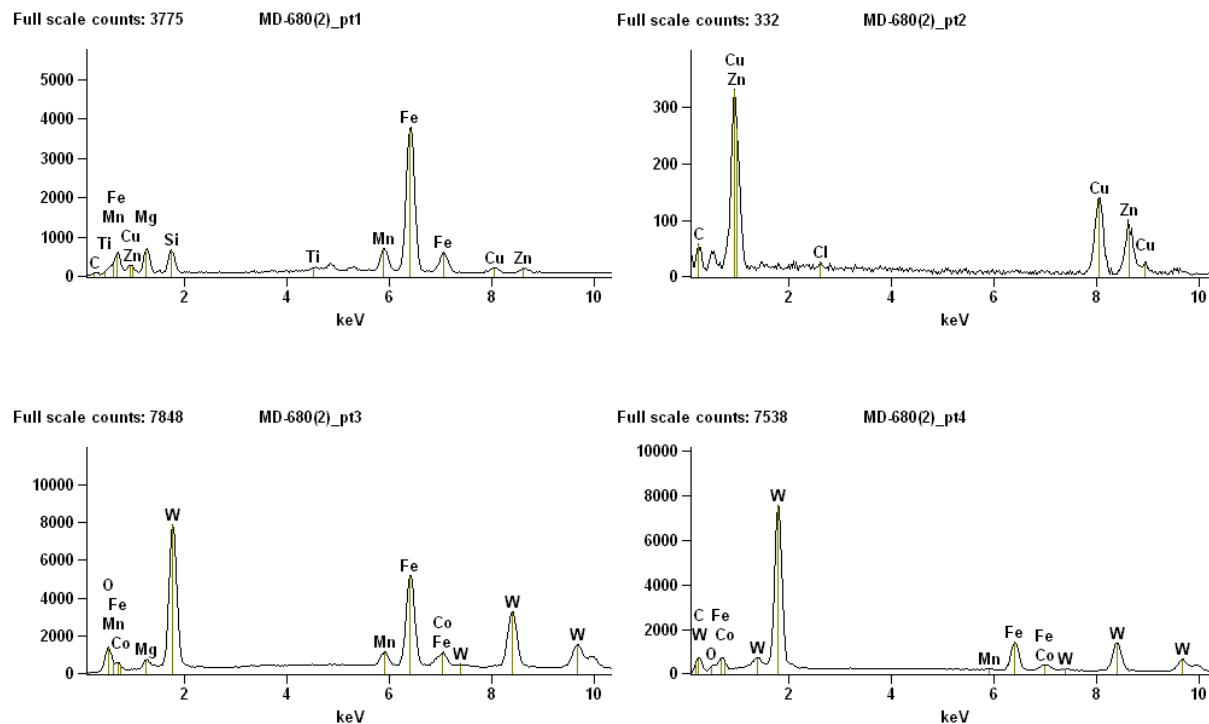
A figura 4.31 mostra a análise realizada na pastilha de metal duro com velocidade de corte de 680 m/min.



Figura 4.31 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 680 m/min (fim de vida da ferramenta).

A figura 4.32 mostra a quantidade de materiais encontrados na aresta de corte. No ponto de análise 1 e 5, é possível verificar a adição de ferro na superfície da pastilha. Nos pontos de análise 3, 4 e 6 é verificada a presença de tungstênio (que é o material do substrato do metal duro) possivelmente em função do aumento do desgaste de flanco e perda da cobertura.

Também é possível verificar nesta análise a presença de lascas na aresta de corte assim como trincas perpendiculares à aresta de corte, que usualmente apontam para o fato que elas foram causadas pela variação de temperatura (trincas de origem térmica). Estes resultados mostram que o fenômeno do “attrition”, que foi determinante para o fim da vida da ferramenta quando se utilizou $v_c = 420$ m/min, ainda está presente, mas a ele foram adicionadas as trincas de origem térmica que também contribuíram para a diminuição da vida da ferramenta.



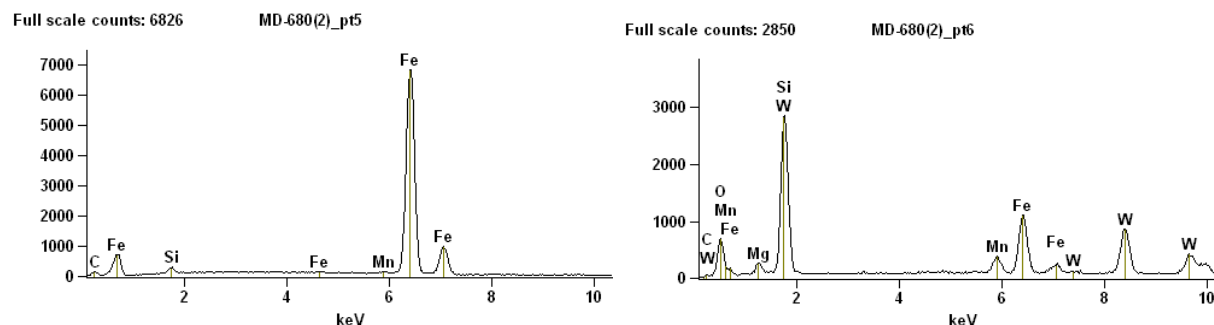


Figura 4.32 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de metal duro e velocidade de corte de 680 m/min

A figura 4.33 mostra a análise realizada na pastilha de metal duro com velocidade de corte de 850 m/min.

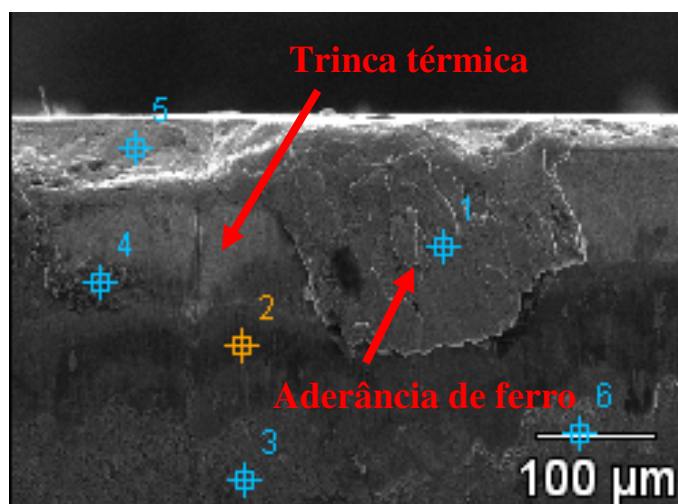
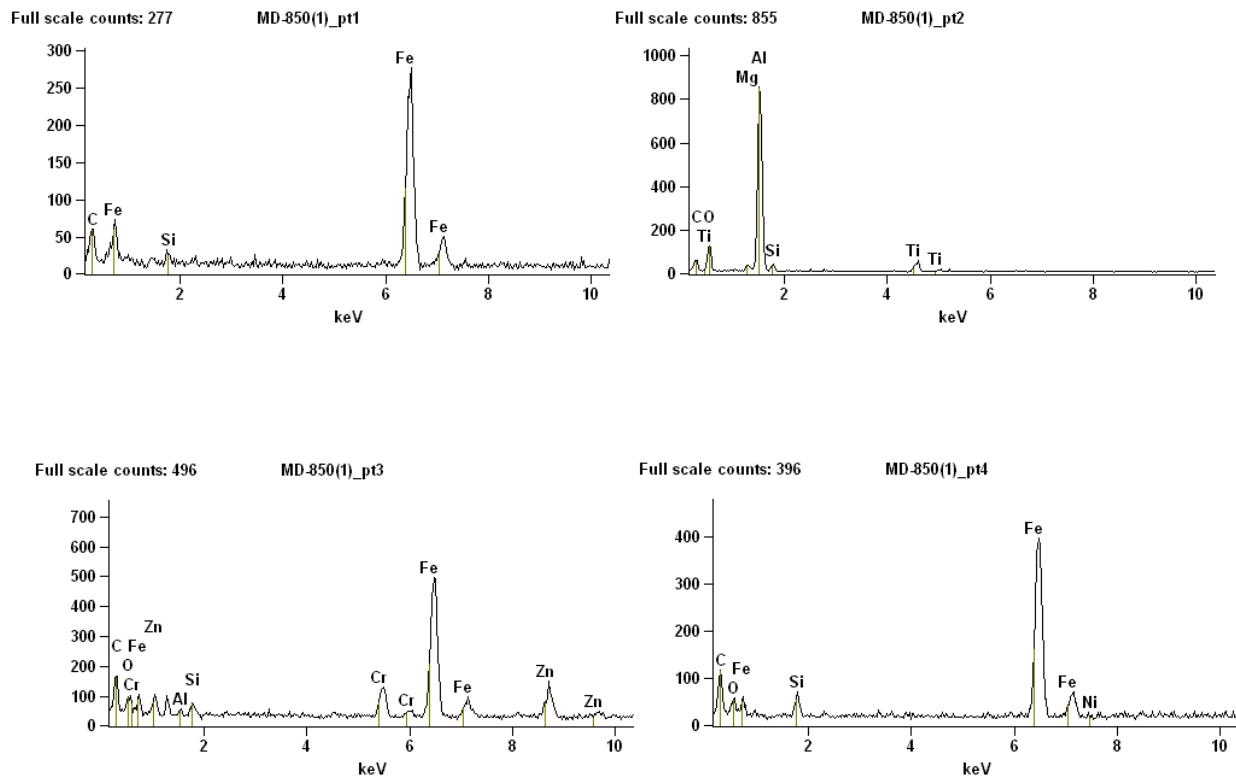


Figura 4.33 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de metal duro com velocidade de corte de 850 m/min (fim da vida da ferramenta).

A figura 4.34 mostra a quantidade de materiais encontrados na aresta de corte. Nos pontos de análise 1, 3, 4, 5 e 6 é possível verificar a forte presença de ferro oriundos da peça na superfície da pastilha. No ponto de análise 2 é encontrado o alumínio, oriundo da cobertura da pastilha.

Também é possível verificar nesta análise a presença de lascas no fio da aresta de corte assim como trincas mecânicas (entre os pontos 4 e 2). De novo, devido à forte aderência de

material da peça (Fe) sobre a região de desgaste da superfície de folga da ferramenta, conclui-se que o fenômeno “attrition” foi determinante para o crescimento do desgaste. A questão a ser levantada é: por que, em uma velocidade mais alta (850 m/min) não se encontrou trincas de origem térmica, enquanto em uma velocidade menor (350, 420 e 680 m/min), em que supostamente a variação de temperatura da ferramenta em cada revolução é também menor, apareceram trincas térmicas? Uma hipótese para a resposta desta pergunta é que as trincas térmicas estavam presentes debaixo da forte camada de ferro aderida sobre a ferramenta.



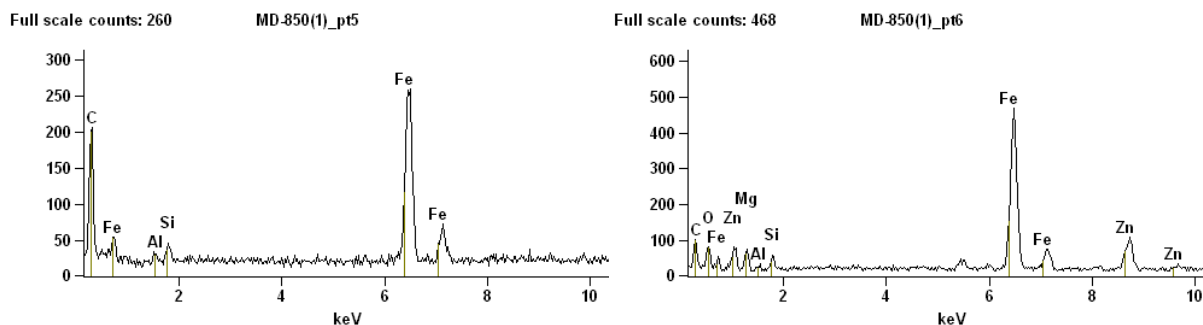


Figura 4.34 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de metal duro e velocidade de corte de 850 m/min

A figura 4.35 mostra a análise realizada na pastilha de cerâmica com cobertura com velocidade de corte de 680 m/min.

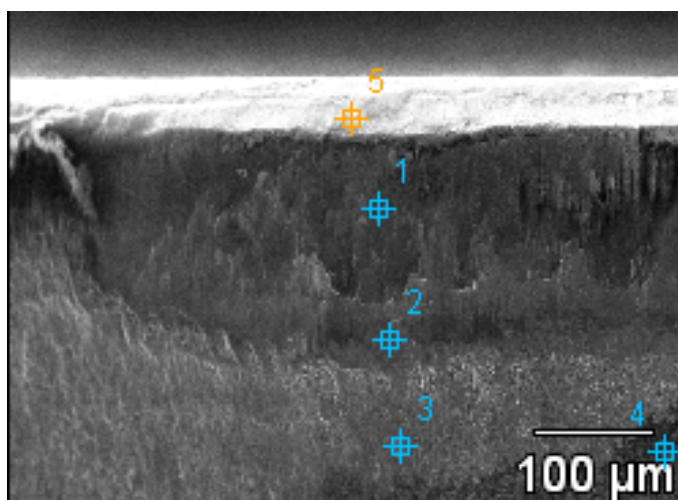


Figura 4.35 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de cerâmica com cobertura e velocidade de corte de 680 m/min (fim da vida da ferramenta).

A figura 4-36 mostra a quantidade de materiais encontrados na aresta de corte. Nos ponto de análise 1 e 5 é possível encontrar o silício, um dos elementos base da cerâmica. No ponto de análise 2, 3 e 4 é encontrado o cromo, oriundo da cobertura da pastilha, já que estes pontos estão na periferia da região desgastada. Apesar de ter o mesmo material de cobertura da ferramenta de metal duro e, supostamente, o mesmo coeficiente de atrito, na ferramenta de cerâmica não houve aderência de material na peça sobre a ferramenta. A impressão que se tem, dada à aparência lisa

da região desgastada, a ausência de riscos abrasivos, a baixa estabilidade química do nitreto de silício (material da ferramenta) e a presença de ferro em pequenos teores sobre a região desgastada, é que este desgaste foi causado pelo processo difusivo.

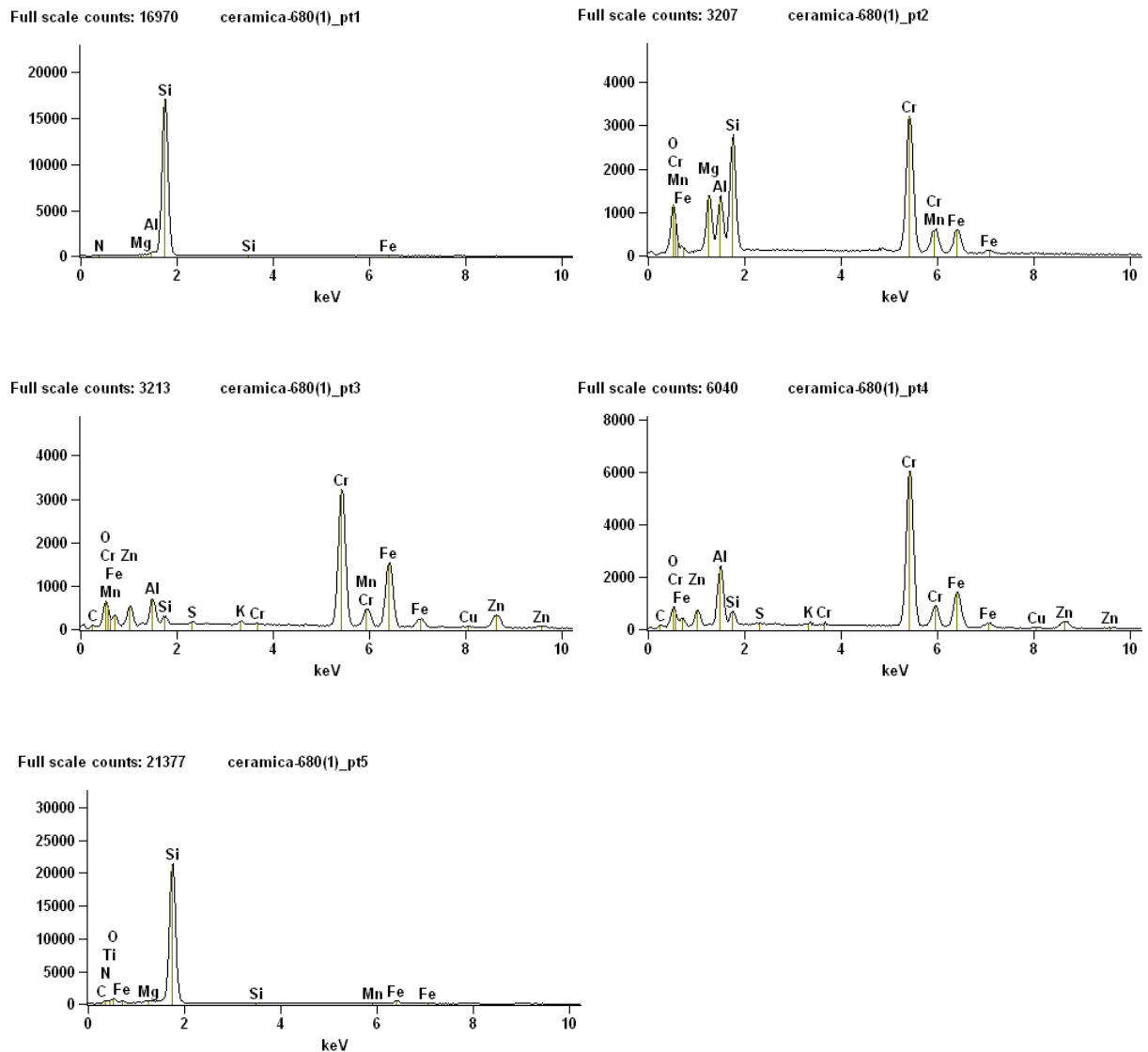


Figura 4.36 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de cerâmica com cobertura e velocidade de corte de 680 m/min

A figura 4.37, mostra a análise realizada na pastilha de cerâmica com cobertura com velocidade de corte de 850 m/min.

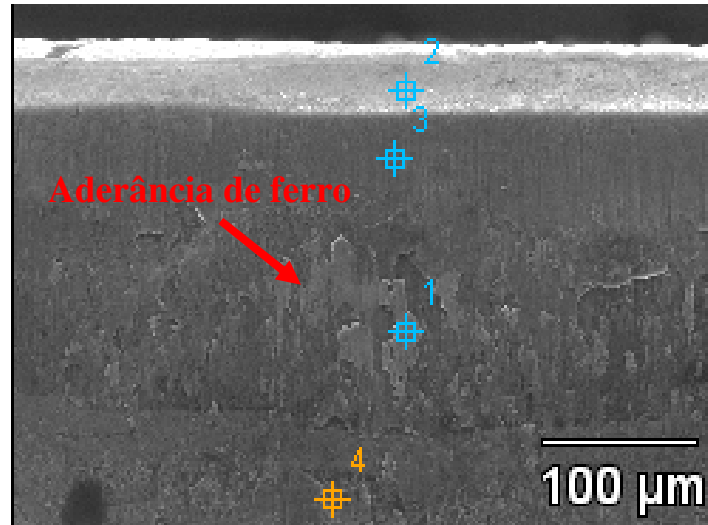
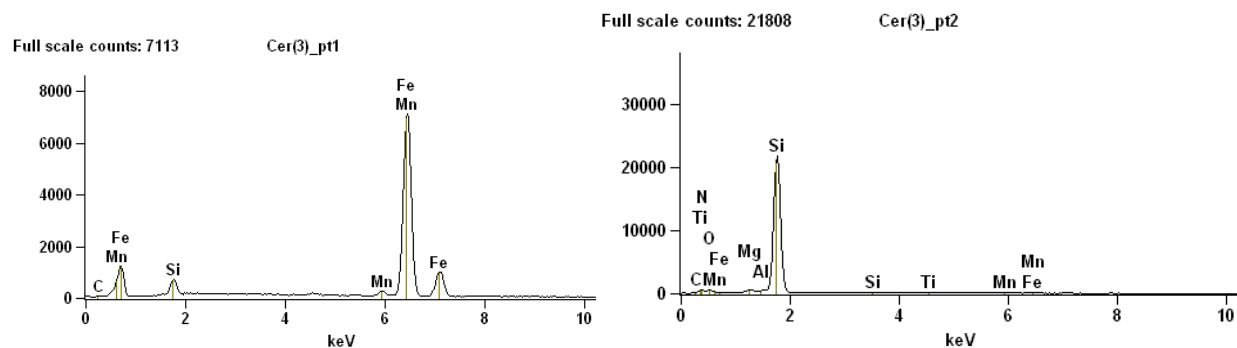


Figura 4.37 - Vista da região de desgaste de flanco da ferramenta de cerâmica com cobertura e velocidade de corte de 850 m/min (fim da vida da ferramenta).

A figura 4.38 mostra a quantidade de materiais encontrados na aresta de corte. Nos pontos de análise 2 e 3 é possível encontrar o silício, um dos elementos base da cerâmica. No ponto de análise 4 é encontrado o cromo, oriundo da cobertura da pastilha. No ponto de análise 1 e 4 é possível verificar uma pequena quantidade de ferro aderida na superfície da pastilha. De novo, devido à aparência lisa da região desgastada, a ausência de riscos abrasivos, a baixa estabilidade química do nitreto de silício (material da ferramenta) e a presença de ferro em pequenos teores sobre a região desgastada, conclui-se que este desgaste foi causado pelo processo difusivo.



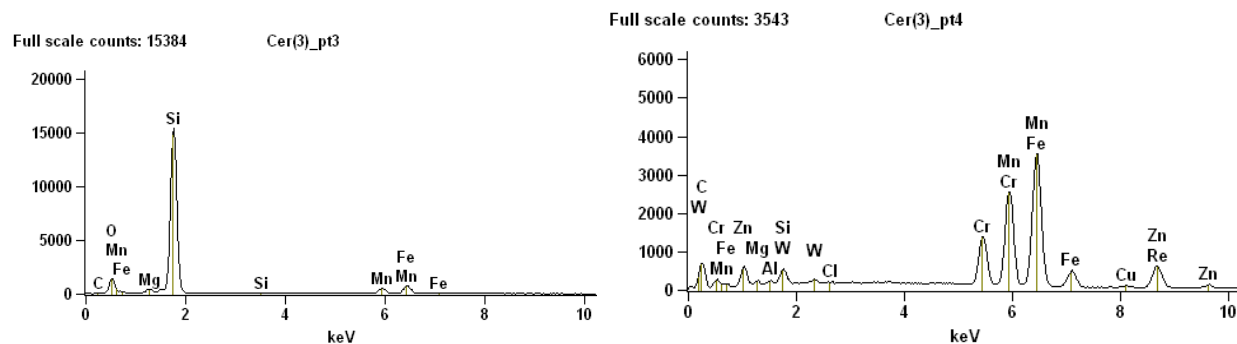


Figura 4.38 - Elementos químicos encontrados nas pastilhas de cerâmica com cobertura e velocidade de corte de 850 m/min

Está então explicada a menor vida da ferramenta cerâmica quando comparada com a ferramenta de metal duro, nas mesmas velocidades de corte. A menor estabilidade química da ferramenta fez que o desgaste difusivo se pronunciasse muito rapidamente e, assim, causasse vida da ferramenta bem curta, bem menor que aquela obtida com ferramentas de metal duro.

Também tem uma hipótese para o fato de que, até um determinado limite, o aumento da velocidade de corte não tenha causado a diminuição da vida da ferramenta de metal duro. Como o desgaste desta ferramenta é essencialmente causado por “attrition”, o aumento da velocidade de corte não prejudicou sua vida, já que este fenômeno não é dependente da temperatura. Somente quando as velocidades muito altas foram utilizadas e outros fenômenos como trincas de origem térmicas passaram a ocorrer, é que a vida da ferramenta caiu com a velocidade de corte. Mesmo assim, a vida da ferramenta de metal duro continuou maior que aquela obtida com a ferramenta de cerâmica.

Diferentemente dos ensaios com pastilhas de metal duro, não é nítida a presença de lascas no fio da aresta de corte ou trincas mecânicas na pastilha de cerâmica.

Capítulo 5

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O objetivo deste trabalho foi de analisar a influência da micro geometria da aresta de corte, sendo uma geometria com quebra cavaco de 16° de ângulo de saída e a outra geometria sem quebra cavaco (lisa) e a variação da velocidade de corte para usinagem com pastilhas de metal duro e cerâmica com e sem cobertura no processo de fresamento em operações de acabamento da face de fogo de bloco de motor de ferro fundido vermicular.

Baseados nos resultados obtidos pode-se concluir para o fresamento de ferro fundido vermicular com ferramentas de metal duro e cerâmica, em condições similares às utilizadas neste trabalho que:

- Independentemente do material da ferramenta de corte e velocidade de corte, a geometria A57 (lisa) apresenta desempenho superior à geometria F57 (ângulo de saída de 16°).
- Nos ensaios com ferramentas de metal duro, o aumento da velocidade de corte não causou diminuição da vida da ferramenta dada em volume de material removido, até a velocidade de 420 m/min. Somente quando usinou com velocidades maiores que esta (680 e 850 m/min) é que a vida da ferramenta teve tendência de queda com a velocidade de corte.
- Nos ensaios com ferramentas cerâmicas também não houve tendência consistente da queda da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte.

- Em condições de usinagem idênticas, as ferramentas de metal duro apresentaram vidas maiores que as da cerâmica.
- A geometria A57 apresenta melhor estabilidade mecânica durante a usinagem, suportando os impactos oriundos do processo de usinagem por fresamento. Assim, apresentou desgaste uniforme da aresta. A geometria de aresta F57 apresentou região desgastada repleta de lascamentos. Quando se utilizou ferramenta de metal duro, o principal mecanismo de desgaste até a velocidade de 420 m/min foi o “attrition”. Com velocidades maiores ocorreram também trincas térmicas sobre a aresta de corte
- Quando se utilizou ferramentas cerâmicas, o principal mecanismo de desgaste foi a difusão. Este mecanismo abreviou em muito as vidas destas ferramentas, fazendo com que elas fossem menores que as obtidas com as ferramentas de metal duro.
- Nas pastilhas de metal duro, a velocidade de corte e geometria não influenciaram na rugosidade final da peça.
- As pastilhas de cerâmica com geometria A57 obtiveram melhor rugosidade inicial e final quando se utilizou pastilhas sem cobertura.
- Em geral as pastilhas de cerâmica sem cobertura apresentaram menor rugosidade.
- Na usinagem com pastilhas de metal duro, a variação da potência de corte no início de vida da ferramenta e final, foi muito menor quando comparado com as pastilhas de cerâmica.
- Comparando as pastilhas de cerâmica com e sem cobertura, não obtivemos a redução da potência de corte devido a uma suposta redução do atrito entre ferramenta e cavaco causado pela cobertura da pastilha.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Usinagem com profundidades de corte maiores, simulando a usinagem em desbaste com pastilhas de metal duro e cerâmica.

- Usinagem com maiores velocidade de avanço por dente nas operações de acabamento para estudar a influência do choque mecânico na vida da ferramenta.
- Diferentes preparações da micro geometria da aresta de corte, como por exemplo, diferentes chanfros e raios.
- Usinagem com substrato de metal duro com tamanhos de grãos menores (fino, ultrafino) e diferentes coberturas das pastilhas.

Referências:

ABELE, E.; SAHM, A.; SCHULZ, H. Wear Mechanism when Machining Compacted Graphite Iron. *CIRP Annals*, v.51, n. 1, p 53-56, 2002.

ANDRADE, Cássio Luiz F. *Análise da furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAlN*. 2005. 170 p. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BALZERS BALINIT DO BRASIL: *Aplicações - Usinagem*. Disponível em: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bbr/>>. Acesso em: 11 de janeiro de 2009.

BOFF, Cristiano Ramos. *Metodologia para análise de blocos de motores* - Aplicação a blocos de motores diesel em ferro fundido vermicular. 2003. 160 p. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BOULANGER, Pierre. *Moteurs Diesel*. 2º Edição, 1977. Hemus-livraria editora Ltda.

CHIAVERINI, Vicente. *Tecnologia Mecânica – Processos de fabricação e tratamento*. Volume III, 2º edição 1996.

COLAPERT, H. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 3º edição São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1974.

DAWSON, S.; WÜRTEMBERG, J. M. von. *Experiências práticas com ferro fundido de grafita compactada como material para componentes automotivos*. IN: 26º Simpósio internacional sobre tecnologia automotiva e automação - Isata, 1993, Aachen. Anais...Aachen: 1993.

DAWSON, Dr. Steve. *Compacted graphite iron: Mechanical and physical properties for engine design* – Technical Publication, 1999.

DAWSON, Dr. Steve. Practical applications for compacted graphite iron. In: *Compacted graphite iron - Machining Workshop, 5., 2002*. Darmstadt. Anais... Darmstadt: PTW - Institute of Production and Machine Tools, 2002.

DAWSON, Dr. Steve. *The wall street transcript*. SinterCast AB – Technical Publication ,2003

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI,N.L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 6º edição São Paulo: Artiber Editora, 2008. 262p.

DORÉ, Christian. *Influência da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular*. 2007. 132 p. Tese (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DOYLE, Morris; SCHRADER, Leach. *Processos de fabricação e materiais para engenheiros*. São Paulo – McGraw-Hill, 1986.

DROBNIEWSKI, Jorg. *The future of the cutting materials*. Walter AG, Technical Presentation July 2007.

FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, vol. 1, São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1970. 754p.

GEORGIU, George. *High speed machining of compacted graphite iron*. LAMB - Machining Workshop – Technical Publication, 2002.

GUESSER, W.L.; MASIERO, I.; MELLERAS, E.; CABEZAS, C.S. *Thermal conductivity of gray iron and compacted graphite iron used for cylinder heads*. Udesc and TUPY fundições.

GUESSER, L. W. e GUEDES, L. C. *Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística*. In: IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA, São Paulo, 1997.

GUESSER, Wilson Luiz; DURAN, Pedro Ventrela; Krause, Walmor. *Compacted Graphite Iron for Diesel Engine – Cylinder Blocks*. Congrès Le diesel 12 et 13 mai 2004.

GUESSER, W.L.; MASIERO, I.; MELLERAS, E.; CABEZAS, C.S. *Thermal Fatigue strength of gray iron and compacted graphite iron used for engine cylinder blocks*. Udesc and TUPY fundições.

GUESSER, W.L.; SCHROEDER, T.; DAWSON, S. *Production experience with compacted graphite iron automotive components*. American foundry Society.

GUESSER, Wilson Luiz: *Ferro fundido com grafita compactada*. Metalurgia & Materiais – Publicação Técnica, Junho 2002.

HECK, M.; ORTNER, H.M.; FLEGE, S.; REUTER, U.; ENSINGER, W. Analytical investigations concerning the wear behaviour of cutting tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, v.26, n.3, p.197-206, 2007.

LÖHE, Detlef. *Properties of vermicular cast iron at mechanical and thermal-mechanical loading*. – Darmstadt Machining Workshop – November 2005.

LUCASIEVCZ, Pedro; DAGOSTIM, Roberto B. *Fresamento em ferro fundido vermicular com análise do rendimento de diferentes ferramentas de corte*. Instituto superior TUPY – IST, Publicação técnica, 2007.

MACHADO, A.R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M.B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 384 p.

MOCELLIN, Fabiano; BOHES, Prof. Lourival *Study of the Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and engineering*, 2004.

MODERN METAL CUTTING: *A practical handbook*. SANDVIK Coromant, 1996

PLATIT, *Coating Guides*, Catálogo geral de coberturas 2008. 25 p.

REUTER, U.; SCHULZ, H. Compact and bijou - *The problems associated with compacted graphite iron manufacturing can be overcome*. Engine technology International. Local de publicação, v. p. 58-60, abr. 1999c.

WARRICK, RobertJ.; Ellis, Gerald G. SAE TECHNICAL PAPER SERIE, **Development and application of enhanced compacted graphite iron for the bedplate of the new Crysler 4.7 liter V-8 engine**1999. International Congress and Exposition. Detroit, Michigan – March 1-4,1999.

SANDVIK COROMANT. *Manual Técnico de Usinagem*. Manual. São Paulo, 2005. 600 p

SANDVIK COROMANT. *Catálogo Principal*. São Paulo, 2008. 1157 p.

SAHM, Dipl.-Ing. A; ABELE, Prof Dr.-Ing E; SCHULZ, Prof. Dr.-Ing. H. *State of the art in CGI- Machining*. Machining Workshop 2002 – Darmstadt- Germany – March 13-14/2002

SINTERCAST AB. *Practical applications for compacted graphite iron*. Technical Publications. Sintercast Darmstadt PTW 2002.

SINTERCAST. *Compacted Graphite Iron*. Technical Publications. Disponível em: < www.sintercast.com >. Acesso em: outubro de 2008.

SINTERCAST. *Graphite Shape from Start do End*. Technical Publications. Disponível em: < www.sintercast.com >. Acesso em: fevereiro de 2009.

SINTERCAST. *Material Data Sheet*. Technical Publications, 2001. Disponível em: < www.sintercast.com >. Acesso em: fevereiro de 2009.

TRAINING BOOK MMW. *Manual técnico de operação e manutenção*, 2006

TRENT, E.; WRIGHT, P. *Metal Cutting*. 4^a ed. Woburn: Editora Butterworth-Heinemann, 2000. 446p.

VASILASH, Gary S. *Material driving power train production: compacted graphite iron*. Automotive design & production

XAVIER, Fábio Antônio. *Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN*. 2003. 146 p. Tese (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis

WALTER AG. *Milling CGI – Cutting material and cutting conditions in comparison to grey cast and nodular cast iron*. Walter AG, Technical Presentation, February 1997.

WALTER AG. *Catálogo Geral. Catálogo*. São Paulo, 2007. 823 p.

WARRICK, Robert J.; ELLIS, Gerald G.; GRUPKE, Clifford C.; KHAMSEH, Amir R.; McLACHLAN, Theodore H.; GERKITS, Carrie. *Development and application of enhanced compacted graphite iron for the bedplate of the new Chrysler 4.7 liter V-8 engine*. International Congress and exposition – Detroit, Michigan – March 1-4, 1999.

WEBER, R. *CGI in series production*. EISENWERK BRUHL GMBH – Darmstadt Machining Workshop – November 2005.

WERTHEIM, R; LAYYOUS, A; GOLDBERG, M; LITTLEFAIR, G. *Development of cutting tool material for machining CGI and ADI*. Iscar Seminar Technical Publication, 2000.