

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Marco
Aurelio Dalo E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 08/07/11

ORIENTADOR

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

Marco Aurelio Dalo

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE
CORTE NO PROCESSO DE MANDRILAMENTO EM
FERRO FUNDIDO VERMICULAR – CGI**

Campinas, 2011.

Marco Aurelio Dalo

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE
CORTE NO PROCESSO DE MANDRILAMENTO EM
FERRO FUNDIDO VERMICULAR – CGI**

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

Área de concentração : Manufatura
Orientador : Anselmo Eduardo Diniz

Campinas

2011

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

D169e Dalo, Marco Aurelio
 Estudo do desempenho de ferramenta de corte no
 processo de mandrilamento em ferro fundido vermicular
 - CGI / Marco Aurelio Dalo. --Campinas, SP: [s.n.],
 2011.

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

 1. Ferro fundido. 2. Metais - Usinabilidade. 3.
 Cerâmica. 4. Fator de potência. I. Diniz, Anselmo
 Eduardo. II. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Performance of the cutting tools in the boring machining process
vermicular cast iron - CGI

Palavras-chave em Inglês: Cast iron, Metals - Machinability, Ceramics, Power
factor

Área de concentração: Manufatura

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Maria Helena Robert, Milton Vieira Junior

Data da defesa: 08/07/2011

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**

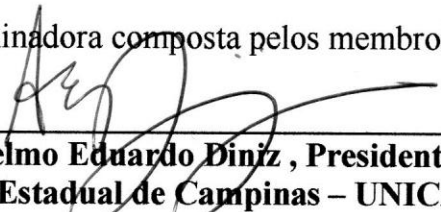
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTA DE
CORTE NO PROCESSO DE MANDRILAMENTO EM
FERRO FUNDIDO VERMICULAR – CGI**

Autor: Marco Aurelio Dalo

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

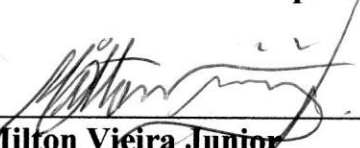
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



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



Prof(a). Dra. Maria Helena Robert
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



Prof. Dr. Milton Vieira Junior
Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Campinas, 08 de julho de 2011

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha querida esposa Leila e minha filha Priscila que sempre entenderam a importância do trabalho, se privando de tempos de alegria para realização e finalização do mesmo.

A meus irmãos e amigos que me apoiaram durante esta jornada.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

- Primeiramente a Deus por me conceder mais esta etapa de minha vida;
- A minha família que me apoiaram em todos os momentos;
- Ao meu orientador Anselmo Eduardo Diniz pela oportunidade, compreensão e paciência de me orientar;
- A empresa MAPAL do Brasil, na pessoa do Sr Rogério e Sr Bighetti pelos insertos utilizados nos experimentos;
- Ao Sr Enrique Devicente pela ajuda no procedimento de medição do desgaste das pastilhas;
- Ao Sr Marcos Hermínio José Esteves pela ajuda nos testes realizados na linha de produção;
- Ao Sr Fabio Luis Gomes Mingutti pela ajuda na captura dos dados de potência do equipamento em cada experimento;
- Ao Sr Sander Gabaldo pela ajuda na revisão bibliográfica;
- Ao Sr Glevison Torres Ruas pela ajuda na análise do MEV e EDS dos insertos.

"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim."

"Ninguém é bom por acaso; a virtude deve ser bem aprendida."

Chico Xavier

Resumo

DALO, Marco Aurelio. Estudo do Desempenho de Ferramenta de Corte no Processo de Mandrilamento em Ferro Fundido Vermicular - CGI (Compacted Graphite Iron), Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011. Dissertação (Mestrado)

Existe hoje uma tendência no mercado de veículos de motor diesel a fabricarem os blocos dos motores em ferro fundido vermicular devido à melhor eficiência de combustão e maior resistência à compressão, permitindo paredes de galerias mais finas com consequência na redução do peso do bloco, quando comparado ao bloco usual feito de ferro fundido cinzento. Desta forma, seria possível atender às novas exigências do mercado e do meio ambiente.

Porém, a difícil usinabilidade deste material obriga ao levantamento de condições de usinagem e ao desenvolvimento de ferramentas que possam melhorar a produtividade dos processos de usinagem dos blocos. O mandrilamento em desbaste dos mancais do bloco do motor é uma das operações de usinagem mais carentes de desenvolvimento dentre as utilizadas na produção do bloco de ferro fundido vermicular.

A variação do material da ferramenta e as condições de corte utilizadas no processo de usinagem foram as variáveis testadas neste trabalho para buscar o melhor desempenho do processo de mandrilamento do bloco. Os resultados demonstraram que ferramentas de material cerâmico sofreram um desgaste frontal excessivo da aresta de corte por difusão e as ferramentas de metal duro obtiveram um melhor resultado em comparação com a cerâmica. Com relação às condições de corte, resultados com o uso de menores velocidades de corte demonstraram um menor desgaste frontal das arestas de corte. A potência consumida do fuso foi o limitante para o máximo avanço por dente utilizado nos experimentos.

Palavras-chave: ferro fundido vermicular, CGI, mandrilamento, usinabilidade.

Abstract

DALO, Marco Aurelio. Performance of the cutting tools in the boring machining process vermicular cast iron - CGI (Compacted Graphite Iron), Campinas: Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas, 2009. Thesis (Msc)

Today there is a trend in the market for diesel vehicles manufactured in compacted graphite iron due to better combustion efficiency of the engine and greater resistance to compression, allowing thinner walls of galleries with a result in reducing the weight of the block, when compared to the usual block made of the gray cast iron. Thus, it would be possible to meet new market demands and the environment.

However, the difficult machinability of this material requires the survey of the machining conditions and development of the tools that can improve productivity of machining processes of the blocks. The rough boring in the bearings of the engine block is one of the machining operations of the poorest development among those used in the production of compacted graphite iron block.

The variation of the tool material and cutting conditions used in the machining process variables were tested in this work to get the best performance of the process of boring the block. The results show that ceramic tools have suffered excessive front wear of the cutting edge diffusion and carbide tools had a better outcome in comparison with the ceramic. With respect to cutting conditions, results from the use of lower cutting speeds showed a lower front wear of the cutting edges. The power consumption of the spindle was limited for maximum feed per tooth used in the experiments.

Key words: Compacted graphite iron, CGI, boring, machinability

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Comparação de usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento e Ferro Fundido Vermicular (SAHM et al., 2002)	2
Figura 1.2 - Forma do grafite nos ferros fundidos (SINTERCAST, 2010).....	5
Figura 1.3 - Faixa de magnésio necessária para formação do CGI (DAWSON, 2002)	13
Figura 1.4 - Esquema do Mecanismo da formação do cavaco em ferro fundido (COHEN,2000; apud ROSA, 2009)	15
Figura 1.5 - Formação do cavaco e ruptura em ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular (REUTER et al., 1999)	16
Figura 1.6 - Influência do Teor de Perlita na Vida da Ferramenta de Torneamento no CGI (DAWSON, 1999).....	17
Figura 1.7 – Mandrilamento cônico	22
Figura 1.8 – Mandrilamento cilíndrico.....	22
Figura 1.9 – Mandrilamento radial.....	23
Figura 1.10 – Mandrilamento esférico (FERRARESI, 1970)	23
Figura 1.11 – Barra de mandrilar com insertos múltiplos (MAPAL, 2010)	24
Figura 1.12 – Barra de mandrilar com insertos rotativos	25
Figura 1.13 – Ferramenta para freso-mandrilamento	26
Figura 1.14 - Geometria no processo de mandrilamento (YUSSEFIAN et al.,2008)	27
Figura 1.15 - Diferentes configurações da relação área da seção de cavaco/ponta da ferramenta (YUSSEFIAN et al.,2008)	27
Figura 2.1 – Bloco do motor BIG BORE	39
Figura 2.2 – Posição no bloco do motor dos corpos de prova extraído para análise metalográfica (norma MANN M3340,2004)	40
Figura 2.3 – Micrografia mostrando a morfologia da grafita	41
Figura 2.4 – Micrografia mostrando a estrutura da matriz; matriz perlítica	41

Figura 2.5 – Material a ser removido pela ferramenta de corte	42
Figura 2.6 – Espessura dos mancais do bloco do motor em 37mm.....	42
Figura 2.7 – Inserto de metal duro	43
Figura 2.8 – Inserto de cerâmica WTXQ090608 0906 MN KS6000	43
Figura 2.9 – Principais dimensões dos insertos WTXQ usadas nos ensaios	43
Figura 2.10 – Barra de mandrilar suporte dos insertos	44
Figura 2.11 – Diferença de altura radial e axial de cada inserto montado	44
Figura 2.12 – Centro de Usinagem Horizontal – CNC GROB	46
Figura 2.13 – Gráfico de torque e potência consumida no fuso da máquina	46
Figura 2.14 – Máquina de pré-ajustagem de ferramentas ZOLLER	47
Figura 2.15 – Equipamento para medição do MEV e o EDS – Análise da micrografia dos insertos	47
Figura 2.16 – Comprimento da ferramenta utilizada para o processo de mandrilamento	48
Figura 3.1 – Cavaco de ruptura do CGI	51
Figura 3.2 – Face rugosa do cavaco do CGI	51
Figura 3.3 – Fotos do desgaste das arestas dos insertos em diferentes velocidades de corte	52
Figura 3.4 – Fotos do desgaste frontal dos insertos com 40 blocos do motor usinado	53
Figura 3.5 – Gráfico da evolução do desgaste dos insertos de M.D. – 6 insertos	53
Figura 3.6 – Gráfico da potência consumida do fuso – Variável Velocidade de Corte	54
Figura 3.7 – Aresta do inserto de cerâmica desgastada após 10 peças usinadas – V_B 1,243mm	55
Figura 3.8 - Aresta do inserto de metal duro desgastada após 10 peças usinadas – V_B 0,22mm	55
Figura 3.9 - Gráfico da potência consumida do fuso – Metal Duro x Cerâmica	56
Figura 3.10 - Fotos do desgaste das arestas dos insertos variando o número de dentes	57
Figura 3.11 - Gráfico da evolução do desgaste dos insertos de metal duro – 3 insertos x 6 insertos.	57

Figura 3.12 - Gráfico da potência consumida do fuso e a variável quantidade de dentes	58
Figura 3.13 - Fotos do desgaste dos insertos em diferentes avanços	59
Figura 3.14 - Gráfico da evolução do desgaste dos insertos de metal duro com o avanço por dente como variável	60
Figura 3.15 - Gráfico do consumo de potência do fuso da máquina usando a velocidade de avanço como variável	61
Figura 3.16 – Vista da aresta de corte do inserto ($V_c 110\text{m/min}$ – $f_z 0,22\text{mm}$ – 6 insertos – Metal Duro) em fim de vida da ferramenta	62
Figura 3.17 – Elementos químicos encontrados nos insertos de metal duro, a uma velocidade de corte de 110m/min , avanço por dente de $0,22\text{mm}$ e 6 insertos em uso	63
Figura 3.18 - Vista da aresta de corte do inserto ($V_c 140\text{m/min}$ – $f_z 0,22\text{mm}$ – 6 insertos – Metal Duro) em fim de vida da ferramenta	64
Figura 3.19 - Elementos químicos encontrados nos insertos de metal duro, a uma velocidade de corte de 140m/min , avanço por dente de $0,22\text{mm}$ e 6 insertos em uso	64
Figura 3.20 - Vista da aresta de corte do inserto ($V_c 155\text{m/min}$ – $f_z 0,22\text{mm}$ – 6 insertos – Metal Duro) em fim de vida da ferramenta	65
Figura 3.21 - Elementos químicos encontrados nos insertos de metal duro, a uma velocidade de corte de 155m/min , avanço por dente de $0,22\text{mm}$ e 3 insertos em uso	66
Figura 3.22 - Vista da aresta de corte do inserto ($V_c 155\text{m/min}$ – $f_z 0,22\text{mm}$ – 3 insertos – Cerâmica) em fim de vida da ferramenta	67
Figura 3.23 - Elementos químicos encontrados nos insertos de cerâmica, a uma velocidade de corte de 155m/min , avanço por dente de $0,22\text{mm}$ e 3 insertos em uso	68
Figura 3.24 - Vista da aresta de corte do inserto ($V_c 110\text{m/min}$ – $f_z 0,30\text{mm}$ – 6 insertos – Metal Duro) com 10 peças usinadas	69
Figura 3.25 - Elementos químicos encontrados nos insertos de M.D., a uma v_c de 110m/min , Avanço por dente de $0,30\text{mm}$ após 10 peças usinadas	70
Figura 3.26 - Vista da aresta de corte do inserto ($V_c 110\text{m/min}$ – $f_z 0,30\text{mm}$ – 6 insertos – Metal Duro) com 20 peças usinadas	71
Figura 3.27 - Elementos químicos encontrados nos insertos de M.D., a uma v_c de 110m/min , Avanço por dente de $0,30\text{mm}$ após 20 peças usinadas	72

Figura 3.28 - Vista da aresta de corte do inserto ($V_c 110\text{m/min}$ – $f_z 0,30\text{mm}$ – 6 insertos – Metal Duro) com 30 peças usinadas	73
Figura 3.29 - Elementos químicos encontrados nos insertos de M.D., a uma v_c de 110m/min , Avanço por dente de $0,30\text{mm}$ após 30 peças usinadas	74
Figura 3.30 - Vista da aresta de corte do inserto ($V_c 110\text{m/min}$ – $f_z 0,30\text{mm}$ – 6 insertos – Metal Duro) com 40 peças usinadas	75
Figura 3.31 - Elementos químicos encontrados nos insertos de M.D., a uma v_c de 110m/min , Avanço por dente de $0,30\text{mm}$ após 40 peças usinadas	76
Figura 3.32 – Gráfico da quantidade de peças produzidas por variável nos experimentos	77
Figura 3.33 – Gráfico de tempo de usinagem x volume de cavaco removido	78

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Propriedades médias dos Ferros Fundidos (SINTERCAST, 2010)	8
Tabela 1.2 - Influência da nodularidade nas propriedades do ferro fundido vermicular perlítico (SINTERCAST, 2001; apud ROSA, 2009)	8
Tabela 1.3 - Propriedades mecânicas de vários tipos de ferros fundidos vermiculares em temperatura ambiente (CHIAVERINI, 2005)	9
Tabela 1.4 - Normas para classificação do CGI em diversos países (SINTERCAST, 2010)	11
Tabela 1.5 - Efeitos estruturais de alguns elementos no ferro fundido (CHIAVERINI, 2005)	19
Tabela 1.6 - Composição química e características físicas do metal duro (FERRARESI, 1970) .	32
Tabela 1.7 - Propriedades relativa dos materiais cerâmico comparados com o metal duro.....	38
Tabela 2.1 – Resultados da Metalografia no Material CGI do Bloco do Motor	42
Tabela 2.2 - Ensaio Químico (%): GJV-450 conforme M 3340 (norma MANN)	43
Tabela 2.3 – Especificações dos insertos utilizados no experimento.....	45
Tabela 2.4 – Propriedades Físico-Químicas do óleo “Superedge 6552 BF”	47
Tabela 2.5 – Composição Química do óleo “Superedge 6552 BF”	48
Tabela 2.6 – Informação de dados de corte para realização da primeira fase de testes	52
Tabela 2.7 – Informação de dados de corte para realização da segunda fase de testes.....	53
Tabela 2.8 – Informação de dados de corte para realização da terceira fase de testes.....	53
Tabela 2.9 – Informação de dados de corte para realização da quarta fase de testes.....	53

Lista de abreviaturas e nomenclaturas

Fe	-	Ferro
C	-	Carbono
Si	-	Silício
P	-	Fósforo
Ti	-	Titânio
Mg	-	Magnésio
Mn	-	Manganês
Ni	-	Níquel
Nb	-	Nióbio
Cs	-	Césio
Cu	-	Cobre
Sn	-	Estanho
S	-	Enxofre
Co	-	Cobalto
W	-	Tungstênio
Ce	-	Cério
Ca	-	Cálcio
$V_{B\text{ MAX}}$	-	Desgaste de flanco máximo
V_B	-	Desgaste de flanco
v_c	-	Velocidade de corte
V_f	-	Velocidade de avanço
f	-	Avanço
a_p	-	Profundidade de corte
K_s	-	Pressão específica de corte
P_c	-	Potência de corte
$^{\circ}\text{C}$	-	Grau Celsius
CE	-	Carbono Equivalente

CGI	-	Compacted Graphite Iron
MPa	-	Mega Pascoal
GPa	-	Giga Pascoal
HB	-	Hardness Brinell
ISO	-	International Organization for Standardization
SAE	-	Society of Automotive Engineers
GJV	-	Gusseisen mit Vermiculargrafit
ASTM	-	American Society for Testing Materials
VDG	-	Verein Deutsche Gießereifachleute
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC	-	Aresta Postiça de Corte
CBN	-	Cubic Boron Nitride
PCBN	-	Polycrystalline Cubic Boron Nitride
CVD	-	Chemical Vapour Deposition
PVD	-	Physical Vapour Deposition
EDS	-	Energy Dispersive x-ray Spectrometer
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
KHO	-	Hidróxido de Potácio
[K ₄ [Fe(CN) ₆]]-	-	Ferrocianeto de Potácio

SUMÁRIO

Dedicatória	iv
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
SUMÁRIO	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motor Diesel	3
1.2. Propriedades e vantagens do motor diesel	4
1.3. Características do ferro fundido vermicular	4
1.4. Propriedades do ferro fundido	8
1.5. Processo de Fabricação	11
1.6. Controle do Processo de Fabricação	12
1.7. Usinabilidade do ferro fundido vermicular	13
1.8. Efeitos da Forma da Grafita na Usinabilidade	14
1.9. Influência da Perlita na Usinabilidade	17
1.10. Efeito dos Elementos Químicos na Usinabilidade	18
1.11. Processo de Mandrilamento	20
1.12. Tipos de Mandrilamento	21
1.12.1. Mandrilamento Cônico (figura 1.7)	21
1.12.2. Mandrilamento Cilindrico (figura 1.8)	22

1.12.3.	Mandrilamento Radial (figura 1.9)	22
1.12.4.	Mandrilamento de Superfícies Especiais (figura 1.10)	23
1.13.	Processo de Mandrilamento em Ferro Fundido Vermicular	24
1.13.1.	Mandrilamento com insertos múltiplos de metal-duro	24
1.13.2.	Mandrilamento com insertos rotativos	25
1.13.3.	Freso-mandrilamento	25
1.13.4.	Mandrilamento com insertos de PCD	26
1.14.	Modelo Geométrico no Processo de Mandrilamento	26
1.15.	Material de Ferramentas de Corte Utilizadas no Processo de Mandrilamento	28
1.15.1.	Inserto de Metal Duro	30
1.15.2.	Cobertura em Ferramentas de Metal Duro	34
1.15.3.	Insertos de Material Cerâmico	36
1.16.	Desgaste e Medição do Desgaste das Ferramentas de Corte	38
2.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	41
2.1.	Laboratório utilizado nos experimentos	41
2.2.	Corpos de prova utilizados nos experimentos	41
2.3.	Ferramenta de Corte (insertos)	45
2.4.	Especificação do fluido de corte utilizado	47
2.5.	Centro de Usinagem utilizado nos experimentos	48
2.6.	Equipamento utilizado para medição do desgaste dos insertos	49
2.7.	Processo de Usinagem	51
2.8.	Procedimento experimental	51
3.	RESULTADOS e DISCUSSÃO	54

3.1.	Cavaco	54
3.2.	Desgaste dos insertos (velocidade de corte como variável)	55
3.3.	Desgaste dos insertos (comparação de metal duro com cerâmica para ferramentas com 3 e 6 insertos)	58
3.4.	Desgaste dos insertos (velocidade de corte 110m/min e avanço por faca como variável)	62
3.5.	Análise dos mecanismos de desgaste	65
3.6.	Análise do tempo pelo volume de cavaco removido	82
4.	CONCLUSÕES	85
5.	REFERÊNCIAS	87

1. INTRODUÇÃO

Há uma grande preocupação da sociedade com relação ao meio ambiente e, com isso, as exigências da Legislação Ambiental com relação à emissão de poluentes estão se tornando cada vez mais severas. Esta severidade obriga o desenvolvimento de novas tecnologias para redução destes poluentes em todos os segmentos automotivos (NICOLELLA et al., 2004). O motor diesel tem maior durabilidade, torque e eficiência em comparação ao motor OTTO, mas em contrapartida, emite elevados níveis de materiais particulados e de compostos responsáveis pelo odor característico da emissão do diesel ao ambiente (BRAUN et al., 2003). Devido às vantagens relacionadas ao motor diesel, percebeu-se a necessidade de desenvolver soluções para reduzir as desvantagens da aplicação. Um destes desenvolvimentos foi voltado à fabricação dos blocos do motor com material conhecido como ferro fundido vermicular, que permite desenvolver um motor mais eficiente e com melhor desempenho, pois admite maiores pressões na câmara de combustão, devido às suas boas propriedades mecânicas (GUESSER et al., 2001). Este material também é conhecido como CGI (Compacted Graphite Iron) e está se posicionando no mercado com grande potencial para substituir o Ferro Fundido Cinzento até então usado pelas empresas. Devido à maior resistência mecânica do material vermicular, é possível obter paredes mais finas nas galerias de um bloco do motor, tendo como consequência a redução do peso do motor e o aumento na potência. O meio ambiente é favorecido devido a necessidade de uma menor quantidade de minério de ferro, redução de energia para fabricação do material e redução da energia para movimentação do veículo devido ao peso.

A empresa que detém a tecnologia para uso do material vermicular, pode ter vantagens sobre seus concorrentes já que o atual mercado é muito competitivo e concorrido. Com as vantagens na utilização do material CGI e as muitas lições aprendidas na sua fundição e na sua usinagem, em um futuro não muito longínquo, outras peças poderão ser confeccionadas utilizando este mesmo material para aumentar as exigências em qualquer outro segmento.

O bloco é a maior e mais importante peça de um motor, na qual quase todos os componentes são acoplados. Para fabricação do bloco do motor em ferro fundido vermicular, são necessários alguns processos de usinagem, dentre eles o mandrilamento. Porém, a ferramenta de corte neste processo pode atingir apenas 5% da vida alcançada quando se usina ferro fundido cinzento (XAVIER, 2003), como mostra a figura 1.1.

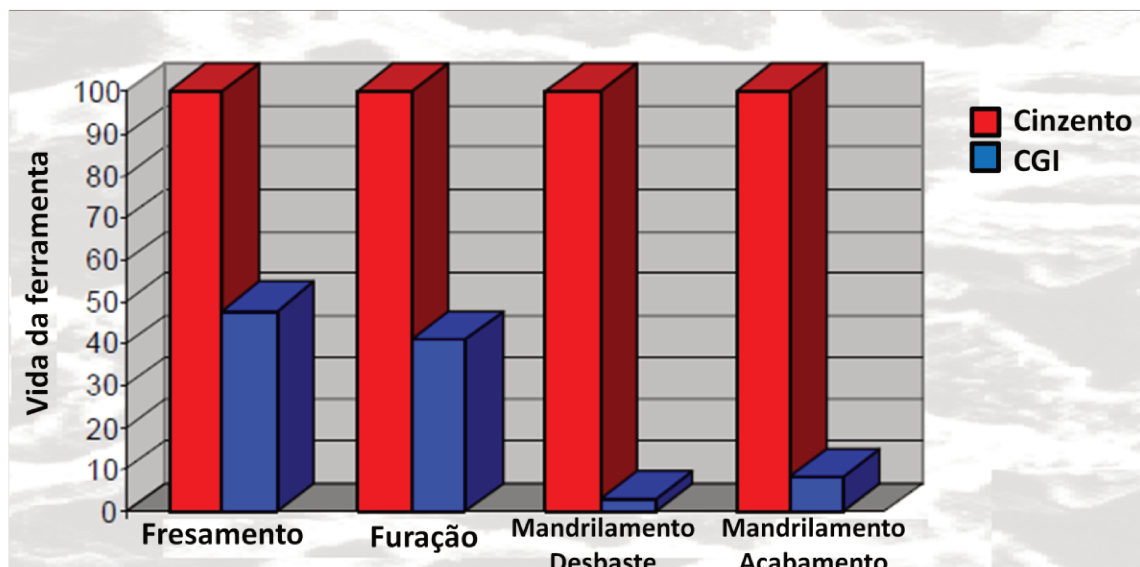


Figura 1.1 - Comparação de usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento e Ferro Fundido Vermicular (SAHM et al., 2002)

O mandrilamento do mancal do bloco do motor também é um aspecto negativo para usinagem devido à deflexão estática da ferramenta e vibrações geradas pelas finas paredes. Há também outros fatores que influenciam negativamente, como a fixação da peça, a rigidez da máquina-ferramenta, o fluido de corte e a quantidade de material a ser removido (sobre-metal). A variação destes fatores também influencia o desempenho da ferramenta (GODINHO, 2007).

Com o desenvolvimento de novos conceitos de ferramentas para mandrilamento e de estratégias de usinagem, a operação de mandrilamento em blocos de motores produzidos em ferro fundido vermicular tornou-se mais econômica e tecnicamente viável. Entretanto, o tempo de ciclo, quando comparado com o ferro fundido cinzento, ainda é significativamente maior, assim como as tolerâncias geométricas do diâmetro mandrilado em acabamento (SAHM et al., 2002).

Devido ao baixo desempenho das ferramentas de corte no processo de mandrilamento em ferro fundido vermicular, cabe uma atenção especial no seu desenvolvimento tecnológico, tanto no processo de fabricação quanto no processo de utilização da ferramenta de corte.

Com estudos para o melhor desempenho da ferramenta, é possível reduzir estoques, paradas de máquinas e o risco de falha de ferramentas (BELONI, 2001). Assim, reduz a possibilidade de retrabalho, rejeição da peça e o descarte da ferramenta, possibilitando o trabalho de Manufatura Enxuta.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar as condições de usinagem e encontrar influências positiva, no processo de mandrilamento em desbaste dos mancais de um bloco de motor, fabricado em ferro fundido vermicular. Com tantos aspectos negativos, conduzir-se-á um estudo de avaliação de desempenho da ferramenta, alternando parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço por dente), potência consumida do fuso da máquina para cada parâmetro, material do inserto utilizado e a influência do desgaste $V_{B\text{ MAX}}$.

Este trabalho foi preparado conforme partes descritas abaixo:

CAPÍTULO 1

- Este capítulo descreve sobre a história do motor diesel, suas propriedades e vantagens. Características e propriedades do ferro fundido vermicular além do controle e fabricação. Descreve também sobre a usinabilidade do ferro fundido vermicular e o processo de mandrilamento.

CAPÍTULO 2

- Este capítulo descreve sobre o material, os equipamentos e os experimentos realizados.

CAPÍTULO 3

- Este capítulo descreve os resultados obtidos nos experimentos.

CAPÍTULO 4

- As discussões estão descritas neste capítulo.

CAPÍTULO 5

- Este capítulo informa as conclusões do trabalho realizado e sugestões para futuros trabalhos.

1.1. Motor Diesel

O motor a diesel foi inventado por Rudolf Christian Karl Diesel e patenteado em 23 de fevereiro de 1897. Como não foi dada muita importância ao invento na época, ele disse: “O uso de óleos vegetais como combustível pode parecer insignificante hoje, mas tais óleos podem se tornar ao longo do tempo, tão importantes quanto o petróleo e o carvão de hoje” – Rudolf Diesel 1912. Rudolf Diesel, engenheiro mecânico alemão, nasceu no dia 18 de março de 1858 em Paris e morreu dia 30 de setembro de 1913. Sua invenção foi considerada o mais importante invento mecânico da história pela simplicidade do motor com pistões e reação óleo-oxigênio, gerando uma enorme transformação no setor industrial em que só eram usados sistemas a vapor (MOURA, 2010).

1.2. Propriedades e vantagens do motor diesel

Os motores diesel são máquinas básicas que geram energia para veículos utilizados principalmente em aplicações que precisem de elevado torque, o que inclui ônibus, grandes caminhões, tratores e máquinas para mineração e dragagem. Atualmente, os motores diesel vêm atraindo uma porção crescente do mercado mundial de veículos de carga leve, cujos motores fornecem baixa potência. Na Europa, por exemplo, 100% dos veículos de carga pesada, e cerca de 60% dos de carga leve, incluindo os utilitários, e ainda 20% dos carros para transporte de passageiros, o que inclui as vans, são movidos a diesel (BRAUN, 2003).

A popularidade do motor diesel deve-se, principalmente, à eficiência do diesel como combustível em relação à gasolina, ou mesmo com relação a outros combustíveis simples ou misturados, como por exemplo, o metanol, que chega a conferir ao motor diesel uma economia relativa de 25 a 45%. Os motores diesel apresentam ainda uma excepcional durabilidade. É comum um motor diesel para veículos de carga pesada ter um tempo de vida superior a um milhão de quilômetros, ou seja, cerca de dez vezes mais que a durabilidade apresentada por um motor à gasolina. Assim, as vantagens oferecidas pelos motores a diesel, tais como durabilidade, segurança e eficiência, justificam sua utilização em vários tipos de máquinas, apesar dos problemas relacionados com a composição de sua emissão e ainda, com os níveis de poluentes sob regulamentação contida na mesma (BRAUN, 2003).

1.3. Características do ferro fundido vermicular

Pelo diagrama de equilíbrio Fe-C, o ferro fundido é uma liga cujo teor de carbono se situa acima de aproximadamente 2,0% de carbono. Como há influência do silício nesta liga, o ferro fundido é considerado uma liga ternária Fe-C-Si porque o silício está freqüentemente presente em teores superiores ao do próprio carbono. Por outro lado, o carbono em quantidade superior a que é retida em solução sólida na austenita, resulta carbonos parcialmente livres na forma de veios de grafita (SINTERCAST, 2010).

O ferro fundido é caracterizado pelo formato de suas partículas de grafite. O ferro fundido cinzento é caracterizado por veios de grafite orientados aleatoriamente, enquanto que o grafite no ferro fundido nodular é caracterizado por suas esferas individuais de grafite. As partículas de grafite

em CGI são orientadas aleatoriamente e alongadas, como em ferro fundido cinzento, mas são mais curtas, mais grossas e têm bordas arredondadas em forma de “verme”, daí o nome vermicular. As partículas de grafite do ferro fundido vermicular são entrelaçadas entre si gerando uma forte adesão (Figura 1.2). Além desta forma de grafite dificultar a inicialização e propagação de trincas, as propriedades mecânicas e condutividade térmica são melhoradas.

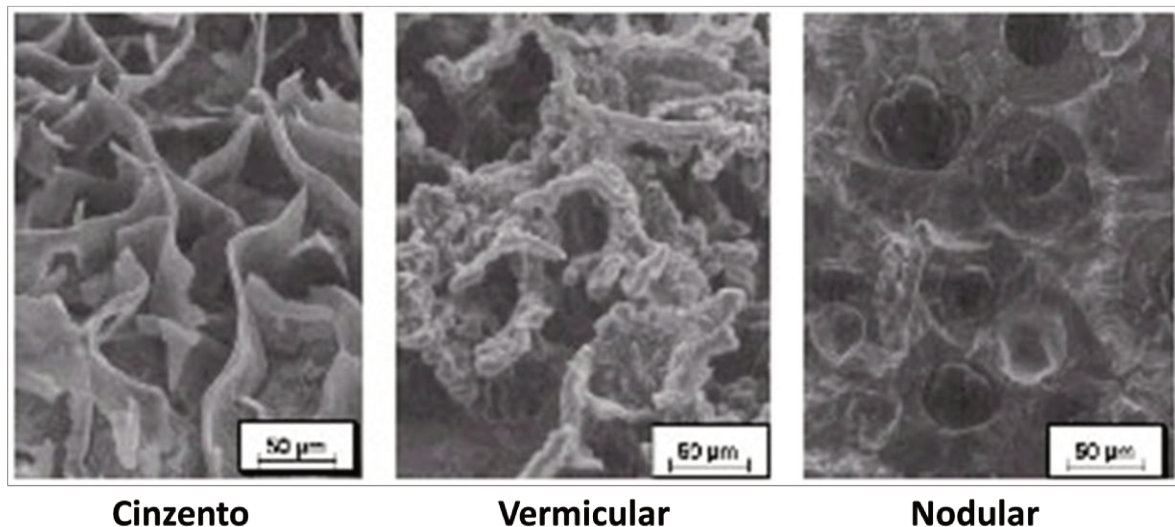


Figura 1.2 - Forma do grafite nos ferros fundidos (SINTERCAST, 2010)

A forma da grafita no ferro fundido vermicular confere propriedades superiores quando comparadas com as do ferro fundido cinzento: resistência mecânica, tenacidade e resistência a choques térmicos 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 (DORÉ 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 (GABALDO, 2009).

A formação do ferro fundido de grafita compactada (vermicular) exige adições de elementos especiais como terras raras, com um elemento adicional como o titânio que reduz a formação de grafitas esferoidal. O ferro fundido vermicular pode ser considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular; possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade. Possui maior capacidade de amortecimento e possui também condutividade térmica mais elevada que o ferro fundido nodular.

A faixa de carbono e silício neste tipo de material é ampla, podendo variar de 3,0 à 3,8% de carbono e 1,0 à 3,5% de silício. É importante também a escolha correta da porcentagem do carbono equivalente (CE) em função da espessura da seção, para evitar flutuação se tiver elevado CE e tendência ao coquilhamento quando baixo for o CE. O carbono equivalente (CE) considera os efeitos do silício(Si) e do fósforo(P), podendo usar uma equação conforme demonstrada abaixo.

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (\text{CHIAVERINI, 2005})$$

O teor de manganês pode variar próximo de 0,1% se desejarmos uma estrutura perlítica e variar perto de 0,6% se desejarmos uma estrutura ferrítica. O fósforo é mantido abaixo de 0,06% de modo a ter a máxima ductilidade. O enxofre deve ser inferior 0,025%. Para produzir a grafita compactada deve-se adicionar um ou mais dos elementos: magnésio, terras raras (cério, lantânio, praseodímio, etc.), cálcio, titânio e alumínio. A quantidade de magnésio deve ser tal a resultar um teor residual desse elemento de 50 a 600 ppm, na presença de 0,15 a 0,50% de titânio e 10 a 150 ppm de terras raras como o cério. O ferro fundido vermicular tem substituído com vantagens o nodular em aplicações em que este último não pode ser empregado devido a sua condutibilidade térmica mais baixa e a sua tendência de empenar (CHIAVERINI, 2005).

As vantagens do ferro fundido vermicular com relação ao ferro fundido nodular, segundo DAWSON (2002) são:

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

As vantagens do ferro fundido vermicular com relação ao ferro fundido nodular, segundo CHIAVERINI (2005) são:

- Coeficiente mais baixo de dilatação térmica;
- Maior condutibilidade térmica;
- Maior resistência ao choque térmico;
- Maior capacidade de amortecimento;
- Maior fundibilidade;

Em consequência, esse material é aplicado em situações em que a resistência do ferro fundido cinzento é insuficiente, mas a utilização do ferro fundido nodular é indesejável devido às propriedades menos favoráveis de fundição.

As vantagens do ferro fundido vermicular com relação ao ferro fundido cinzento, segundo DAWSON(2002) são:

- 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;

As vantagens do ferro fundido vermicular com relação ao ferro fundido cinzento, segundo CHIAVERINI(2005) são:

- Maior resistência à tração para o mesmo carbono equivalente, o que reduz o uso do elemento de liga de custo elevado como o níquel, cromo, cobre e molibdênio;
- Relação mais alta de resistência/fadiga;
- Maiores ductilidade e tenacidade, o que resulta em margem superior de segurança para fratura;
- Menor oxidação e dilatação em temperaturas elevadas.

O ferro fundido vermicular (CGI) tem uma série de características que podem torná-lo uma alternativa excelente para ferro fundido cinzento para aplicações em motores. O material oferece aumento de 75% na resistência em comparação com o ferro fundido cinzento. Tem também características térmicas e de impacto intermediárias entre as dos ferros fundidos cinzento e nodular. Além do mais, este aumento na resistência do material, proporciona diminuição na seção de parede dos produtos produzidos por este material. Vários fabricantes europeus estão usando CGI para motores, tanto diesel como gasolina. Embora o material CGI possua propriedades mecânicas e físicas benéficas a sua aplicação, sua usinagem ainda é um problema. Comparado com o ferro fundido cinzento, as velocidades de corte utilizadas tem que ser menores, implicando em tempo de ciclo de até três vezes maior que o tradicional (VASILASH, 2006).

O ferro fundido vermicular, do ponto de vista químico, não apresenta nenhuma diferença significativa com relação aos 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. 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.

1.4. Propriedades do ferro fundido

As propriedades de um ferro fundido são definidas em função da microestrutura e da composição química. A tabela 1.1 mostra algumas propriedades mecânicas e térmicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular.

Tabela 1.1 - Propriedades médias dos Ferros Fundidos (SINTERCAST, 2010)

PROPRIEDADES	Ferro Fundido Cinzento	Ferro Fundido Vermicular	Ferro Fundido Nodular
Resistência à tração (MPa)	250	450	750
Módulo de Elasticidade (GPa)	105	150	160
Alongamento (%)	0	1,5	2,5
Índice de resistência			
- Flexão rotativa	0,35 – 0,50	0,45 – 0,50	0,45 – 0,50
- Flexão em três pontos	0,55 – 0,65	0,60 – 0,70	0,65 – 0,75
- Tensão de compressão	0,20 – 0,30	0,25 – 0,35	0,65 - 0,75
Condutividade Térmica (W/m-k)	48	38	32

A microestrutura do grafite no ferro fundido vermicular é expressa em porcentagem de nodularidade. Isto significa que parte das partículas de grafite do ferro vermicular apresenta-se em forma de nódulos, como no ferro nodular. O ferro fundido vermicular inclui invariavelmente algumas partículas esferoidais de grafita nodular que, quando a nodularidade aumenta, aumenta também a rigidez diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica. Além disso, com o aumento da nodularidade, a resistência mecânica do material também é elevada, prejudicando sua usinabilidade (DAWSON,2007). A tabela 1.2 mostra a influência da proporção de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular.

Tabela 2.2 - Influência da nodularidade nas propriedades do ferro fundido vermicular perlítico (SINTERCAST,2001;apud ROSA,2009).

Propriedades (25°C)	Nodularidade (%)				
	10	30	50	70	90
Resistência à Tração (MPa)	450	520	590	640	700
Limite de Elasticidade 0,2% (MPa)	370	390	410	440	490
Limite de Fadiga (MPa)	210	220	230	240	255
Módulo de Elasticidade (GPa)	145	150	155	155	160
Alongamento (%)	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6
Expansão Térmica (µm/m°C)	11,0	11,0	11,0	11,5	12,0
Condutividade Térmica (W/m°C)	36	33	31	30	28

A tabela 1.3 mostra as propriedades de diversas ligas de ferro fundido vermicular em função do tipo de matriz (ferrítica e/ou perlítica) e em função da presença de elementos de liga formadores da grafita compactada.

Tabela 1.3 - Propriedades mecânicas de vários tipos de ferros fundidos vermiculares em temperatura ambiente (CHIAVERINI, 2005)

Condição estrutural	Limite Resistência à tração (MPa)	Limite escoamento (0,2%) MPa	Alongamento (%)	Dureza HB
Tratados com adição de cério				
No estado fundido				
Ferrita acima de 95%	336	257	6,7	150
Ferrita/Perlita				
Perlita acima de 5%	298	224	5,3	
100% Ferrita	338	245	8,0	140
Ferrita/Perlita				
85% Ferrita	320	242	3,5	164
Perlita				
90% Perlita	400	320	0,5	-
10% Ferrita	550	430	1,5	-

Tratados com combinações de Magnésio mais Titânio (mais Césio)				
Condição estrutural	Limite Resist. à tração (MPa)	Limite escoamento (0,2%) MPa	Alongamento (%)	Dureza HB
Ferrita no estado fundido 0,017%Mg, 0,062%Ti, 0,036%Cs	380	272	2	179
Ferrita no estado fundido 0,024%Mg, 0,084%Ti, 0,030%Cs	338	276	2,5	184
Perlita no estado fundido 0,026%Mg, 0,083%Ti, 0,074%Cs	473	335	2	217
Perlita no estado fundido 70% Perlita, 30% Ferrita	386	278	2	-

A resistência à tração do ferro fundido vermicular diminui à medida que aumenta o carbono equivalente, mas a velocidade de decréscimo desta propriedade é menor do que no caso do ferro fundido cinzento. A elevação do teor de silício aumenta o limite de resistência à tração, limite de escoamento e dureza, tanto na condição fundida como na recozida.

Em um ferro fundido de matriz predominantemente perlítica, a resistência à compressão é três vezes maior do que a resistência à tração.

O comportamento deste material à temperatura de 500°C, sob o ponto de vista de dilatação e formação de casca de óxido é mais ou menos idêntico aos dos ferros fundidos cinzentos de composição semelhante. Contudo, a resistência à formação da casca de óxido e à expansão a 600°C é superior à do ferro fundido cinzento (CHIAVERINI, 2005).

No ano de 2006, a ISO criou uma abreviação “GJV” para ferro fundido vermicular e cinco classes foram especificadas baseadas no mínimo limite de resistência à tração, incluindo:

GJV300 (ferrítico), GJV 350, GJV 400, GJV 450 (perlítico) e GJV 500 (ligado)

Há várias organizações desenvolvendo e classificando o Ferro Fundido Vermicular (CGI) conforme tabela 1.4.

Tabela 1.4 - Normas para classificação do CGI em diversos países (SINTERCAST, 2010)

País	Norma	Número	Ano
Romênia	STAS	12443-86	1986
China	JB	4403-87	1987
USA	ASTM	A 842-85	1997
Alemanha	VDG	W 50	2002
Internacional	SAE	J 1887	2002
Internacional	ISO	16112:2006	2006

1.5. Processo de Fabricação

A grafita esferoidal é obtida pela adição na liga de ferro fundido de elementos denominados nodulizantes, que modificam a forma de crescimento da grafita. Os elementos nodulizantes mais comuns na indústria são: o magnésio, o cério, o cálcio e terras raras. Entre estes elementos o magnésio (Mg) é o mais utilizado. Recomenda-se teores entre 0,04% e 0,05% de Mg. No caso de Ce, teores entre 0,02% e 0,04% e no caso de Ca, entre 0,01% e 0,02%.

A presença de impurezas, como enxofre, antimônio, chumbo, telúrio ou bismuto, apresenta efeito deletério sobre a nodulização. DAWSON(2004) cita que teores de magnésio (Mg) de apenas 0,02% seriam suficientes para promover a nodulização da grafita, desde que os teores de impurezas, principalmente enxofre(S), fossem mantidos baixos. O nodulizante é adicionado na forma pura (Mg metálico) ou na forma de ante-ligas: Ni-20%Mg, Cu-15%Mg ou Fe-Si-Mg.

O ferro fundido vermicular pode ser obtido adicionando elementos nodulizantes como o magnésio na liga, mas em uma porcentagem insuficiente para formar ferro fundido nodular, resultando em um material intermediário, ou adicionando elemento nodulizante com porcentagem suficiente para formar o ferro fundido nodular, mas ao mesmo tempo adicionando-se elementos anti-nodulizantes como o titânio.

O processo de formação do ferro fundido vermicular adicionando elementos anti-nodulizante é mais fácil de ser realizado porque não é necessário um controle tão rigoroso da adição de magnésio na liga. Entretanto, esta adição implica no uso do titânio que tenderá a formar carbonetos e carbonitretos duros, que prejudicam bastante a vida da ferramenta de usinagem da liga. Para evitar este problema, é necessário um método mais criterioso no processo utilizando equipamentos especiais que garantam composição de magnésio na liga mais adequada (DAWSON et al., 2004).

1.6. Controle do Processo de Fabricação

A técnica de fabricação do ferro fundido vermicular é crítica para a usinabilidade da liga. A mudança na forma da grafita a partir dos nódulos compactados, é devido à ação do magnésio, que é um elemento nodulizante. Para que a grafita compactada seja formada, uma quantidade de magnésio deve ser mantida entre 0.008% e 0.012% conforme figura 1.3. Como o controle da composição nesta estreita faixa é muito difícil, o titânio é usado em alguns casos como elemento anti-nodulizante. A quantidade de titânio está entre 0,1 e 0,2%, o que aumenta a possibilidade de obtenção do grafite compactado para percentuais mais elevados de magnésio. Contudo, a adição de titânio gera um inconveniente causando através da precipitação de carboneto e carbonitreto de titânio, que são inclusões rígidas que comprometem a usinabilidade do produto (DAWSON, 1999).

Apesar da estreita faixa de controle do elemento para fabricação do ferro fundido vermicular, muitas fundições obtiveram bons resultados devidas a técnicas desenvolvidas e muita disciplina. Estas técnicas podem permitir que a maioria dos blocos esteja dentro do especificado, mas o sistema de controle garante que potenciais peças que possam estar fora do especificado sejam identificadas e corrigidas antes de serem vazadas. A necessidade de controle do processo depende do volume de produção, complexidade do componente e especificação da microestrutura.

Há um procedimento necessário para evitar que os flocos de grafite não se formem antes do processo final de vazamento. Este procedimento consiste basicamente de; antes da transição do ferro fundido cinzento, adicionar o magnésio em aproximadamente 0,001% a cada 5 minutos. Este processo pode demorar até 15 minutos após o início da adição do magnésio.

Uma segunda consideração é que mesmo com a porcentagem correta da adição de magnésio, não há estabilidade se o índice de oxigênio ativo e / ou enxofre forem elevados. Se isto ocorrer, o magnésio ativo é consumido deslocando a linha da porcentagem de magnésio para esquerda conforme demonstrado na figura 1.3. Inversamente, se os níveis de oxigênio ou de enxofre forem relativamente baixos, a linha de porcentagem de magnésio se deslocar para direita. Por estas razões, as variações na composição, limpeza, oxidação e umidade do material de carga tornam impossível definir uma especificação química fixa para o CGI (DAWSON, 2002).

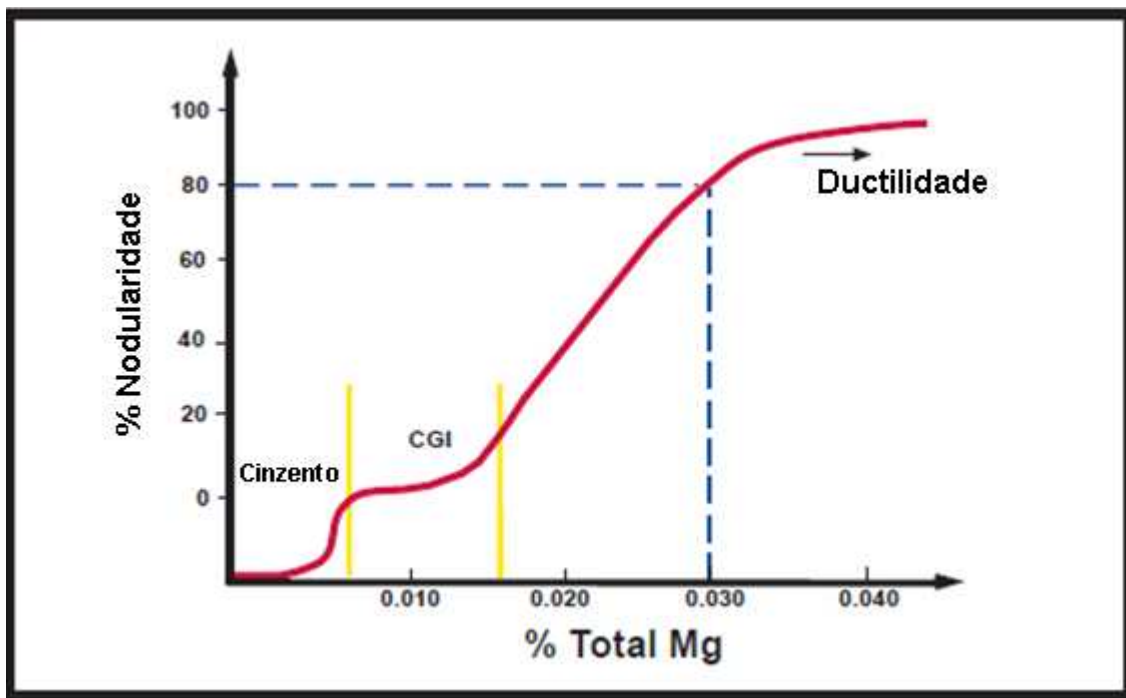


Figura 1.3 - Faixa de magnésio necessária para formação do CGI (DAWSON, 2002)

1.7. Usinabilidade do ferro fundido vermicular

Segundo CHIAVERINI (2005), a definição mais simples da usinabilidade é a propriedade relacionada com a maior ou menor facilidade de um material ser fabricado por processos de usinagem. A usinabilidade também pode ser definida em termos de vida de ferramenta de corte, ou pode relacionar-se com a energia ou tempo necessário para remover certa quantidade de material.

Segundo DINIZ (2008), a usinabilidade de um material pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade) um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (sejam a frio ou a quente) e do eventual encruamento.

Atualmente, um dos maiores desafios é introduzir o CGI nas peças cujos processos de usinagem apresentam desempenho muito bom nas mesmas peças fabricadas em ferro fundido cinzento. Assim, o desafio é 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 (DAWSON, 2004).

Segundo DAWSON (1999), há alguns fatores de influência na usinabilidade do CGI:

- Efeitos da forma da grafita;
- Efeitos da perlita;
- Efeitos dos elementos químicos como chumbo, manganês, silício, enxofre, titânio e cobre;
- Efeitos da inclusão.

Em altas velocidades de corte, a vida da ferramenta também tende a ser ainda menor no CGI quando comparado com o ferro fundido cinzento (WALTER, 2007). Isto 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.

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

1.8. Efeitos da Forma da Grafita na Usinabilidade

A formação do cavaco de ferro fundido é diretamente afetada pela presença da grafita, que é conhecida por ter resistência mecânica baixa e gerar descontinuidades e efeitos da concentração de tensão na matriz, portanto, ajudando o processo de remoção de material. O mecanismo de formação de cavaco em ferro fundido cinzento é mostrado na figura 1.4. No início, a ferramenta compacta o material sob o flanco criando uma fratura, que se propaga em frente e abaixo da aresta de corte (a). Como o movimento de corte da ferramenta continua, o material se torna completamente independente (b). Para algumas situações, principalmente com o ferro fundido cinzento, uma parte de material é arrancada à frente da ferramenta, causando uma perda temporária do contato entre ferramenta e peça, até a ferramenta encontrar a próxima porção de material (c). Este processo de remoção de material contribui para aumentar a rugosidade na superfície da peça (d).

A grafita, por ser um componente de dureza relativamente baixa se comparada com o material da matriz, produz descontinuidades no material, facilitando a quebra do cavaco na usinagem (CONSALTER, 1987).

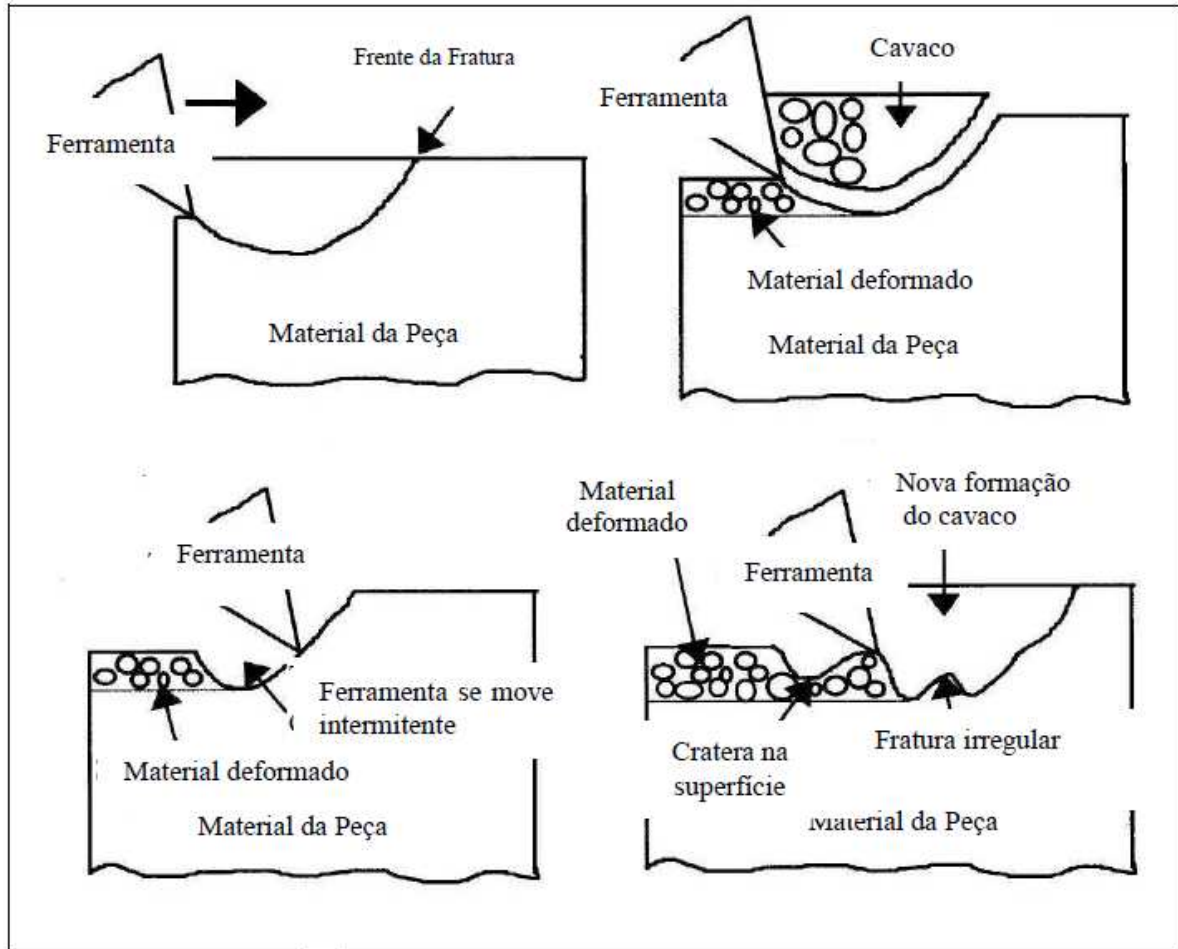


Figura 1.4 - Esquema do Mecanismo da formação do cavaco em ferro fundido (COHEN,2000; apud ROSA, 2009)

A grafita também atua como um agente lubrificante, reduzindo o atrito entre a peça e a ferramenta além de reduzir o risco de micro solda do cavaco com a ferramenta. Sendo assim, a consequência do efeito é o aumento na vida da ferramenta.

No processo da formação do cavaco de ferro fundido nodular, as forças de compressão geram o desprendimento dos nódulos da matriz e a deformação plástica da matriz entre os nódulos. Esta deformação plástica causa o alongamento dos nódulos na direção do corte, ocasionando fratura dúctil.

Para o ferro fundido cinzento, a formação do cavaco acontece através de fraturas das lamelas de grafita, formando cavacos não contínuos. Há três estágios para formação destes cavacos, ou seja, inicia com a separação da matriz das lamelas de grafita, gerando micro-trincas; em consequência as grandes trincas são formadas através da junção destas micro-trincas provenientes da interface com a ferramenta e, por último, ocorre à fragmentação do cavaco.

A formação do cavaco do ferro fundido vermicular é uma mistura dos processos de formação de cavaco do ferro fundido nodular e formação de cavaco do ferro fundido cinzento, ou seja, os cavacos se formam por deformação plástica e também por fraturas (MARWANGA et al., 1999). A figura 1.5 ilustra os diferentes cavacos formados na usinagem destas três formas de ferro fundido.

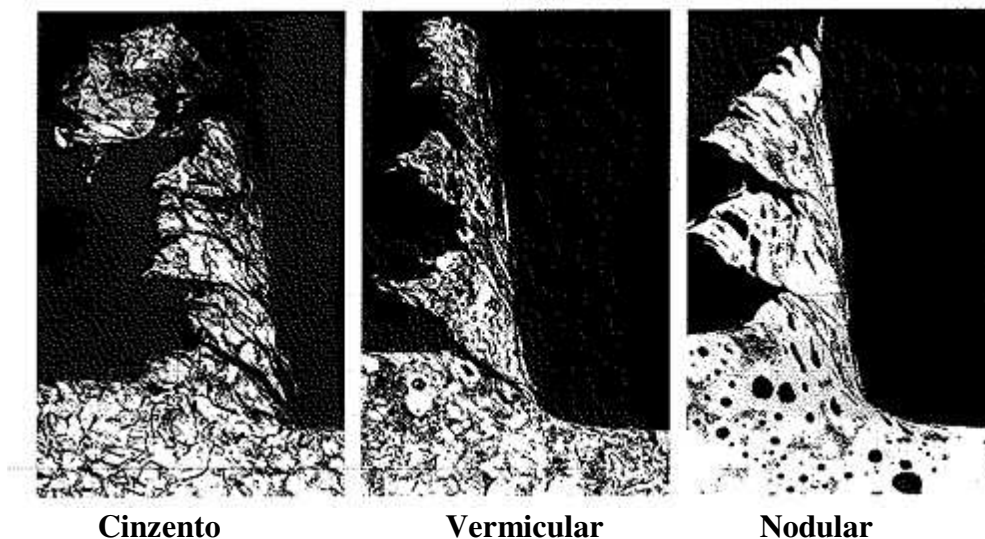


Figura 1.5 - Formação do cavaco e ruptura em ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular (REUTER et al., 1999)

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, 2001).

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, 2002).

1.9. Influência da Perlita na Usinabilidade

A resistência mecânica dos ferros fundidos é proporcional à relação entre perlita e ferrita da matriz se as demais variáveis forem mantidas constantes. Contudo, um elevado teor de perlita não é necessariamente a maior causa do desgaste da ferramenta de corte.

Foram realizados testes de usinagem para o ferro fundido vermicular com diferentes valores de perlita. Cobre e estanho foram utilizados como elementos de estabilização. A fim de atingir os 100% de perlita, manganês também foi adicionado. Foram utilizadas ferramentas de metal duro para os testes, com velocidades de corte de 150 e 250 m/min conforme Figura 1.6. Pode-se ver nesta figura que, principalmente na velocidade de corte mais alta, quando o teor de perlita ultrapassa 75%, a vida da ferramenta cai rapidamente (DAWSON, 1999).

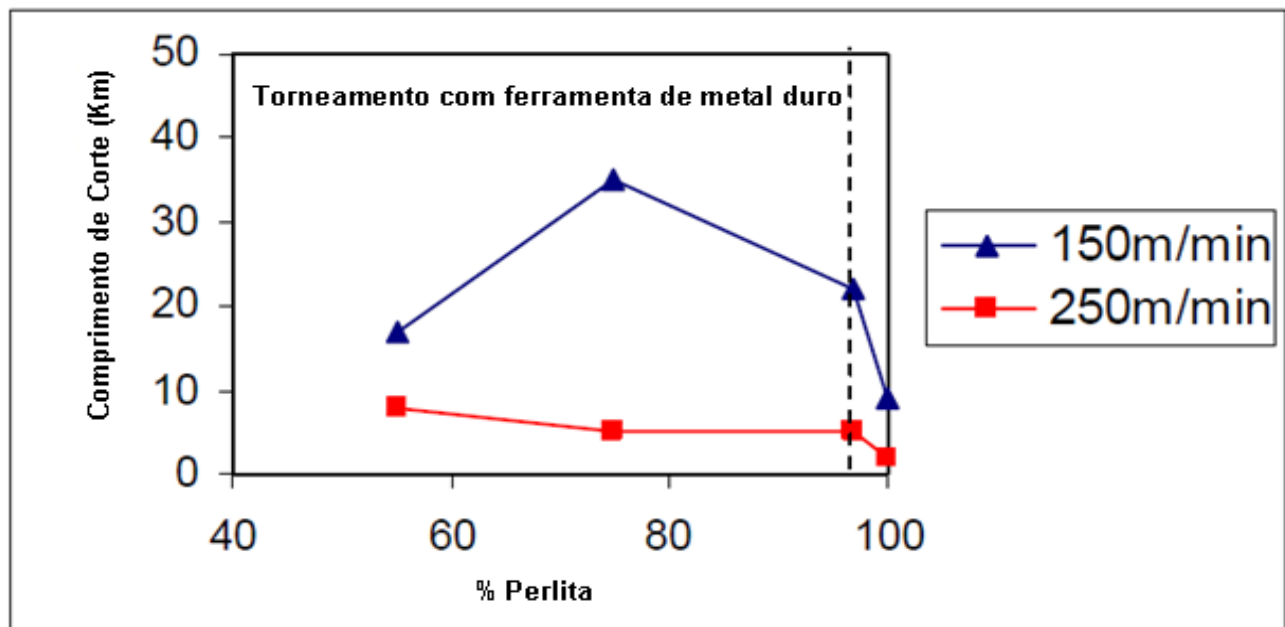


Figura 1.6 - Influência do Teor de Perlita na Vida da Ferramenta de Torneamento no CGI (DAWSON, 1999)

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

1.10. Efeito dos Elementos Químicos na Usinabilidade

O carbono e o silício são elementos com uma grande influência na estrutura do material; o carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício é essencialmente um elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro. O manganês, sempre presente, tem efeito oposto ao do silício, isto é, estabiliza a cementita e compensa de certo modo, a ação grafitizante do silício. Todo elemento químico grafitizante é benéfico à usinabilidade, pois a grafita, como visto, é um ponto frágil que, em geral, facilita a formação do cavaco. Por outro lado, os elementos que estabilizam a cementita (usam o carbono para formar Fe_3C e não para formar grafita) prejudicam a usinabilidade, já que a cementita é um carboneto duro.

A rigor, o manganês nos ferros fundidos, tanto quanto nos aços, é adicionado como dessulfurante. Entretanto, como na prática há sempre um excesso de manganês, este atua como estabilizador da perlita. Daí o seu efeito oposto ao do silício e sua utilidade para produzir estruturas com matriz predominantemente perlítica, sobretudo em peças fundidas volumosas. Ao auxiliar na formação de uma estrutura perlítica (e não ferrítica), o manganês aumenta a resistência mecânica da liga e, com isso, prejudica a usinabilidade. Por outro lado, o sulfeto de manganês atua como lubrificante sólido, melhorando a usinabilidade do material.

O enxofre e o fósforo, que são impurezas usualmente encontradas nos ferros fundidos, não têm uma ação muito significativa do ponto de vista de tendência grafitizante, mas o fósforo é um estabilizador relativamente forte do carboneto de ferro. Sua principal ação é na estrutura do material formando com o ferro e o carbono um composto de natureza eutética (CHIAVERINI, 2005). O enxofre presente no ferro fundido 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 cromo é presente no ferro fundido 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. 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. 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. (DAWSON et al.,2001)

A tabela 1.5 resume a ação dos elementos de liga nos ferros fundidos.

Tabela 1.5 - Efeitos estruturais de alguns elementos no ferro fundido (CHIAVERINI,2005)

ELEMENTO	Efeitos durante a Solidificação	Efeitos durante a reação eutetóide
Alumínio	Forte grafitizante	Promove a formação de ferrita e grafita
Antimônio	Pequeno efeito nas quantidades usadas	Forte estabilizador da perlita
Boro até 0,15%	Forte grafitizante	Promove a formação de grafita
Boro acima de 0,15%	Estabilizador do carboneto	Forte tendência à retenção da perlita
Cromo	Forte ação carbonetante	Forte tendência à formação da perlita
Cobre	Grafitizante fraco	Promove a formação da perlita
Manganês	Fraca tendência carbonetante	Formador de perlita
Molibdênio	Fraca tendência carbonetante	Forte formador de perlita
Níquel	Grafitizante	Fracamente promotor de perlita
Silício	Forte grafitizante	Promove a formação de ferrita e grafita
Telúrio	Forte tendência carbonetante	Muito fraco estabilizador da perlita
Estanho	Pequeno efeito nas quantidades usadas	Forte tendência à retenção da perlita
Titânio até 0,25%	Grafitizante	Promove a formação de grafita
Vanádio	Forte tendência carbonetante	Forte formador de perlita

A velocidade de resfriamento é um fator relacionado a solidificação no interior dos moldes e a espessura das peças moldadas. Em outras palavras, as seções espessas implicam em velocidades de resfriamento relativamente baixas, e seções finas implicam em velocidades altas. Isto significa que em peças de seções com diferentes espessuras, ocorrem também diferentes velocidades de resfriamento. Para elevadas velocidades de resfriamento, como as que se verificam em seções finas ou nas áreas adjacentes às paredes do molde, não há muito tempo para a decomposição da cementita, de modo que, dependendo dos teores de carbono e de silício, pouca ou nenhuma grafitação ocorre, e há tendência à formação de ferro fundido branco. Com as velocidades de resfriamento baixas das seções mais espessas, ocorre uma apreciável grafitação, dependendo sempre do teor de silício. A estrutura será essencialmente de grafita e perlita. Para resfriamento

ainda mais lento e teor de silício mais elevado, a cementita da perlita pode também se decompor parcialmente, originando-se assim, a estrutura constituída de veios de grafita, perlita e ferrita. Essa estrutura confere ao material características de baixa dureza e excelente usinabilidade, além de razoável resistência mecânica(CHIAVERINI,2005).

1.11. Processo de Mandrilamento

O processo de mandrilamento é normalmente empregado na usinagem de elementos de maior diâmetro em um bloco do motor, tais como diâmetro dos cilindros e diâmetros dos mancais do virabrequim. A operação de mandrilamento é executada em duas ou três etapas dependendo das tolerâncias exigidas no desenho do produto e do tipo de ferramenta a ser empregado. Essencialmente as condições de mandrilamento diferem um pouco das condições de torneamento, mas esta operação ilustra a importância da rigidez de todo conjunto ferramenta, dispositivo e máquina. Particularmente quando um cilindro de grande extensão e pequeno diâmetro é mandrilado, o corpo da ferramenta que não é tão rígido, tende a defletir e, conseqüentemente, causar vibrações. Estas vibrações podem afetar não somente a precisão dimensional, mas também o acabamento das peças e a vida da ferramenta de corte. Mandrilamento é um processo em que furos realizados no processo de furação, furos fundidos na peça, componentes forjados ou extrudados são ampliados ou acabados com uma ferramenta de corte montada em uma barra de mandrilar. O processo é mais usado em aplicações em que bom acabamento da superfície interna ou tolerância dimensional apertada são requeridos. Por causa das restrições geométricas, as barras de mandrilar são em geral, longas e compridas, o que faz com que elas estejam facilmente sujeitas a desvios estáticos e dinâmicos. Estes desvios ou vibração da ferramenta não somente fazem com que os parâmetros de usinagem precisem ser alterados, como induz a erros dimensionais e reduz a qualidade da superfície e a vida da ferramenta. O estudo das forças de corte no processo de mandrilar é, portanto, um pré-requisito para a seleção adequada das condições de corte e também para preservar a segurança do processo evitando desvios excessivos da ferramenta ou vibrações dinâmicas. O raio da ponta da ferramenta e a variação do ângulo da aresta de corte resultam na distribuição não-uniforme da espessura do cavaco e, conseqüentemente, da força de corte (MOCELLIN, 2007).

Em função das menores velocidades de corte empregadas nas ferramentas de metal duro em relação às usadas nas ferramentas de cerâmica ou CBN, utiliza-se maior número de insertos de metal duro, permitindo maiores velocidades de avanço compensando parcialmente a perda de produtividade (KOPPKA et al., 2003).

Operações de mandrilamento são tradicionalmente realizadas em blocos de motores de ferro fundido cinzento por ferramentas de cerâmica e CBN, que permitem elevadas velocidades de corte e alta produtividade (KOPPKA et al., 2003). O severo desgaste verificado nas ferramentas de mandrilar ferro fundido vermicular tem motivado pesquisas, com o objetivo de identificar os mecanismos de desgaste das ferramentas, assim como encontrar soluções econômicas para esta usinagem, envolvendo institutos de pesquisa, indústrias automobilísticas, fundições, fabricantes de ferramentas e fabricantes de máquinas. Independentemente do material da ferramenta empregada, metal duro ou cerâmica, as velocidades de corte ainda são muito inferiores às aquelas tradicionalmente utilizadas no ferro fundido cinzento, ou seja, ainda há uma grande necessidade no desenvolvimento do processo de usinagem de mandrilamento do bloco do motor de maneira integral (KASSACK et al., 2002).

1.12. Tipos de Mandrilamento

Dependendo do trabalho, o mandrilamento que também é conhecido como mandrilagem ou broqueamento, pode ser cilíndrico, cônico, radial ou esférico. Por meio do processo de mandrilamento, pode-se conseguir superfícies cilíndricas ou cônicas, internas, em espaços normalmente difíceis de serem atingidos, com eixos perfeitamente paralelos entre si (GUEDES, 2006).

1.12.1. Mandrilamento Cônico (figura 1.7)

Processo de mandrilamento no qual a superfície usinada é cônica de revolução, cujo eixo coincide com o eixo em torno do qual gira a ferramenta. Isto ocorre quando há um movimento de avanço simultâneo com um movimento radial, gerando um diâmetro interno cônico.

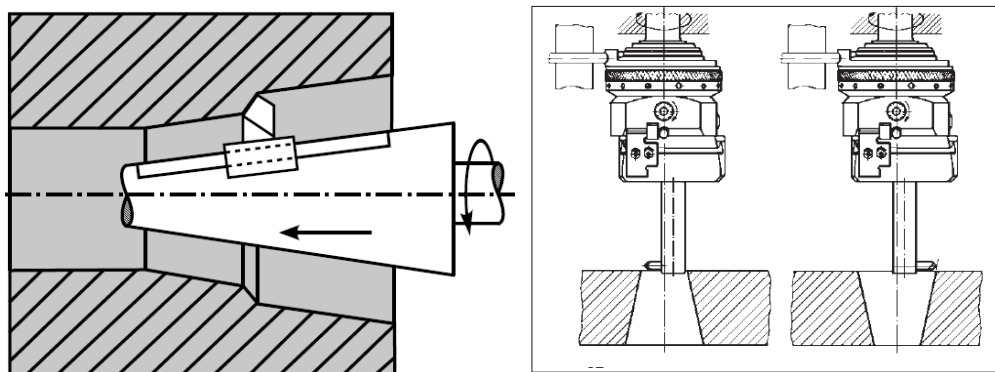


Figura 1.7 – Mandrilamento cônico

1.12.2. Mandrilamento Cilindrico (figura 1.8)

Processo de mandrilamento no qual a superfície usinada é cilíndrica de revolução, cujo eixo coincide com o eixo em torno do qual gira a ferramenta. Neste caso há somente o movimento de avanço gerando um diâmetro interno cilíndrico.

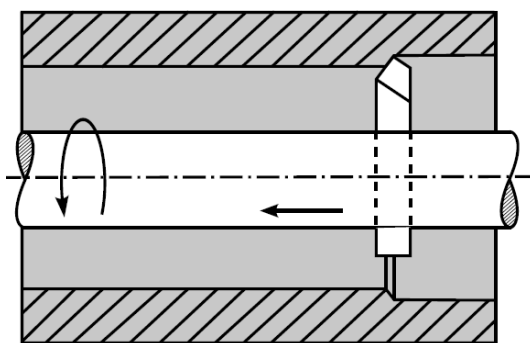


Figura 1.8 – Mandrilamento cilíndrico

1.12.3. Mandrilamento Radial (figura 1.9)

Processo de mandrilamento no qual a superfície usinada é plana e perpendicular ao eixo em torno do qual gira a ferramenta. Neste processo há somente o movimento radial da ferramenta gerando um processo de faceamento.

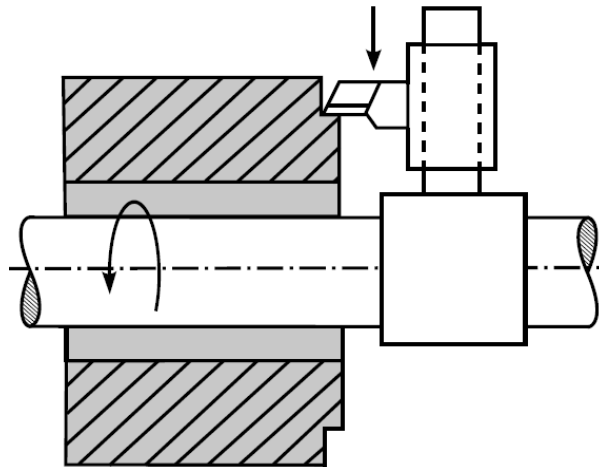


Figura 1.9 – Mandrilamento radial

1.12.4. Mandrilamento de Superfícies Especiais (figura 1.10)

Processo de mandrilamento no qual a superfície usinada é uma superfície de revolução, cujo eixo coincide com o eixo do qual gira a ferramenta. Ex.: Mandrilamento esférico e mandrilamento de sangramento.

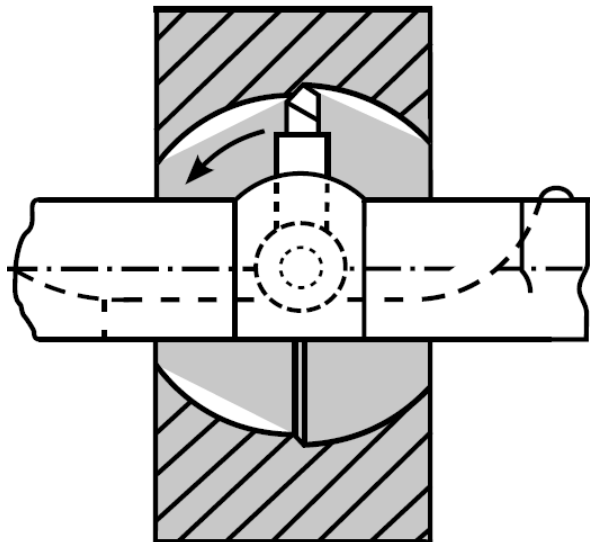


Figura 1.10 – Mandrilamento esférico (FERRARESI, 1970)

1.13. Processo de Mandrilamento em Ferro Fundido Vermicular

Os processos de mandrilamento do ferro fundido vermicular podem ser divididos em quatro grupos:

- Mandrilamento com insertos múltiplos de metal-duro;
- Mandrilamento com insertos rotativos;
- Mandrilamento definido como “freso-mandrilamento”;
- Mandrilamento com insertos de PCD.

1.13.1. Mandrilamento com insertos múltiplos de metal-duro

As ferramentas de mandrilar com insertos de metal-duro conforme mostradas na figura 1.11 são usadas em função das menores velocidades de corte empregadas em comparação à cerâmica ou o PCBN. Utiliza-se um maior número de insertos permitindo maiores velocidades de avanço e compensando parcialmente a perda de produtividade (REUTER et al., 1999). Existem algumas barras de mandrilar cujos insertos não são montados uniformemente no diâmetro e até mesmo na altura. Estas barras de mandrilar são chamadas de ferramentas com passo diferencial e o objetivo é evitar vibrações devido a problemas de ressonância, mesmo em condições de corte favoráveis, modificando a frequência de entrada das arestas no corte (SOUTO, 2007).



Figura 1.11 – Barra de mandrilar com insertos múltiplos (MAPAL, 2010)

1.13.2. Mandrilamento com insertos rotativos

Ferramentas com insertos rotativos de PCBN, Si_3N_4 ou Metal Duro, conforme figura 1.12, permitem grande produtividade em altas velocidades de corte. Este tipo de ferramenta apresenta um maior potencial principalmente para operação de desbaste, podendo também ser utilizadas em operação de acabamento, dependendo da aplicação (REUTER et al., 2000). Estes insertos giram devido aos esforços de corte aplicados sobre eles, já que suas fixações permitem este grau de liberdade. Assim, a seção de contato com a ferramenta e cavaco varia todo instante, distribuindo melhor o desgaste/avaria, aumentando a vida da ferramenta.

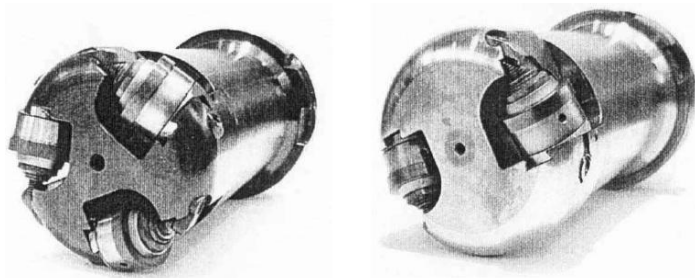


Figura 1.12 – Barra de mandrilar com insertos rotativos

1.13.3. Freso-mandrilamento

Define-se freso mandrilamento como um processo de usinagem com corte intermitente, por meio do processo de fresamento helicoidal, realizado com ferramentas de diâmetro menor que o usinado, ou seja, a ferramenta realiza movimento de interpolação circular e avança no sentido do cilindro, conforme figura 1.13. O fabricante de máquinas MAKINO e o fabricante de ferramentas SANDVIK desenvolveram este processo utilizando a ferramenta CoroMILL 790 e um Centro de Usinagem Horizontal(a81M). Por meio da melhor precisão de posicionamento dos insertos na ferramenta e tolerâncias dimensionais dos insertos de metal-duro, há possibilidades de ganho em vida de ferramenta e possível eliminação da etapa de mandrilamento de semi-acabamento, realizando-se o mandrilamento de desbaste de modo convencional e o mandrilamento de acabamento com o processo de freso-mandrilamento. Este processo também possui desvantagem

como a necessidade de máquinas ferramentas com elevadas rigidez e precisão no movimento de interpolação circular, uma vez que este movimento tem influência direta na geometria do cilindro fresado (MAKINO, 2011).

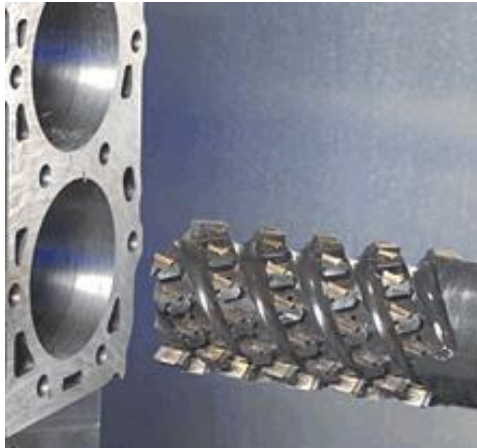


Figura 1.13 – Ferramenta para freso-mandrillamento

1.13.4. Mandrilamento com insertos de PCD

Estudos realizados pela empresa Audi, aplicando insertos de PCD em mandrilamento de acabamento dos cilindros do bloco do motor em ferro fundido vermicular, apresentaram altos valores de vida de ferramenta. As principais desvantagens do uso do PCD consistem na limitação da temperatura de utilização da ferramenta, o que limita a velocidade de corte, assim como o maior custo de ferramenta bloco do motor produzido. Esta limitação é devido ao problema de afinidade do ferro com o carbono, que em temperaturas acima de 700°C, começa a grafitização do diamante, tendo como consequência o acelerado desgaste da aresta de corte (STEMMER, 1993 apud Xavier, 2009).

1.14. Modelo Geométrico no Processo de Mandrilamento

A superfície de saída da ferramenta, conforme ilustrada na figura 1.14, é definida pelo ângulo da aresta de corte ($90^\circ - \chi_r$), ângulo de posição da aresta secundária de corte (χ'_r), ângulo de saída lateral da ferramenta (γ_f) e o ângulo de saída dorsal da ferramenta (γ_p).

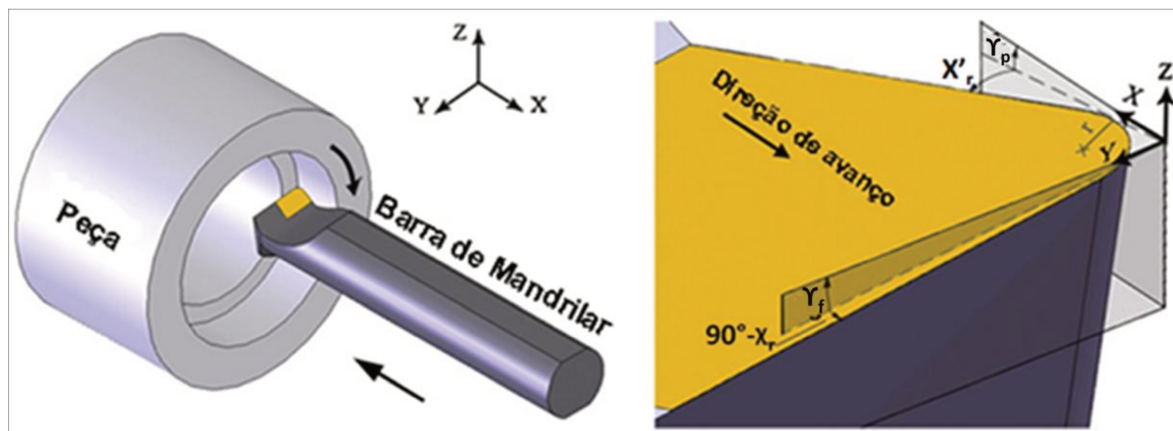


Figura 1.14 - Geometria no processo de mandrilamento (YUSSEFIAN et al.,2008)

Quatro diferentes configurações da relação área da seção de cavaco/ponta da ferramenta podem ser identificadas e ilustradas conforme figura 1.15. É altamente recomendado que o corte não envolva o final da aresta de corte da ferramenta, ou seja, o avanço não pode ser maior que o raio da ponta da ferramenta, para prevenir a quebra da ferramenta (YUSSEFIAN et al.,2008).

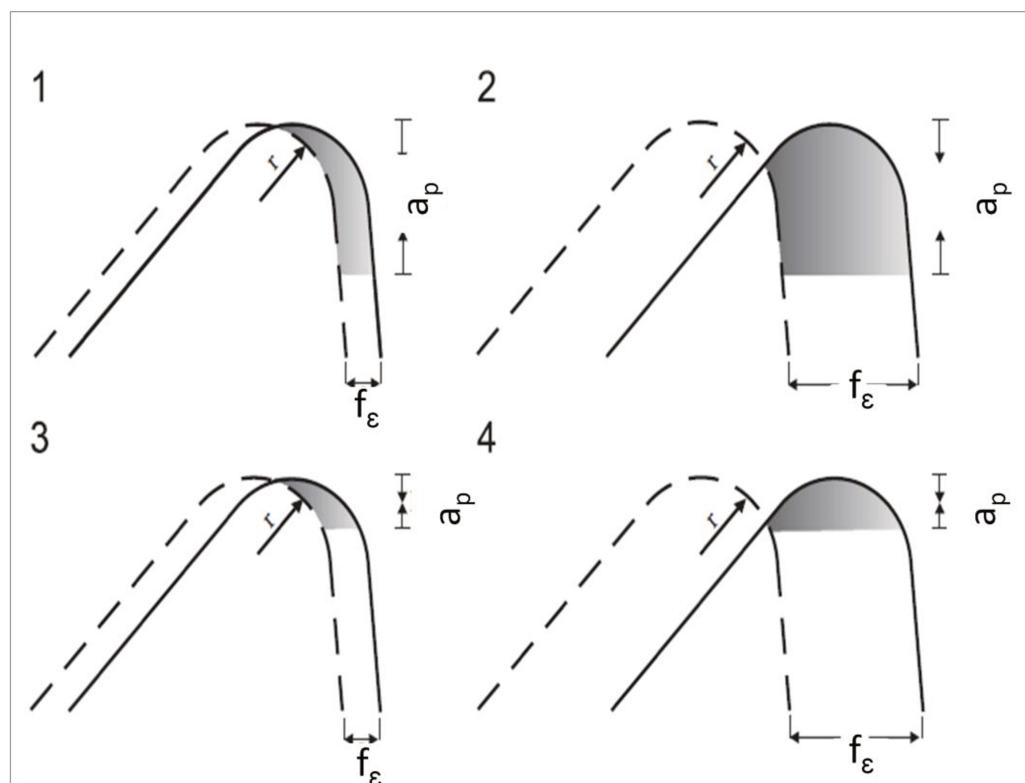


Figura 1.15 - Diferentes configurações da relação área da seção de cavaco/ponta da ferramenta (YUSSEFIAN et al.,2008)

Valores grandes do raio da ponta (r_e) com uma constante na taxa de avanço(f_e) e uma profundidade de corte “ a_p ” melhoram a qualidade do acabamento superficial da peça, reduzindo as marcas da ferramenta devido ao avanço. Em contrapartida, estas marcas são mais suscetíveis à vibrações devido ao aumento da componente da força radial para “ a_p ” menor que “ r_e ”. Conseqüentemente uma solução deveria ser feito para obter resultados mais favoráveis no corte.

O ângulo de saída da ferramenta é um importante parâmetro para controlar a deformação e a forma dos cavacos. É também um significativo fator geométrico que afeta o mecanismo de corte. No plano ortogonal, a saída do cavaco é perpendicular à aresta de corte, entretanto, o ângulo da saída do cavaco é zero. Muitos pesquisadores tentaram prever o ângulo de saída do cavaco para usinagem com o raio da ponta da ferramenta.

A força de corte pode ser representada por duas componentes, uma componente normal perpendicular ao plano de saída e um atrito componente na superfície de saída da ferramenta. A força de atrito na superfície de saída é o único componente que determina a direção da saída de cavaco. Para cada elemento cavaco, presume-se que a força de atrito é colinear com a velocidade do cavaco e suas magnitudes são proporcionais à área do cavaco (YUSSEFIAN et al.,2008).

1.15. Material de Ferramentas de Corte Utilizadas no Processo de Mandrilamento

O material da ferramenta de corte deve ser mais duro que o material da peça a ser cortada. Utilizando este princípio, novos materiais e ligas estruturais com excelente resistência mecânica e elevada dureza, contribuem para o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de usinagem (MACHADO et al., 2009).

Alguns fatores para seleção adequada da ferramenta de corte, conforme citados por DINIZ (2008), estão descritos abaixo:

- Material a ser usinado;
 - a dureza e o tipo de cavaco formado são características do material da peça a ser considerado.
- Processo de usinagem;

- ainda existem vários equipamentos com baixa rotação e baixa rigidez, inviabilizando a utilização de ferramenta de corte com materiais mais nobres.
- Condição da máquina de usinagem;
 - deve-se levar em consideração a potência, gama de velocidade e folgas da máquina.
- Dimensões e forma da ferramenta de corte;
 - ferramentas de forma não-padronizada muitas vezes são feitas de aço rápido ou de um tipo de metal duro que suporte choques térmicos.
- Custo do material da ferramenta;
 - alguns materiais de ferramentas apesar de aumentarem a vida da ferramenta de corte ou a produção, muitas vezes não apresentam uma boa relação custo-benefício.
- Condições de usinagem;
 - consideração típica para usinagem em acabamento em que se exigem ferramentas com maior resistência ao desgaste já que a operação de desbaste anterior já retirou a casca endurecida e/ou desvios de forma da peça.
- Condições da operação.
 - usinagem com corte interrompido ou o sistema máquina/peça/ferramenta/dispositivo não rígidos exige uma ferramenta tenaz.

As principais características desejáveis a um material da ferramenta são:

- Dureza a quente;

Algumas regiões da ferramenta de usinagem podem ultrapassar 1000°C. Portanto há uma contínua procura por materiais que possam suportar esta temperatura com dureza suficiente para suportar as tensões de corte.

- Resistência ao desgaste;

O material da ferramenta deve ser resistente ao desgaste por abrasão, ou seja, resistência ao atrito.

- Tenacidade;

O material da ferramenta deve ter energia suficiente para resistir ao choques inerentes do processo.

- Estabilidade química;

Dependendo da temperatura, da duração do contato e da afinidade físico-química do material da ferramenta e do material da peça na zona de cisalhamento secundário, há transferência de átomo

de um metal para o outro (difusão). O material da ferramenta deve ser resistente à difusão (DINIZ et al, 2008).

Há diversos materiais de ferramentas distribuídos no mercado atualmente que se diferem pela dureza (resistência ao desgaste) e tenacidade. Os principais são (MACHADO et al., 2009):

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

Atualmente, os materiais das ferramentas de corte utilizados na usinagem do ferro fundido vermicular são metal duro, cerâmica e CBN.

1.15.1. Inserto de Metal Duro

O metal duro surgiu em 1927 com o nome de “WIDIA”(Wie Diamant), e é um tipo de material fabricado através da metalurgia do pó em um processo de sinterização. Este pó é composto de partículas duras de carboneto de metais refratários. Os carbonetos são de tungstênio e normalmente são combinados com carbonetos de titânio, tântalo e nióbio (DINIZ et al, 2008).

O elemento aglomerante mais utilizado na fabricação do metal duro é o cobalto que é um metal do grupo do ferro responsável pela ligação das partículas duras dos carbonetos no processo de sinterização. O cobalto é responsável pela tenacidade do material. O pó do cobalto é obtido pela redução do óxido preto, que contém aproximadamente 70% de cobalto, sob hidrogênio e temperaturas entre 600 e 700°C.

Uma composição típica de metal contém 81% de tungstênio, 6% de carbono e 13% de cobalto. O tamanho das partículas de carbonetos pode variar entre 1 e 10 microns e geralmente compreendem cerca de 60 à 95% do volume do material.

A variação da composição química do metal duro influencia na característica (classe) do material. O cobalto é um material que à medida que aumenta seu teor, reduz sua densidade e dureza, mas eleva a resistência à ruptura e melhora a tenacidade.

Outra característica importante para aplicação do metal duro é o seu coeficiente de dilatação térmica. O coeficiente para o metal duro é cerca da metade do coeficiente do aço em temperaturas desde a ambiente até 675°C.

Hoje em dia, há metais duros produzidos com partículas de 0,1µm, o que melhora várias características desejáveis em uma ferramenta de corte. Estes metais duros com micro grãos podem ser classificados de acordo com o tamanho do grão de sua estrutura como:

- Fino / 0,8 a 1,3µm;
- Submicrométrico / 0,5 a 0,8µm;
- Ultra fino / 0,2 a 0,5µm;
- Nanométrico / menor que 0,2µm.

À medida que se diminui o tamanho de grão do metal duro, aumenta-se a dureza, resistência ao desgaste e tenacidade do material devido ao maior fator de empacotamento que grãos muito pequenos propiciam (DINIZ et al, 2008).

Há vários tipos de metal duro classificados pela norma ISO (International Organization for Standardization) conforme norma ISO513, 1975; sendo que há 3 grupos principais como:

Grupo ‘P’ – Compreende os tipos ou classes empregados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos longos e dúcteis;

Grupo ‘M’ – Compreende as classes que empregam na usinagem de metais e ligas ferrosas de cavacos tanto longos como curtos, ou seja, é uma ferramenta com propriedades intermediária;

Grupo ‘K’ – Compreende as classes que se destinam a usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos e materiais não-metálico.

Recentemente a ISO aumentou o número de classes de metal duro conforme norma ISO513, 2004. Estas novas classes são:

Grupo ‘N’ – Aplicável a materiais não ferrosos;

Grupo ‘S’ – Aplicável a usinagem de superligas e ligas de titânio;

Grupo ‘H’ – Aplicável a usinagem de materiais endurecidos.

Além dos grupos de metal duro, existe uma subdivisão dentro de cada grupo, por exemplo:

P01.....P50

M01.....M40

K01.....K40

N01.....N30

S01.....S30

H01.....H30



- Classes com maior resistência ao desgaste
- Recomendado para usinagem em acabamento

- Classes com maior tenacidade
- Recomendado para usinagem em desbaste e corte interrompido

Para cada grupo de metal duro e seu respectivo subgrupo, há uma composição química e característica física conforme Tabela 1.6. Pode-se perceber nesta tabela que à medida que a quantidade de TiC + TaC aumenta, a densidade diminui e a dureza aumenta.

Tabela 1.6 - Composição química e características físicas do metal duro (FERRARESI, 1970)

Desig- Nação	Composição aproximada em %			Características principais				
	WC	TiC + TaC	Co	Densidade (g/cm ³)	Dureza (kg/mm ²)	Resist. à ruptura transversal (kg/mm ²)	Módulo de elasticidade (kg/mm ²)	Coefficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ 1/C°)
P01	30	64	6	7,2	1800	75	-	-
P10	55	36	9	10,4	1600	140	52000	6,5
P20	76	14	10	11,9	1500	150	54000	6,0
P25	73	19	8	12,5	1500	170	55000	6,0
P30	82	8	10	13,0	1450	170	56000	5,5
P40	77	12	11	13,1	1400	180	56000	5,5
P50	70	14	16	12,9	1300	200	52000	5,5
M10	84	10	6	13,1	1650	140	58000	5,5

M20	82	10	8	13,4	1550	160	56000	5,5
M30	81	10	9	14,4	1450	180	58000	5,5
M40	78	7	15	13,5	1300	200	55000	5,5
K01	93	2	5	15,0	1750	120	63000	5,0
K05	92	2	6	14,6	1700	135	63000	5,0
K10	92	2	6	14,8	1650	150	63000	5,0
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	170	62000	5,0
K30	89	2	9	14,5	1450	190	-	5,5
K40	88	-	12	14,3	1300	210	58000	5,5

A seleção do metal duro para uma determinada aplicação de usinagem está intimamente relacionada com o tipo de material a ser usinado e com o tipo de cavaco que se forma durante a usinagem. Entre os tipos de cavacos conhecidos, tem como cavacos contínuos, cavacos cisalhados e cavacos de ruptura, o formado na usinagem dos ferros fundidos é o cavaco de ruptura devido a seu rompimento na zona primária do plano de cisalhamento causados na interrupção que as grafitas causam na matriz da liga.

Operações de usinagem com avanço e profundidade de cortes altos para desbaste e cortes interrompidos criam tensões elevadas na ferramenta exigindo classes com maior tenacidade, ou seja, ferramentas com menor teor de cobalto e maior teor de carbonetos.

Operações de usinagem em peças que já sofreram operações anteriores de desbaste, retirando excentricidade e a casca endurecida, trabalham com baixos avanços e profundidade de usinagem, porém com altas velocidades de corte, o que gera altas temperaturas. Sendo assim, são necessárias classes de ferramentas com altas resistências ao calor e a abrasão, ou seja, menor teor de cobalto (DINIZ et al., 2008).

Operações de usinagem em máquinas-ferramentas menos rígidas, obriga o uso de classe de ferramentas com maior tenacidade, embora reduzindo a vida útil.

As primeiras ferramentas de metal duro foram compostas unicamente de carbonetos de tungstênio (WC) e cobalto, e eram adequadas somente para a usinagem de materiais de cavacos curtos e quebradiços, ou seja, materiais de ferro fundido. Na usinagem do aço havia formação de cratera na superfície de saída da ferramenta devido a fenômenos de difusão e dissolução ocorridos entre o cavaco da peça e a ferramenta. Para solucionar tais problemas, começou-se a acrescentar

outros carbonetos (TiC, TaC e NbC). Assim, as ferramentas que contém praticamente somente WC e Co na composição (ferramentas da classe K, ver tabela 1.5) são destinadas à usinagem de ferros fundidos que não tem a tendência de formação de desgaste de cratera, devido ao fato de que o cavaco curto rapidamente se quebra e pula fora da região de corte, sem atritar longamente com a superfície de saída. A inclusão de carbonetos do tipo TiC, TaC e NbC na ferramenta confere a ela as seguintes características:

- Carbonetos de Titânio - TiC :

- Pouca tendência à difusão, resultando na alta resistência dos metais duros;
- Redução da resistência interna e dos cantos.

- Carboneto de Tântalo - TaC e Carboneto de Níbio NbC :

- Em pequenas quantidades atuam na diminuição do tamanho dos grãos, melhorando a tenacidade e a resistência dos cantos.

1.15.2. Cobertura em Ferramentas de Metal Duro

A finalidade principal do uso de coberturas em ferramentas de metal duro é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e a peça, sendo que o núcleo permanece com a tenacidade característica do metal duro. Desta forma, consegue-se em vários casos aumentar bastante a vida da ferramenta e diminuir os esforços de corte. É possível também conciliar em mesmos materiais características como tenacidade, resistência ao desgaste e dureza a quente (DINIZ et al.,2008).

As principais coberturas utilizadas são de carboneto de titânio (TiC) e/ou óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN). Geralmente são aplicadas no metal duro utilizando um processo chamado CVD (deposição química a vapor), que utiliza altas temperaturas e pressões levemente negativas. Outro processo também utilizado para cobertura de ferramenta é o PVD (deposição física a vapor) que utiliza temperaturas médias (de 400 a 500°. C) e pressão muito negativa. Este processo é, em geral, mais caro que o processo CVD. Como o processo de CVD precisa de altas temperaturas, são geradas tensões na ferramenta durante seu resfriamento que podem enfraquecê-la. Sendo assim, novos tipos de processo com temperaturas intermediárias entre o CVD e o PVD estão sendo desenvolvidos para minimizar este problema (DINIZ et al.,2008).

Normalmente, a primeira camada de cobertura, logo acima do núcleo, é o carboneto de titânio ou o carbonitreto de titânio, que algumas vezes é a única camada. Estas camadas possuem características como excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de promover a adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo. Outra cobertura, como o óxido de alumínio, não possui afinidade físico-química com o núcleo do metal duro. A diferença na dilatação e contração térmica das camadas com o substrato de metal duro, a uma temperatura de 1000°C como é exigido para o processo de revestimento CVD, pode causar trincas se não for utilizado o TiC ou TiCN como camada intermediária (DINIZ et al.,2008).

A dureza da camada de TiC é na ordem de 3000HV que é maior que todos os outros materiais utilizados no revestimento do metal duro. A espessura da camada é de 4 a 8µm. Outras características importantes deste material é a baixa tendência a soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão e o baixo coeficiente de dilatação térmica. O material TiCN tem propriedades similares ao TiC como dureza à quente, resistência ao desgaste a capacidade de adesão ao núcleo mas seu coeficiente de atrito é mais baixo que o TiC. Geralmente o segundo revestimento no metal duro é de óxido de alumínio que garante uma estabilidade térmica 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. Devido a sua alta estabilidade química com o ferro, praticamente evita o desgaste difusivo durante o processo de usinagem do aço. Apresentam também uma pequena resistência a choques térmicos e mecânicos.

A terceira camada geralmente utilizada, de TiN, tem característica de redução do coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC e possui uma camada com espessura entre 5 e 7 µm. A espessura total das camadas do metal duro está entre 2 e 12 µm. Quando se aumenta a espessura da cobertura, a resistência ao desgaste aumenta, mas a tenacidade diminui aumentando a tendência ao lascamento das arestas. Hoje em dia já são utilizadas outras coberturas como, por exemplo, o nitreto de titânio alumínio (TiNAl) ou o nitreto de alumínio titânio(TiAlN), dependendo da quantidade maior de titânio ou alumínio, que podem ser aplicadas ao metal duro através do processo PVD. Tal processo propicia espessuras de camadas mais finas mantendo a aresta da ferramenta afiada (DINIZ et al.,2008).

Estas coberturas podem ser aplicadas em ferramentas multicamadas propiciando características como:

- Baixa condutividade térmica, que protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco;
- Alta dureza a frio e a quente;
- Alta estabilidade química (DINIZ et al.,2008).

1.15.3. Insertos de Material Cerâmico

Um dos principais tipos de materiais cerâmicos utilizados como ferramenta de usinagem é o óxido de alumínio (Al_2O_3) que é a forma estável alfa da alumina. Podem-se distinguir dois ramos nesta família:

- Materiais contendo alumina sinterizada praticamente pura com no mínimo de 98%;
- Materiais contendo 90% de alumina juntamente com outros óxidos como SiO_2 , MgO , Cr_2O_3 , Fe_3O_4 , etc.

Este tipo de material de ferramenta consiste de grãos finos (menores que $5\text{ }\mu\text{m}$) de Al_2O_3 de alta densidade, ou seja, contém menos que 2% de porosidade. Diferentes métodos são utilizados para fabricação de ferramentas cerâmicas deste tipo.

- Prensadas a frio e sinterizadas apresentando uma cor branca. Este processo é similar ao processo de fabricação do metal duro;
- Prensadas a quente em grandes cilindros de alumina em moldes de grafite. Neste processo o material se torna acinzentado escuro (FERRARESI, 1970).

A cerâmica possui ótima propriedade como dureza a quente, permitindo que se possa usinar em altas velocidades de corte. Em contrapartida, há propriedades como baixa condutividade térmica, que logicamente dificulta a transferência de calor e faz com que na região próxima do contato cavaco-ferramenta e peça ferramenta atinja-se temperaturas muito altas. Outra propriedade que dificulta o uso de material cerâmico é a baixa tenacidade que favorece as trincas e quebras das ferramentas de corte.

Há ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio (Al_2O_3), podendo ter alumina pura ou podendo ter algum teor de óxido de magnésio (MgO) para inibir o crescimento de grão. Podem ter também óxido de cromo, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica, ou com baixos percentuais de óxido de zircônio (ZrO_2), que aumenta a tenacidade do material (DINIZ et al.,2008).

A cerâmica mista, além de conter alumina, pode conter o carboneto de titânio (TiC) ou o nitreto de titânio (NiTi). Este tipo de cerâmica é prensado a quente gerando uma cor acinzentada. Como há uma melhor dureza a quente e estabilidade química, a cerâmica mista é indicada para processo de usinagem em mandrilamento e torneamento em acabamento de aços endurecidos, onde a tenacidade não é tão exigida (DINIZ et al.,2008).

Há uma cerâmica com propriedades intermediárias que é a reforçada com *whiskers*, o qual é adicionado o carboneto de silício (SiC); como sua tenacidade é boa quando comparadas com as outras cerâmicas, este tipo de material é indicado para usinagem de ligas de titânio e níquel. Também pode ser utilizada no processo de usinagem em mandrilamento e torneamento de aços endurecidos com superfícies interrompidas (DINIZ et al.,2008). Não é permitida a fabricação deste material em vários países devido ao carboneto de silício ser cancerígeno (BALDACIM, 2000). Este tipo de material também é perigoso devido à facilidade de incêndio no processo de retificação, devido a isto, o processo deve ser realizado em local extremamente isolado e máquinas blindadas.

Há também ferramentas de cerâmica à base de nitreto de silício (Si₃N₄), que são cristais com fase intergranular de óxido de silício (SiO₂) que são sinterizados na presença de alumina (sialon) e/ou óxido de ítrio (Y₂O₃) e magnésio (MgO). Este material de ferramenta é usualmente chamado de Sialon (DINIZ et al.,2008).

A Tabela 1.7 mostra algumas propriedades dos diversos tipos de material cerâmico comparados com o metal duro. Como se pode ver na tabela, Sialon possui boa tenacidade (melhores que as cerâmicas mista e pura) e excelentes durezas a quente e resistência ao choque térmico. A única propriedade necessária a um material de ferramenta que não possui é a estabilidade química com o ferro. Assim, não pode ser usada para usinar o aço. Porém, como a falta de estabilidade química é causadora do desgaste difusivo, razão da formação do desgaste de cratera (desgaste da superfície de saída da ferramenta), e como o ferro fundido possui cavacos curtos que não atiram muito com a superfície de saída e, portanto, não tem grande tendência à formação da cratera, esta ferramenta é indicada para a usinagem destas ligas, principalmente em cortes interrompidos como o fresamento, em que a temperatura que a ferramenta atinge não é tão alta.

Tabela 1.7 - Propriedades relativa dos materiais cerâmico comparados com o metal duro

	Tenacidade	Dureza à quente	Resistência ao choque térmico	Estabilidade química (Fe)	Estabilidade química (Ni)
Cerâmica Pura	2	2	1	5	5
Cerâmica Mista	1	3	2	4	4
Cerâmica com Wiskers	4	3	3	2	3
Sialon	3	5	4	1	2
Metal Duro	5	1	5	3	1

Em geral, os insertos de material cerâmico possuem um chanfro na região da aresta de corte, cuja dimensão varia de 0,05 à 0,3mm e ângulo entre 20° e 30° como proteção de aresta para evitar quebra ou lascamento (DINIZ et al., 2008).

Em processos de usinagem como o fresamento em ferro fundido cinzento, é possível substituir o desbaste e o acabamento para somente um passe, utilizando insertos de cerâmica com alisador (FERRER, 2006). Ferramentas cerâmicas de nitreto de silício têm mostrado um melhor desempenho que as de metal duro em operações de faceamento em ferro fundido cinzento. Isto porque ferramentas de cerâmica a base de nitreto de silício apresentam tenacidade suficiente, onde o lascamento não é um fator predominante para o fim da vida da ferramenta (FERRER e DINIZ, 2005).

Em contrapartida, ferramentas de metal duro são consideradas uma melhor opção para processo de usinagem em fresamento de ferro fundido vermicular. O mecanismo de desgaste por difusão é muito acentuado em ferramentas de cerâmica a base de nitreto de silício (GABALDO, 2009).

1.16. Desgaste e Medição do Desgaste das Ferramentas de Corte

Desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte (DINIZ et al., 2008). Há alguns desgastes de ferramenta de corte padronizado como desgastes convencionais. Os principais deles são o desgaste de flanco ou frontal (na superfície de folga da

ferramenta), desgaste de entalhe (nos limites de contato ferramenta/peça) e desgaste de cratera (na superfície de saída da ferramenta). Além dos desgastes, diversas outras ocorrências podem acontecer à ferramenta durante seu uso, como trincas, lascas, deformações plásticas e quebra. A estas ocorrências dá-se o nome de avarias (FERRARESI, 1970).

Os principais fenômenos causadores do desgaste são:

Aresta postiça de corte (APC) – material da peça aderido na aresta de corte da ferramenta modificando o comportamento da força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta. A APC ocorre quando, em baixa velocidade de corte a parte inferior do cavaco sob pressão de corte na zona de aderência mantém o contato sem movimento relativo por um espaço de tempo suficiente para soldar na ferramenta. À medida que a APC cresce torna-se instável e, depois de algum tempo, colapsa, levando consigo partículas da superfície de folga da ferramenta, incentivando assim o desgaste de flanco em baixa velocidade de corte (DINIZ et al, 2008).

Abrasão mecânica – o desgaste frontal ou o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão (atrito), porém é mais comum o desgaste frontal porque a superfície de folga atrita na peça, que é rígida, enquanto que a superfície de saída atrita com o cavaco que é flexível. O desgaste por abrasão ocorre pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Quando o desgaste abrasivo ocorre, a superfície desgastada mostra sulcos paralelos à direção de avanço (TRENT e WRIGHT, 2000)

Aderência – é formada por um extrato metálico provocado pela baixa velocidade de corte e baixa temperatura entre duas superfícies metálicas postas em contato sob cargas moderadas. A resistência deste extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre à ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Quando este desgaste ocorre, a superfície desgastada tem aparência áspera (TRENT e WRIGHT, 2000). Assim, partículas da superfície de um material migram para superfície do outro. O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça, mas pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação da aresta postiça. Por meio deste fenômeno, as partículas da ferramenta, que são removidas pela continuidade do movimento de escorregamento entre as duas superfícies (cavaco-ferramenta ou ferramenta-peça), seguem aderidas ao fluxo de cavaco ou peça. Como são bastante duras, ao atritarem com regiões da ferramenta mais à frente, desgastam-nas por abrasão. A utilização de coberturas com baixo coeficiente de atrito como o nitreto de titânio e o uso de fluido de corte adequado tem grande influência na redução deste tipo de desgaste (DINIZ et al, 2008).

Difusão – é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte, principalmente entre a ferramenta e o cavaco, podendo também ocorrer entre a ferramenta e a peça depois de já haver ocorrido algum desgaste na superfície de folga causado por algum outro mecanismo. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal ao outro. Depende da temperatura, duração do contato e da afinidade físico-químico dos dois metais envolvidos na zona de cisalhamento secundário. Ocorre principalmente na superfície de saída da ferramenta, causando o desgaste de cratera, porque é ali que se tem a zona de aderência entre cavaco e ferramenta (que garante o tempo de contato) e a zona de fluxo (zona secundária de cisalhamento), na qual o cisalhamento é intenso e, assim, a temperatura é bastante alta. Ferramentas que possuem cobertura de Al_2O_3 e ferramentas cerâmicas a base de Al_2O_3 são bastante resistentes a este tipo de desgaste (DINIZ et al, 2008).

Oxidação – a maioria dos metais oxidam em altas temperaturas e na presença de água e ar. Na usinagem, isto ocorre devido ao uso de fluído de corte de baixa concentração, ou fluído de corte não adequado para o processo. O tungstênio e o cobalto durante o corte formam filmes de óxido poroso sobre a ferramenta, que são facilmente levados embora pelo atrito, gerando o desgaste. Porém, alguns óxidos, como o óxido de alumínio, são mais duros e resistentes. Assim, alguns materiais de ferramentas que não contém óxido de alumínio desgastam mais facilmente por oxidação. Este desgaste se forma nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso de ar nesta região, causando o desgaste de entalhe. Também para este desgaste, ferramentas que possuem cobertura de Al_2O_3 e ferramentas cerâmicas a base de Al_2O_3 são bastante resistentes (DINIZ et al, 2008).

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo descreve o material do bloco do motor e o material da ferramenta de corte a ser utilizada no experimento, além dos equipamentos e o método utilizado para o experimento.

2.1. Laboratório utilizado nos experimentos

Uma linha de usinagem flexível de bloco do motor diesel, exclusivo em material de ferro fundido vermicular já existente na empresa MWM International, situado em Santo Amaro SP foi o laboratório utilizado para realização dos experimentos.

2.2. Corpos de prova utilizados nos experimentos

Utilizou-se como corpos de prova para os ensaios de mandrilamento, blocos para motores de seis cilindros (ver figura 2.1), fundidos em material de ferro fundido vermicular e fundido na empresa TUPY Fundições localizada em Mauá, São Paulo. A operação de usinagem objeto deste estudo foi o mandrilamento dos mancais do bloco.



Figura 2.1 – Bloco do motor BIG BORE

O material do bloco do motor é o GJV-450 conforme norma MANN (M3340). Foi realizada uma análise metalográfica de amostras retiradas de corpos de prova do bloco do motor conforme posição visualizada na figura 2.2.

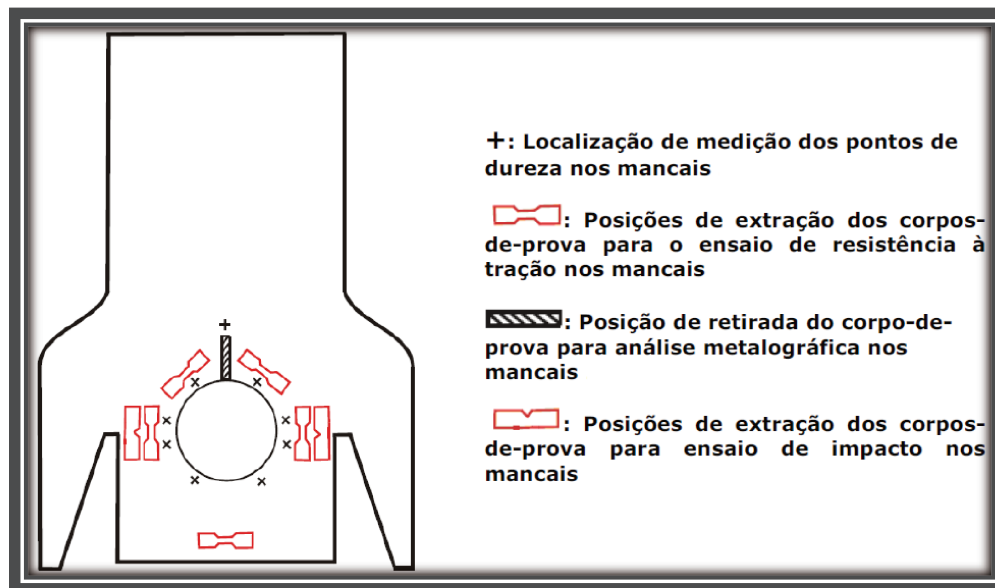


Figura 2.2 – Posição no bloco do motor dos corpos de prova extraído para análise metalográfica (norma MANN M3340, 2004)

A tabela 2.1 e as figuras 2.3 e 2.4 mostram os resultados da análise metalográfica do material.

Tabela 2.1 – Resultados da Metalografia no Material CGI do Bloco do Motor

DESCRIÇÃO	ESPECIFICADO
Estrutura da Matriz	Perlita Lamelar Fina
Ferrita Livre	Máximo de 30%
Cementita Livre	Ausente
Carbonitreto de Titânio	Metalograficamente não permitidos
Ledeburita	Ausente
Rede de Fosfeto - STEADITA	Traços isolados como informativo
Forma da Grafita I e II	Ausente
Forma da Grafita III	Mínimo 70%
Forma da Grafita IV	Máximo 5%
Forma da Grafita V e VI	Máximo 30%
Tamanho da Grafita Forma III	3 ou mais fino
Tamanho da Grafita Forma IV	3 ou mais fino

Tamanho da Grafita Forma V e VI	5 ou mais fino
Dureza	150 à 250 HB 30
Resistência à Tração	440 à 520 N/mm ²
Limite de Escoamento	Mínimo 320 N/mm ²
Alongamento	Mínimo 1%

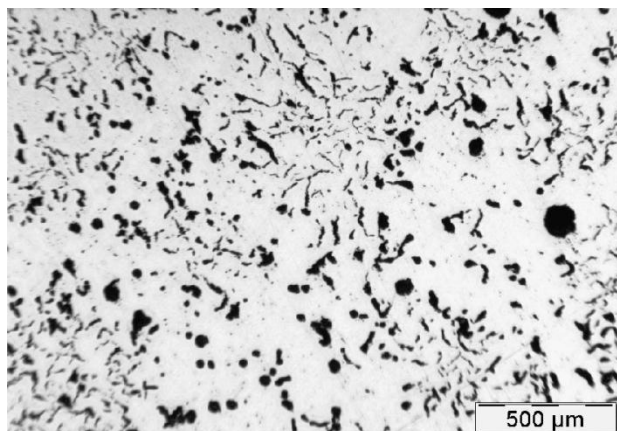
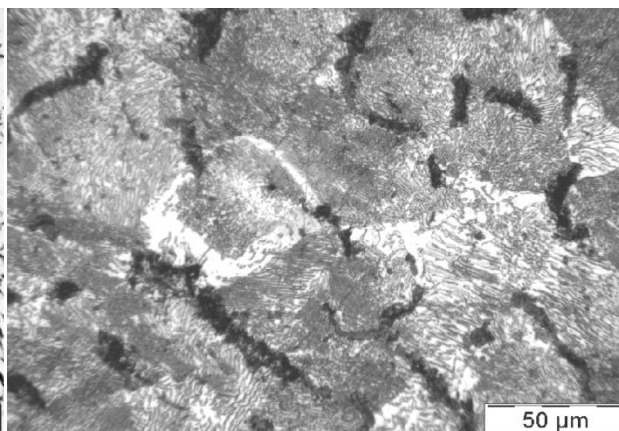


Figura 2.3 - Micrografia mostrando a morfologia da grafita.

**Forma III (80 à 85%) e tamanho de 4 à 5;
Forma IV (< 5%) e tamanho de 5 à 6;
Forma V + VI (10 à 15%) e tamanho de 5 à 6.
Sem ataque**



**Figura 2.4 – Micrografia mostrando a estrutura da matriz; matriz perlítica.
Com ataque NITAL 3%**

A tabela 2.2 mostra o resultado do ensaio químico realizado em uma amostra de bloco.

Tabela 2.2 - Ensaio Químico (%): GJV-450 conforme M 3340 (norma MANN)

	ESPECIFICADO em %		ENCONTRADO em %
1.1	Carbono	C: 3,50 à 3,80	3,61
1.2	Carbono Equivalente	C equiv.: 4,05 à 4,35	4,19
1.3	Silício	Si: 2,00 à 2,30	2,32
1.4	Manganês	Mn: 0,40 máximo	0,26
1.5	Fósforo	P: 0,02 máximo	0,009
1.6	Enxofre	S: 0,005 à 0,020	0,011
1.7	Cromo	Cr: 0,1 máximo	0,029

1.8	Cobre	Cu: 0,75 à 0,95	0,84
1.9	Estanho	Sn: 0,04 à 0,07	0,07
1.10	Magnésio	Mg: 0,010 à 0,016	0,010
1.11	Titânio	Ti: 0,010 máximo	0,003

O material de ferro fundido vermicular a ser removido pela ferramenta de corte na operação de mandrilamento dos mancais tem espessura entre 2,5 e 3,0mm (profundidade de corte) devido à variação do sobremetal de fundição conforme figura 2.5, formando cavacos de ruptura.

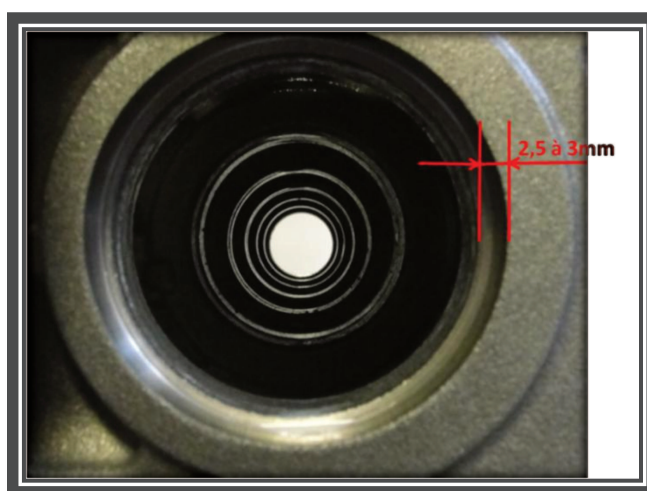


Figura 2.5 – Material a ser removido pela ferramenta de corte

O bloco do motor contém sete mancais com comprimento de 37mm cada conforme figura 2.6.

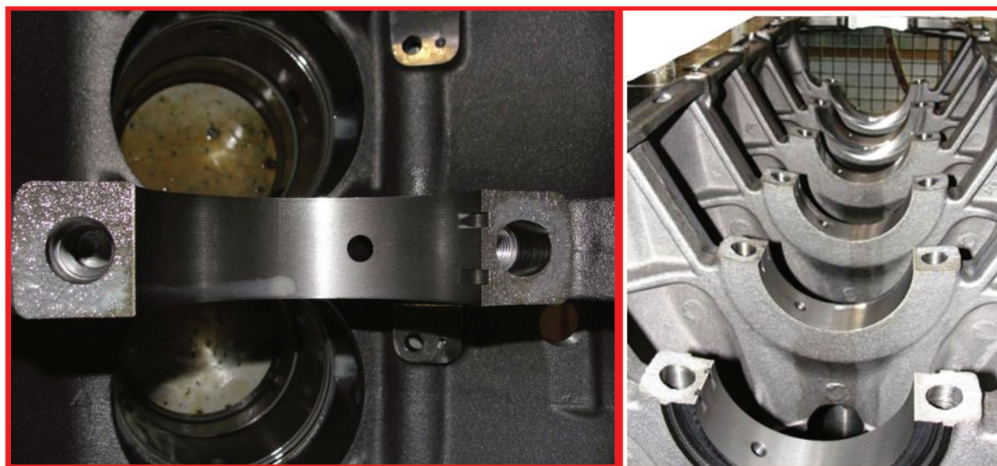


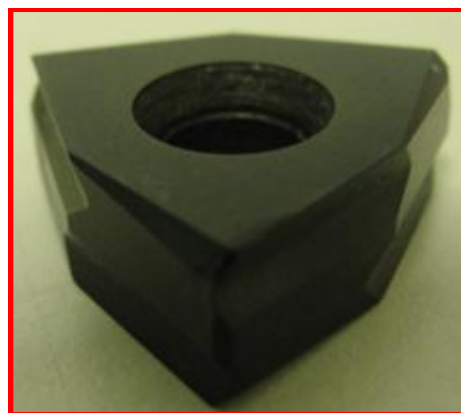
Figura 2.6 – Espessura dos mancais do bloco do motor em 37mm

2.3. Ferramenta de Corte (insertos)

Nos experimentos, foram utilizados insertos de cerâmica e insertos de metal duro conforme figuras 2.7, 2.8 e 2.9 e tabela 2.3



**Figura 2.7 - Inserto de Metal Duro
WTXQ090608 K01L10B040 HP425**



**Figura 2.8 - Inserto de cerâmica
WTXQ090608 0906 MN KS6000**

Tabela 2.3 – Especificações dos insertos utilizados no experimento

	METAL DURO	CERÂMICA
Material	Classe K10	Nitreto de Silício
Aresta de Corte	Arredondamento 0,06mm	Arredondamento 0,06mm
Espessura do inserto	6,35mm	6,35mm
Área para corte	Máximo 7mm	Máximo 7mm
Quantidade de arestas	6 arestas	6 arestas
Cobertura	Nitreto de Titânio Alumino (TiNAl)	Sem cobertura

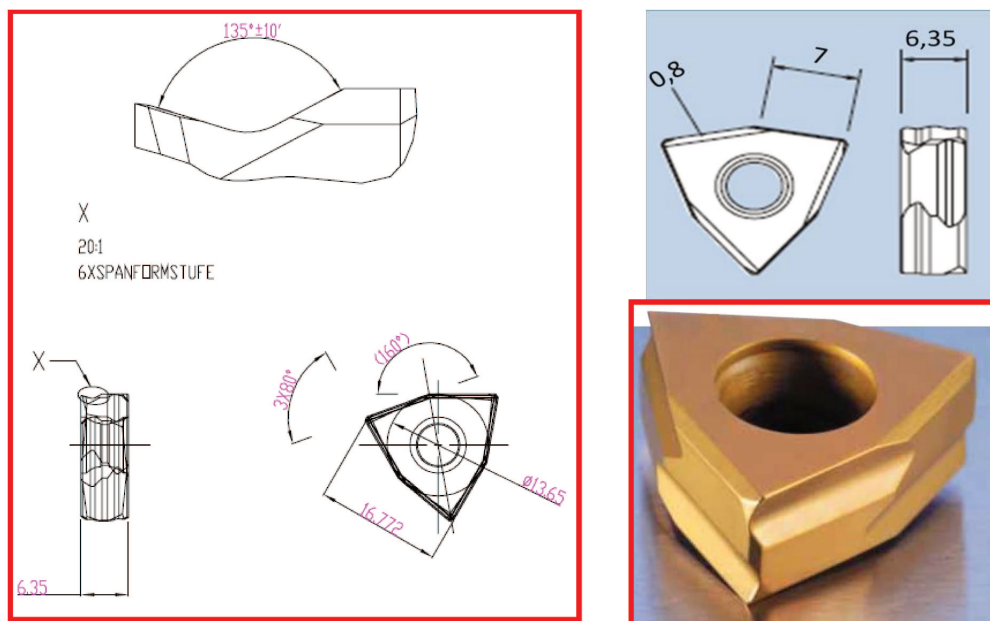


Figura 2.9 - Principais dimensões dos inserts WTXQ usadas nos ensaios

Os inserts foram montados em uma barra de mandrilar na posição tangencial em um diâmetro de 110,5mm para desbaste, conforme figura 2.10. Nesta mesma ferramenta também estão montados os seis inserts de semi-acabamento, para posterior processo de fratura. Esta ferramenta possui guias de metal duro para reduzir vibração, garantir alinhamento entre os mancais e garantir a precisão dimensional. As guias de metal duro da ferramenta e o diâmetro do mancal podem estar com folga entre 0,005mm e 0,015mm. Esta folga é coberta pelo fluido de corte com uma concentração aproximada de 12% e, com isso, contribui para reduzir o atrito.

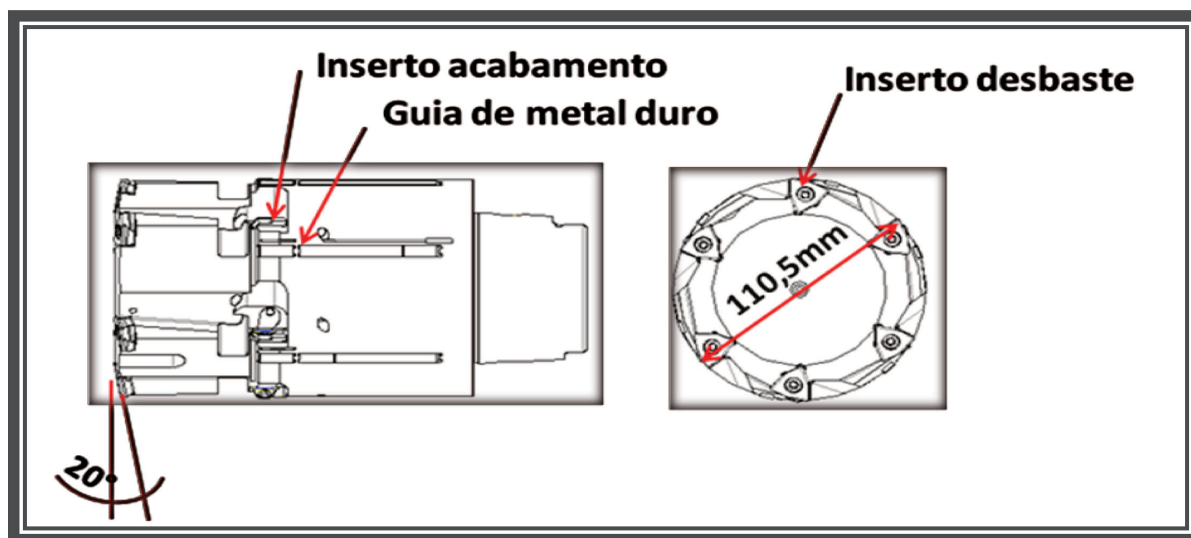


Figura 2.10 – Barra de mandrilar suporte dos inserts

Antes dos experimentos, foram montados vários insertos na barra de mandrilar para verificar a variação do batimento radial e axial. Nota-se que radialmente foram encontrados até 0,04mm de variação e axialmente foram encontrados até 0,02mm conforme demonstra figura 2.11. Ambos os resultados encontrados não influenciam no resultado final dos experimentos.

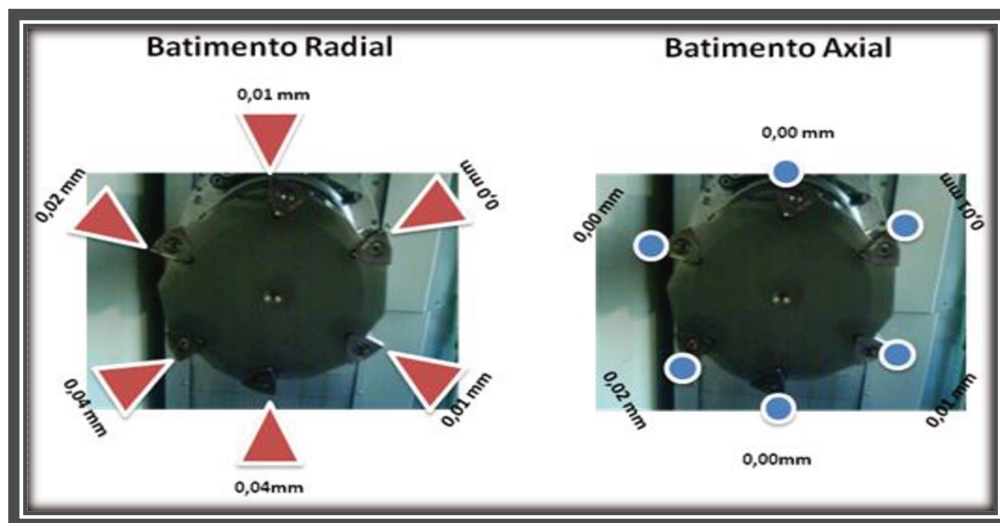


Figura 2.11 – Diferença de altura radial e axial de cada inserto montado

2.4. Especificação do fluido de corte utilizado

O fluido de corte utilizado no experimento, tendo também como função reduzir o atrito entre as guias de metal duro da barra de mandrilar e o mancal guia do bloco, foi um óleo semi-sintético do tipo EP produzido pelo fabricante CASTROL. O nome do produto é “Superedge 6552 BF” com alta resistência à formação de espuma, isento de Boro, Cloro, Nitritos e Fenois. As tabelas 2.4 e 2.5 mostram características deste fluido.

Tabela 2.4 – Propriedades Físico-Químicas do óleo “Superedge 6552 BF”

Estado físico	Líquido
Odor	Suave
Cor	Âmbar
pH	9,0 a 9,5 (5%)
Ponto de fulgor	Produto base água. Não inflamável
Densidade	0,937 g/mL
Solubilidade	Solúvel em água

Tabela 2.5 – Composição Química do óleo “Superedge 6552 BF”

DESCRIÇÃO	PORCENTAGEM
Água	5 à 10
Amina primária	2,0 à 4,0
Amina terciária	5,0 à 8,0
Óleo mineral parafínico	45 à 50
Benzotriazol	0,1 à 0,5
Ácidos di carboxílicos	2,0 à 5,0
Aditivo EP a base de fósforo	2,0 à 8,0
Amida de Tall Oil	10 à 15
Ácido carbâmico	0,5 máximo
Metileno bis morfolina	3,0 à 7,0

2.5. Centro de Usinagem utilizado nos experimentos

A máquina de usinar utilizada para realizar os experimentos foi um centro de usinagem horizontal CNC com 4 eixos (X/Y/Z/B) da marca GROB, modelo BZ640, com palete (mesa) de 630 x630mm (ver figura 2.12). Esta máquina é controlada por um comando SIEMENS e pode suportar uma carga sobre a mesa de até 1.000Kg, já que a peça (bloco do motor) utilizada no experimento tem aproximadamente 300Kg e o dispositivo para fixar a peça tem aproximadamente 500Kg, somando juntos 800Kg. A máquina também tem um giro de palete permitido de até 1.200mm para suportar a peça, que tem um comprimento de 1060mm. O eixo da máquina é um motofuso com potência de 26Kw(40%ED) e 20Kw(100% ED). O torque é de 340Nm (40% ED) e 262Nm(100% ED). A cada 10 minutos de usinagem, por 4 minutos pode ser utilizados potência e torque máximos, ou seja, pode-se utilizar 26Kw a cada 4 minutos ou 20Kw em todo tempo de usinagem; e igualmente para torque.



Figura 2.12 – Centro de Usinagem Horizontal – CNC GROB

Este equipamento é preparado para medir potência consumida do fuso no momento da usinagem da peça conforme demonstrado na figura 2.13.

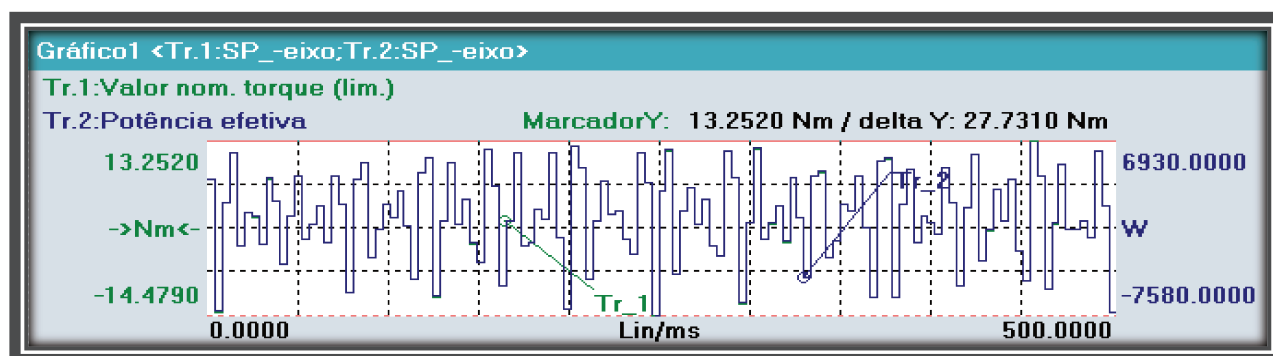


Figura 2.13 – Gráfico de torque e potência consumida no fuso da máquina

2.6. Equipamento utilizado para medição do desgaste dos insertos

O equipamento utilizado para realizar as medições de desgaste dos insertos (V_B – desgaste de flanco) utilizados no experimento foi uma máquina para pré-ajustagem de ferramentas marca ZOLLER, com câmera integrada conforme figura 2.14. Esta máquina também possui alguns benefícios como sistema de fixação SHRINK (fixação de ferramenta por contração térmica) e um

software de programação com o procedimento de medição de cada ferramenta, reduzindo a influência do operador.



Figura 2.14 – Máquina de pré-ajustagem de ferramentas ZOLLER

Ao fim dos ensaios, os desgastes das ferramentas foram analisados em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) contendo sonda para realização de testes de EDS(Sistema de Energia Dispersiva). Este equipamento tem marca FEI, modelo Quanta 450 conforme figura 2.15. Ele é capaz de produzir imagens de alta ampliação.

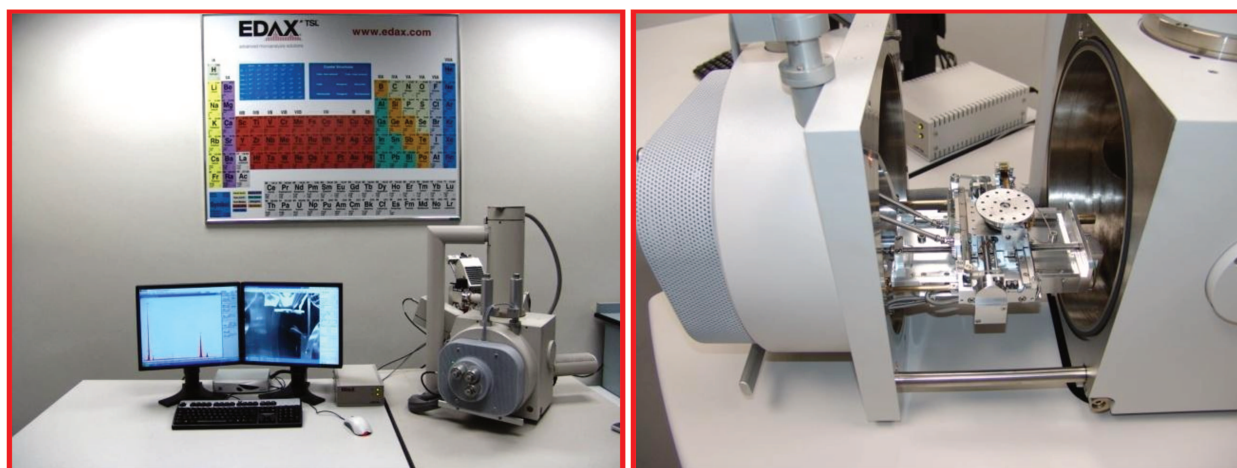


Figura 2.15 – Equipamento para medição do MEV e o EDS – Análise da micrografia dos insertos

2.7. Processo de Usinagem

Uma barra de mandrilar com 600mm de comprimento, devido à sua rigidez pelo curto comprimento, mandrila o primeiro mancal em desbaste para obtenção do $\varnothing 110,5\text{mm}$ e acabamento $\varnothing 111\text{mm}$ simultaneamente. No término da usinagem do primeiro mancal, a mesa (palete) gira 180° para que a usinagem do sétimo mancal (último) seja realizada. A função desta primeira ferramenta é fornecer guia (mancal usinado) para a barra de mandrilar longa com comprimento de 600mm, conforme figura 2.16, utilizada nos experimentos deste trabalho para usinar do segundo ao sexto mancal.

A barra de mandrilar longa utiliza o primeiro mancal como guia e usina o segundo mancal conforme demonstrado na figura 2.16. Após o segundo mancal acabado, a ferramenta avança e utiliza o segundo mancal como guia para usinar o terceiro mancal e assim sucessivamente, até usinar o quarto mancal. Para usinar o quinto e o sexto mancal, a mesa da máquina gira a 180° e a ferramenta utiliza o sétimo mancal como guia para usinar o sexto mancal e, logo na sequência, utiliza o sexto mancal como guia para usinar o quinto mancal.

A ferramenta utilizada nos experimentos usina um total de cinco mancais por bloco.

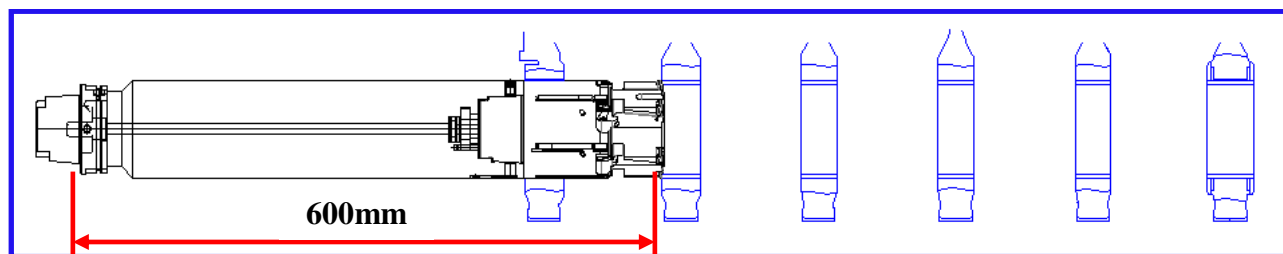


Figura 2.16 – Comprimento da ferramenta utilizada para o processo de mandrilamento

2.8. Procedimento experimental

Primeiramente foi determinado que um ensaio terminaria após 40 peças usinadas. Este número foi determinado para que o desgaste frontal da ferramenta tivesse aproximadamente de 0,4mm (medição V_B) ao fim do ensaio. Como o laboratório utilizado no experimento foi uma linha de produção, impossibilitando a medição do desgaste dos insertos até atingir exatos 0,4mm, foi definido medir a aresta de 10 em 10 peças até atingir as 40 peças. Porém, houve exceções como:

- Ensaio em que o desgaste V_B atingiu valores elevados muito antes das 40 peças;

- Ensaios em que a potência de segurança do fuso da máquina foi acionada antes das 40 peças.

A velocidade de corte foi a variável utilizada para iniciar os ensaios em insertos de metal duro, fixando o avanço por dente e a quantidade de insertos montados, conforme tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Informação de dados de corte para realização da primeira fase de testes

Material	Velocidade de Corte	Avanço por dente	Número de facas	Velocidade de Avanço
Metal Duro	110m/min	0,22mm	6	418mm/min
Metal Duro	140m/min	0,22mm	6	532mm/min
Metal Duro	155m/min	0,22mm	6	590mm/min

A máxima velocidade de corte de 155m/min foi determinada devido à característica de segurança que a máquina oferece para não danificar o equipamento. Como a barra de mandrilar é longa e robusta, qualquer quebra ou outro tipo de avaria pode danificar o fuso da máquina. Mais caro que o fuso é o alto tempo de reparo que um equipamento deste porte pode sofrer. Para segurança, há um limite de potência consumida do fuso em que o equipamento interrompe a rotação para evitar maiores avarias. Como a folga entre as guias de metal duro da barra de mandrilar e o guia dos mancais podem variar entre 0,005mm e 0,015mm, o aumento da rotação aumenta a força centrípeta e o óleo não suporta reduzir o atrito aumentando a potência consumida do fuso e limitando a velocidade de corte para máximo de 155m/min.

A velocidade mínima de corte de 110m/min utilizada foi a já definida no processo antes de realização deste trabalho; e a velocidade de corte intermediária foi a definida pela velocidade de corte mais próxima da média entre a velocidade máxima de 155m/min e a velocidade mínima de 110m/min.

Continuando na estratégia dos experimentos, utilizou-se a maior velocidade de corte permitida pela máquina para os experimentos com cerâmica, o qual precisa de maiores velocidades em comparação com o metal duro. Para comparar rendimento, utilizou as mesmas condições para o experimento com inserto de metal duro. A única variação foi o material da ferramenta conforme mostrado na tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Informação de dados de corte para realização da segunda fase de testes

Material	Velocidade de Corte	Avanço por dente	Número de facas	Velocidade de Avanço
Metal Duro	155m/min	0,22mm	6	590mm/min
Cerâmica	155m/min	0,22mm	6	590mm/min

Como o experimento com cerâmica não foi possível, devido à alta potência consumida do fuso e a ocorrência de avaria de quebra prematura, a terceira fase de testes foi a redução do número de insertos montados na ferramenta conforme demonstrado na tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Informação de dados de corte para realização da terceira fase de testes

Material	Velocidade de Corte	Avanço por dente	Número de dentes	Velocidade de Avanço
Metal Duro	155m/min	0,22mm	3	295mm/min
Cerâmica	155m/min	0,22mm	3	295mm/min

Na sequência dos experimentos, fixou-se a menor velocidade de corte utilizada nos experimentos e o uso apenas de insertos de metal duro, até então a melhor condição de corte experimentada, variando somente o avanço por dente conforme demonstra a tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Informação de dados de corte para realização da quarta fase de testes

Material	Velocidade de Corte	Avanço por dente	Número de dentes	Velocidade de Avanço
Metal Duro	110m/min	0,22mm	6	418mm/min
Metal Duro	110m/min	0,30mm	6	572mm/min
Metal Duro	110m/min	0,34mm	6	648mm/min

O maior avanço por dente utilizado nos experimentos foi definido pela segurança da máquina no controle de potência máxima utilizada, ou seja, a utilização do avanço por dente de 0,34mm se posicionava no limite de potência da máquina.

Todos os experimentos foram realizados réplicas, exceto os experimentos com variação da velocidade de corte que foi necessário realizar uma tréplica.

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO

Este capítulo descreverá os resultados dos experimentos. As variáveis analisadas são a evolução do desgaste dos insertos em função da quantidade de peças usinadas, o tempo de usinagem, a quantidade de dentes da ferramenta em contato com a peça, potência consumida do fuso e volume de cavaco removido.

3.1. Cavaco

A usinagem do ferro fundido cinzento gera cavaco de ruptura na região de cisalhamento (Ferraresi, 1970). O cavaco retirado do bloco do motor em ferro fundido vermicular utilizado nos experimentos também pode ser classificado como de ruptura, mas é um pouco maior que o típico gerado na usinagem do ferro fundido cinzento, conforme mostra a figura 3.1.

Como a deformação do cavaco no momento do corte não é homogênea por causa da concentração de tensão ou pontos de baixa resistência na parte traseira do cavaco (Diniz et al., 2008), a parte de traz do cavaco é bem rugosa, mesmo para um cavaco de ruptura conforme demonstrado na figura 3.2.

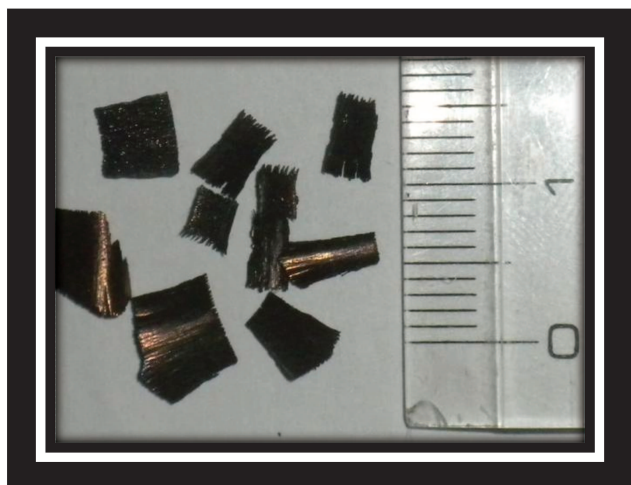


Figura 3.1 – Cavaco de ruptura de CGI

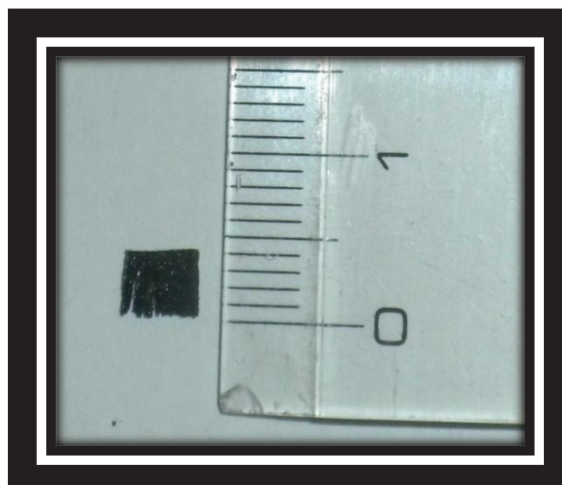


Figura 3.2 - Face rugosa do cavaco de CGI

3.2. Desgaste dos insertos (velocidade de corte como variável)

Na primeira fase dos experimentos, a quantidade de insertos montados na ferramenta (seis arestas) e o avanço por dente foram fixados, tendo como variável a velocidade de corte.

Na velocidade de corte de 155m/min, 30 peças foram usinadas até o desgaste de flanco do inserto ultrapassar os 0,4mm (V_B) conforme mostrado na figura 3.3.

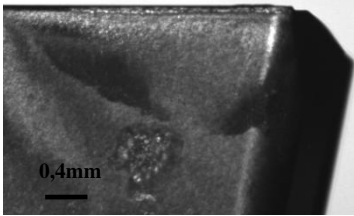
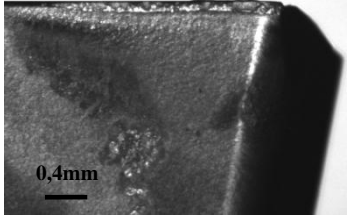
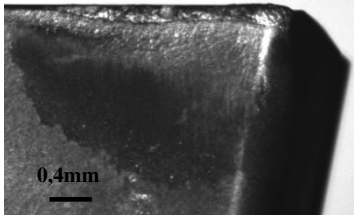
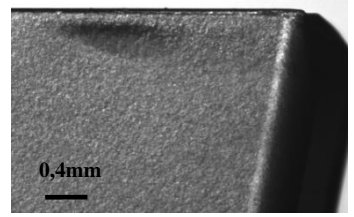
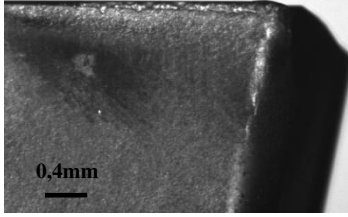
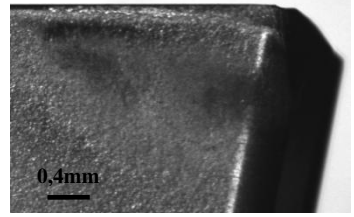
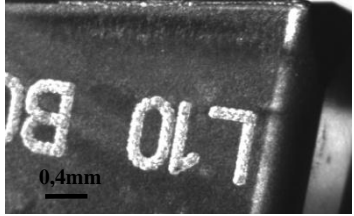
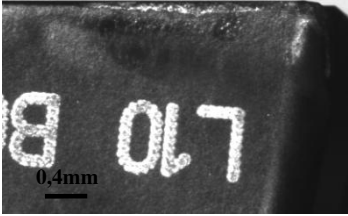
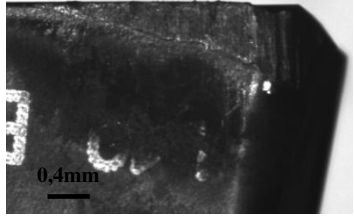
v_c110 m/min			
v_c140 m/min			
v_c155 m/min			
	10 peças	20 peças	30 peças

Figura 3.3 – Fotos do desgaste das arestas dos insertos em diferentes velocidades de corte

Para as velocidades de corte de 110m/min e 140m/min, foi possível mandrilar até 40 peças conforme demonstrado na figura 3.4. O desgaste dos diversos insertos de uma mesma eram muito próximos, mas foi decidido fazer as medições de insertos montados sempre na mesma posição da ferramenta. Pode-se verificar que o inserto utilizado no experimento com maior velocidade de corte resultou em um maior desgaste frontal (ainda figura 3.3), devido ao acréscimo de calor gerado no processo, concordando com a literatura (Diniz et al., 2008).

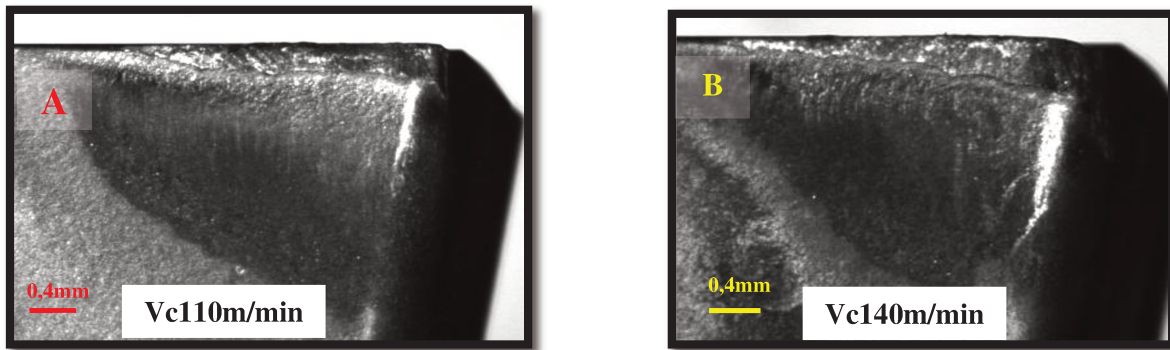


Figura 3.4 – Fotos do desgaste frontal dos insertos com 40 blocos do motor usinado

Como já descrito anteriormente, a maior velocidade de corte resulta em uma maior taxa de desgaste frontal dos insertos. Como mostra a figura 3.5, a influência da velocidade de corte na taxa de desgaste ficou clara somente a partir de 20 peças usinadas, ou seja, o comportamento do desgaste das arestas dos insertos foram muito semelhantes, diferenciando em poucos centésimos na usinagem de até 20 peças. O valor do desgaste foi 51% menor na velocidade de corte de 110m/min quando comparado com a velocidade de corte de 140m/min após, 40 peças usinadas. Analisando uma diferença ainda maior de velocidade de corte, como por exemplo, velocidade de corte de 110m/min e 155m/min, e fixando 30 peças para comparação, já que o experimento com a velocidade de corte de 155m/min não atingiu 40 peças, a diferença foi de 60%. Em outras palavras, o valor do desgaste V_B após 30 peças usinadas era 60% maior na ferramenta utilizada com 155 m/min que o desgaste da ferramenta que usinou com 110 m/min.

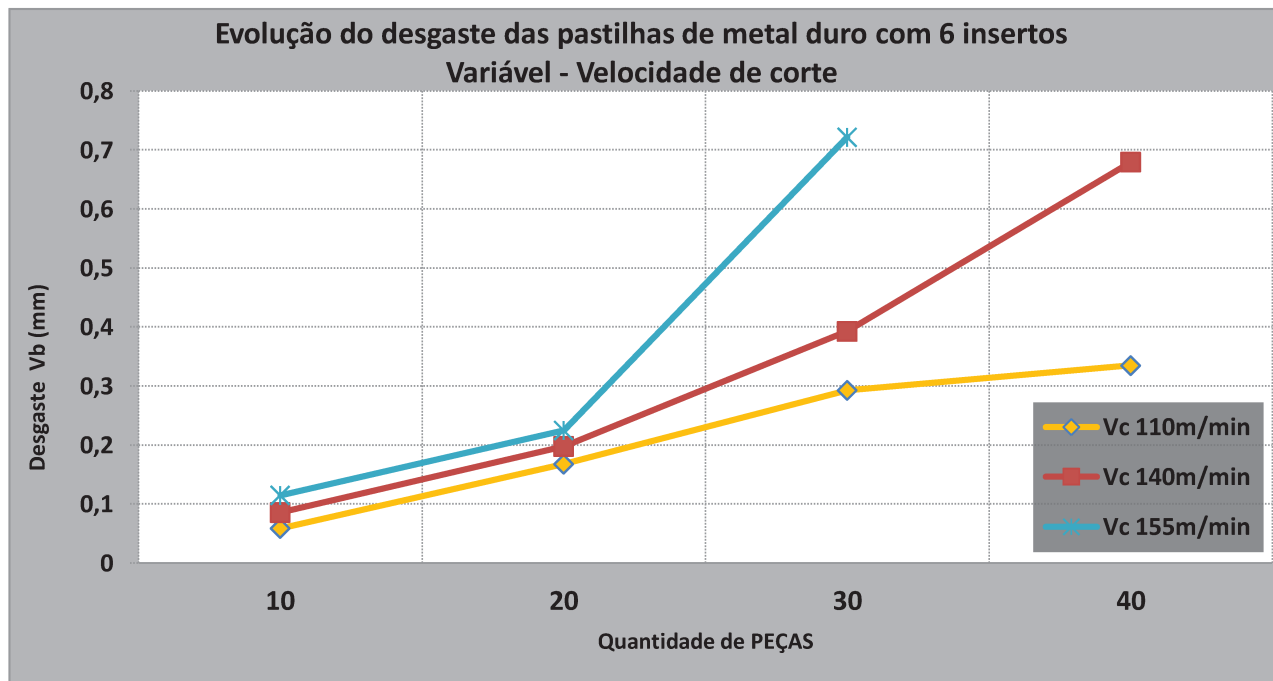


Figura 3.5 – Gráfico da evolução do desgaste dos insertos de M.D – 6 insertos

Comparando o gráfico de desgaste dos insertos com o gráfico de potência consumida do fuso (figura 3.6), vê-se que, conforme esperado, à medida em que aumenta o desgaste da ferramenta, aumenta o atrito na interface ferramenta/peça e, conseqüentemente, aumenta a potência consumida do fuso. Na usinagem com ferramenta nova (peça 1 na figura 3.6), a potência consumida com $v_c = 140$ m/min foi cerca de 22% maior que quando se usinou com $v_c = 110$ m/min (aumento de 27% no valor da velocidade), enquanto a potência consumida com velocidade de corte de 155m/min foi 9% maior que quando se usinou com $v_c = 140$ m/min (aumento de 11% no valor da velocidade de corte). Pode-se verificar que o aumento da potência consumida foi pouco menor que o aumento da própria velocidade de corte. Diniz et all. (2008) afirmam que a potência de corte pode ser dada pela equação 3.1. Como nem profundidade de usinagem, nem avanço foram alterados nestes ensaios, este resultado significa que o aumento da velocidade de corte proporcionou uma pequena redução no valor da pressão de corte, o que concorda com o que foi também afirmado por estes autores.

$$P_c = F_c \cdot v_c = K_s \cdot a_p \cdot f \cdot v_c \quad (3.1)$$

Onde:

P_c = potência de corte

F_c = força de corte

K_s = pressão específica de corte

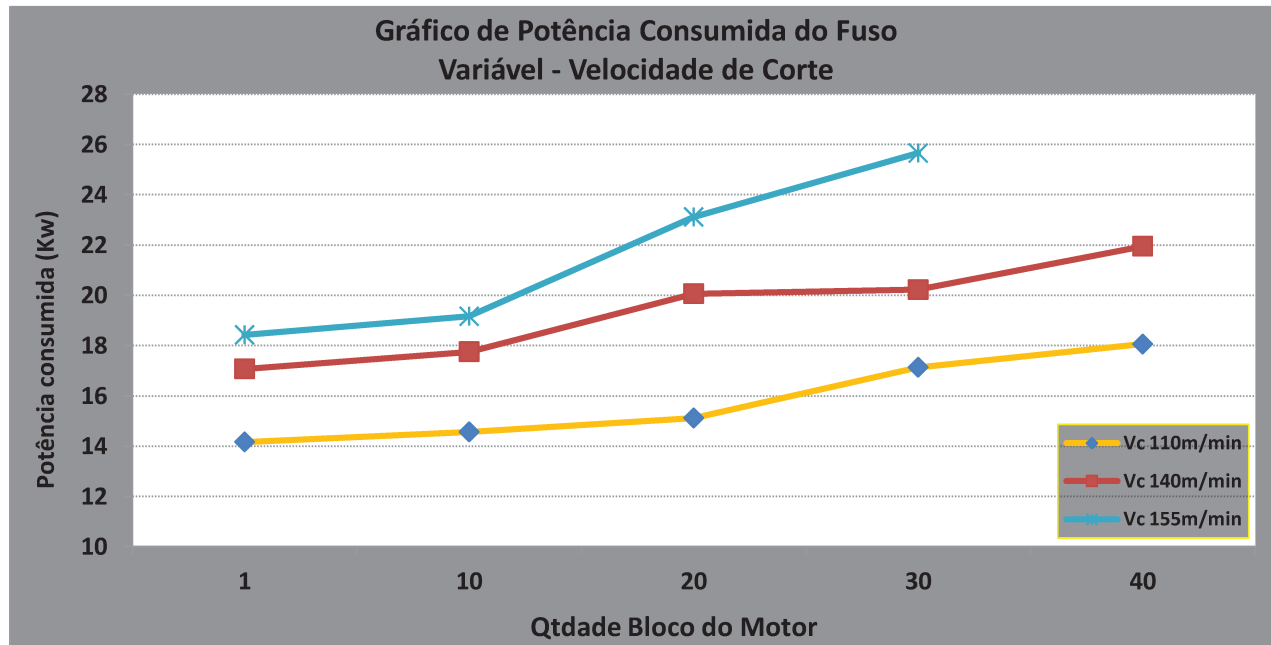


Figura 3.6 – Gráfico da potência consumida do fuso – Variável Velocidade de Corte

3.3. Desgaste dos inserts (comparação de metal duro com cerâmica para ferramentas com 3 e 6 inserts)

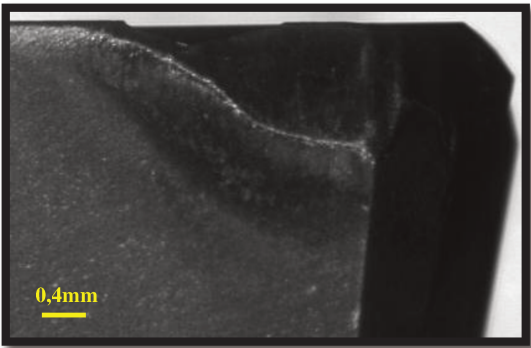
Na segunda fase dos experimentos, devido à utilização de inserts de cerâmica, foi utilizada a velocidade de corte de 155m/min que é a máxima permitida pela máquina. Como a intenção é comparar o desempenho dos materiais dos inserts, foi fixada a velocidade de corte de 155m/min, o avanço por dente de 0,22m/min e, inicialmente, seis arestas na ferramenta, tendo como variável o material de cerâmica e metal duro.

Porém, não foi possível realizar o experimento em questão. O ensaio teve que ser interrompido porque todos os inserts se quebraram antes da ferramenta completar 10 peças usinadas. O desgaste prematuro das arestas de corte do inserto de cerâmica e o aumento da pressão de corte devido ao aumento na quantidade de arestas, aumentaram bastante a tendência à quebra dos inserts.

Como não foi possível a comparação dos inserts de cerâmica com inserts de metal duro nestas condições, decidiu-se realizar esta fase dos experimentos, mantendo a velocidade de corte de

155m/min e o avanço por dente de 0,22m/min, mas reduzindo o número de arestas da ferramenta para três. Realizou-se estes testes com ferramenta de metal duro e ferramenta cerâmica.

Pode-se verificar que, para mandrilamento em desbaste de peças em material de ferro fundido vermicular, insertos de cerâmica a base de nitreto de silício não se mostraram adequados, ou seja, há um desgaste excessivo da aresta de corte conforme mostra a figura 3.7. Vê-se nesta figura que com apenas 10 peças usinadas o desgaste dos insertos ultrapassava 1,0mm de V_B . O inserto de metal duro para esta mesma quantidade de peças (10 peças) apresentava desgaste de somente 0,22 mm, conforme demonstrado na figura 3.8

	
Figura 3.7 – Aresta do inserto de cerâmica desgastada após 10 peças usinadas – V_B 1,243mm	Figura 3.8 – Aresta do inserto de metal duro desgastada após 10 peças usinadas – V_B 0,22mm

A figura 3.9 mostra que, inicialmente, a potência consumida pela máquina quando se utilizou ferramenta cerâmica era bem próxima daquela consumida quando se utilizou ferramenta de metal duro. Como pode ser visto nas figuras 2.7 e 2.8 e na tabela 2.3, as ferramentas utilizadas têm geometrias idênticas. Então, este resultado mostra que o suposto menor coeficiente de atrito da camada de TiAlN que recobre a ferramenta de metal duro não teve influência na diminuição dos esforços de corte. Porém, em poucas peças usinadas, devido ao excessivo desgaste das arestas de corte, há um aumento progressivo na potência consumida do fuso para o experimento com cerâmica. Após 10 peças usinadas, enquanto a potência consumida quando se utilizou ferramenta de metal duro aumentou 8% em relação à potência consumida na usinagem da primeira peça, a potência quando se usou ferramenta cerâmica aumentou em cerca de 41%.

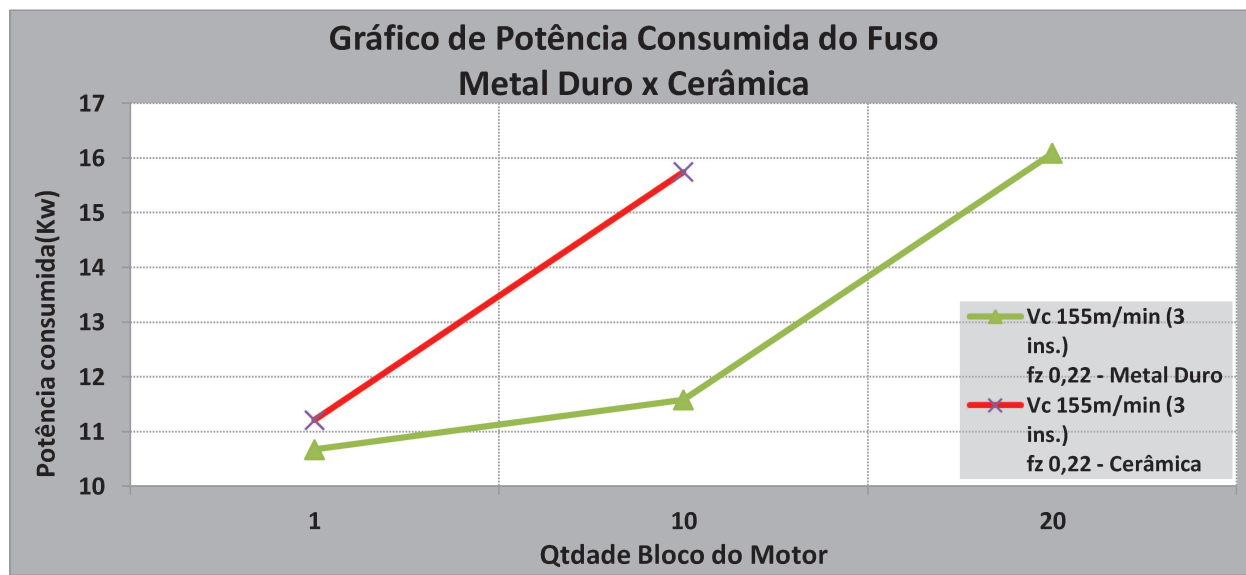


Figura 3.9 – Gráfico da potência consumida do fuso – Metal Duro x Cerâmica

Como a comparação entre insertos de metal duro e insertos de cerâmica foi extremamente favorável ao experimento de metal duro, decidiu-se comparar a quantidade de insertos em uso na ferramenta. Assim, os experimentos foram realizados com ferramenta de metal duro com três insertos e seis insertos, fixando a velocidade de corte de 155m/min e o avanço por dente de 0,23mm. Fotos das regiões desgastadas destas ferramentas estão mostradas na figura 3.8.

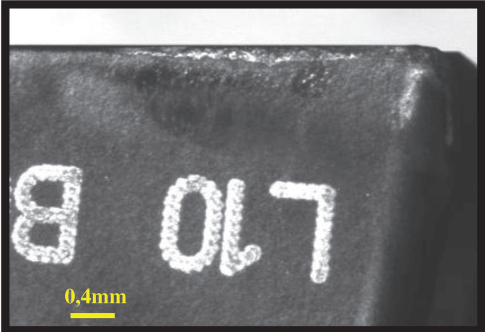
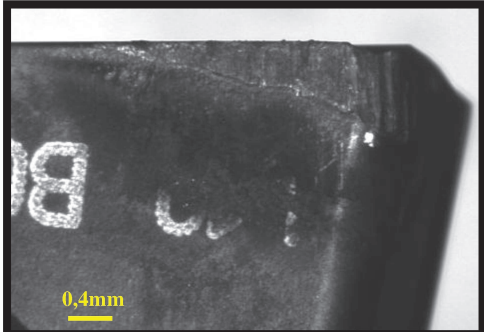
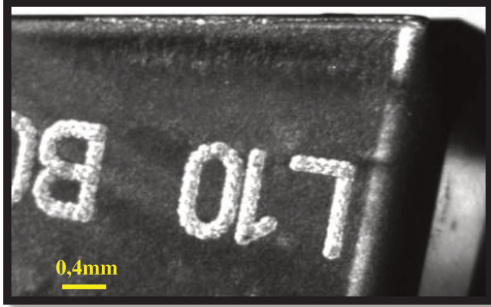
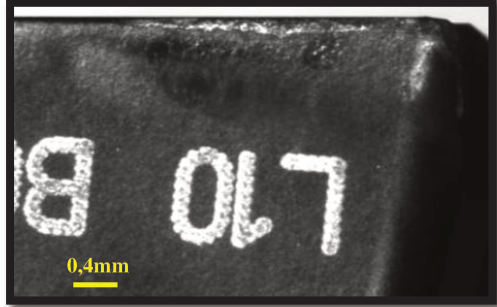
Três(3) insertos		
	10 peças	20 peças
Seis(6) insertos		
	10 peças	20 peças

Figura 3.10 - Fotos do desgaste das arestas dos insertos variando o número de dentes

Verifica-se que o experimento com maior quantidade de insertos (6 insertos) em uso obteve uma superioridade de 66% de vida com relação ao experimento de menor quantidade de insertos (3 insertos), confirmando a literatura (REUTER et al.,1999), quando atingido a quantidade de 20 peças que foi o limitante para o experimento com três insertos conforme mostra figura 3.11.

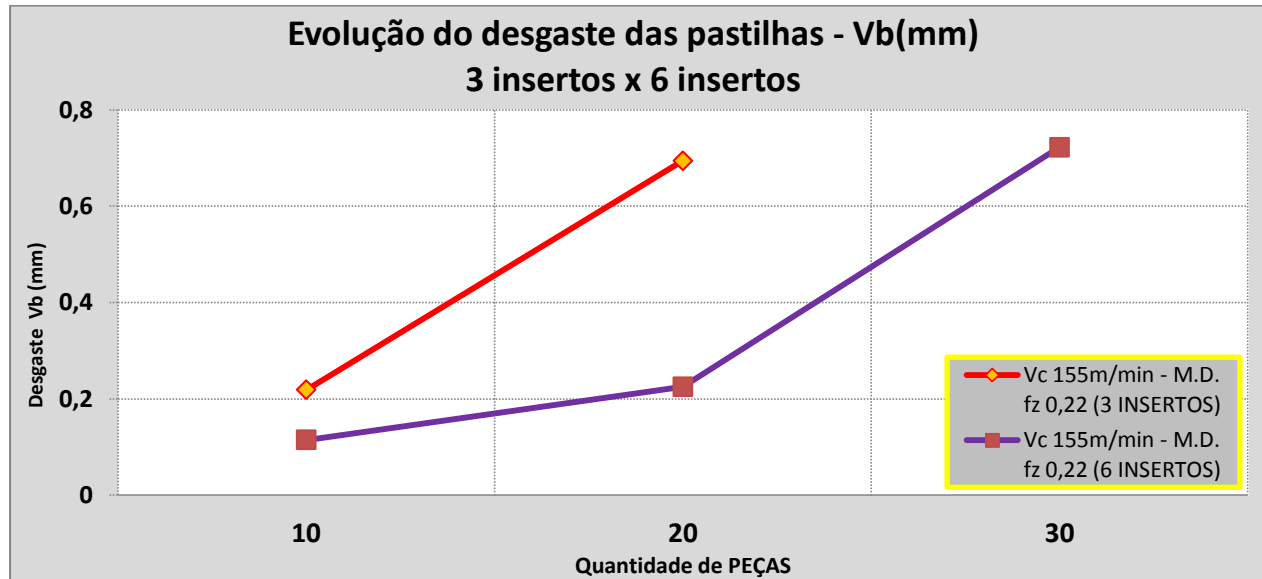


Figura 3.11 - Gráfico da evolução do desgaste dos insertos de metal duro – 3 insertos x 6 insertos

O aumento do número de dentes aumenta o volume de cavaco removido por minuto sem aumentar a carga realizada sobre cada aresta. Portanto, este aumento deve ser incentivado desde que haja espaço suficiente entre dentes para armazenar o cavaco e desde que a máquina tenha potência e rigidez para suportar este maior volume de cavaco removido. A figura 3.12 abaixo mostra a maior potência consumida para o experimento utilizando seis insertos como variável, mas ainda dentro do permitido pela máquina. Veja que, com 100% no aumento da velocidade de avanço devido ao dobro da quantidade de dentes em uso, a potência consumida do fuso iniciou com uma diferença de 73%, ou seja, confirma-se que a potência de corte aumenta, mas não na mesma proporção porque o K_s reduziu devido a maior velocidade de avanço. Se o K_s não reduzisse com o aumento do avanço, a diferença da potência consumida do fuso seria de 100%.

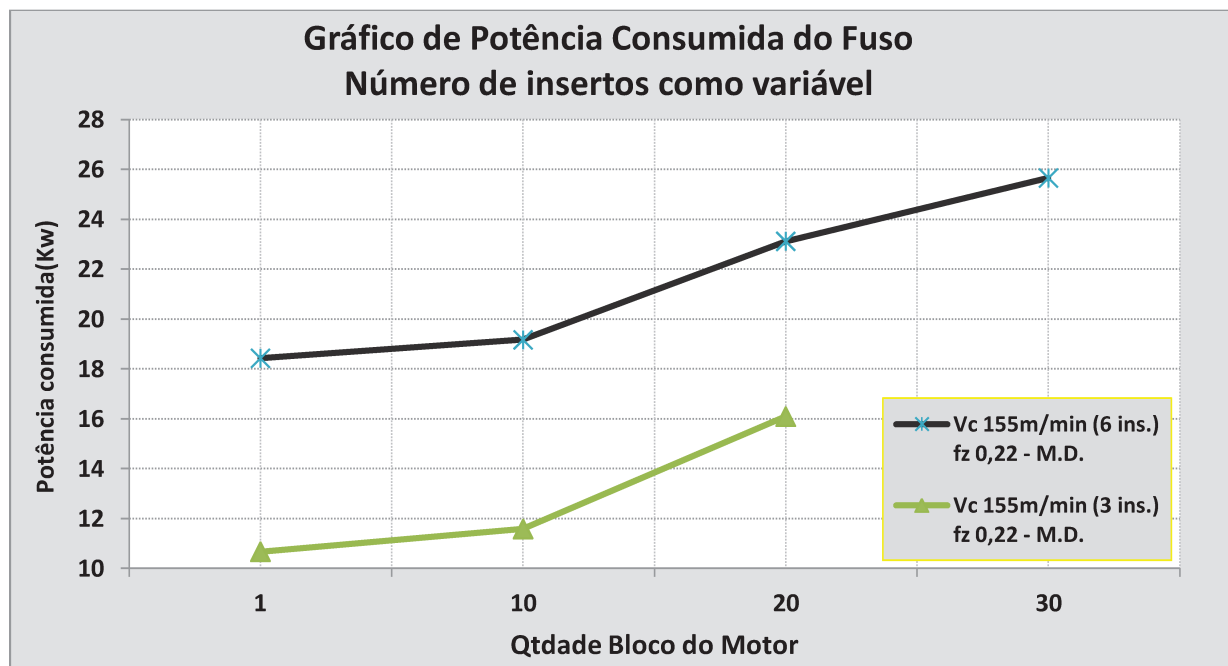


Figura 3.12 – Gráfico da potência consumida do fuso e a variável quantidade de dentes

3.4. Desgaste dos insertos (velocidade de corte 110m/min e avanço por faca como variável)

Na quarta fase dos experimentos, a quantidade de insertos montados na ferramenta (seis facas), a melhor velocidade de corte (v_c 110m/min) encontrada nos primeiros experimentos e o material da ferramenta (Metal Duro) foram fixados, tendo como variável o avanço por dente.

Pode-se verificar que, para velocidade de corte de 110m/min, independente da variável avanço por dente, a variação da evolução do desgaste das arestas de corte foi muito pequena conforme demonstrado nas figuras 3.13 e 3.14. O aumento do avanço aumenta o volume de cavaco removido por minuto e, com isto, aumenta o calor gerado. Por outro lado, o crescimento do avanço faz com que o contato do cavaco com a ferramenta se dê em uma maior porção da superfície de saída. Como tem-se maior calor gerado, mas com maior área da ferramenta para receber este calor, a temperatura da ferramenta não se altera muito e, por isso, a influência do avanço no desgaste da ferramenta, quando existe, é pequena (Diniz et al., 2008)

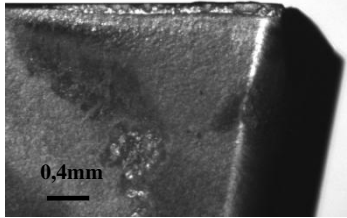
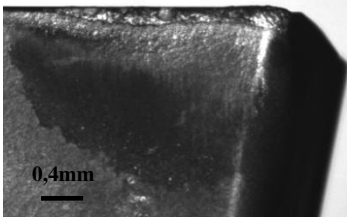
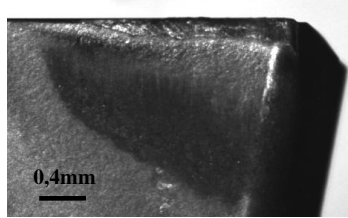
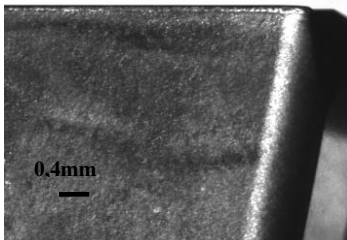
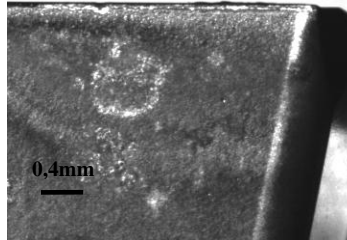
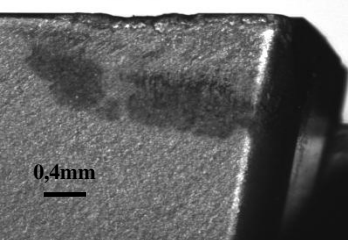
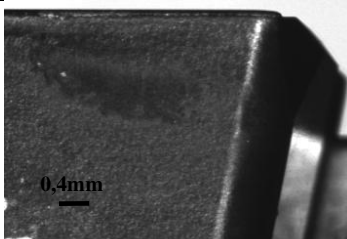
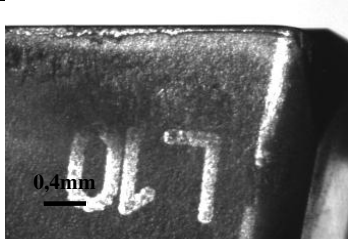
fz 0,22mm			
fz 0,30mm			
fz 0,34mm			
	20 peças	30 peças	40 peças

Figura 3.13 – Fotos do desgaste dos inserts em diferentes avanços

Este resultado é bastante importante para um processo de desbaste como o analisado neste trabalho. O aumento do avanço por dente faz com que o tempo de corte de uma peça seja reduzido. Como isto não gerou diminuição da vida da ferramenta, tem-se com certeza um processo mais produtivo (se a vida da ferramenta tivesse diminuído seria necessário cotejar a diminuição do tempo de corte contra o aumento de tempo de máquina parada para troca de ferramenta para afirmar que o processo foi mais produtivo) com mesmo custo de ferramentas e menor custo de utilização da máquina. Há que se perguntar qual é o limite para o aumento do avanço por dente. Com certeza, à medida que se aumenta este valor para mesmo raio de ponta da ferramenta, cresce o risco de quebra da mesma. A utilização de avanços ainda maiores que os aqui utilizados é uma sugestão para um trabalho futuro.

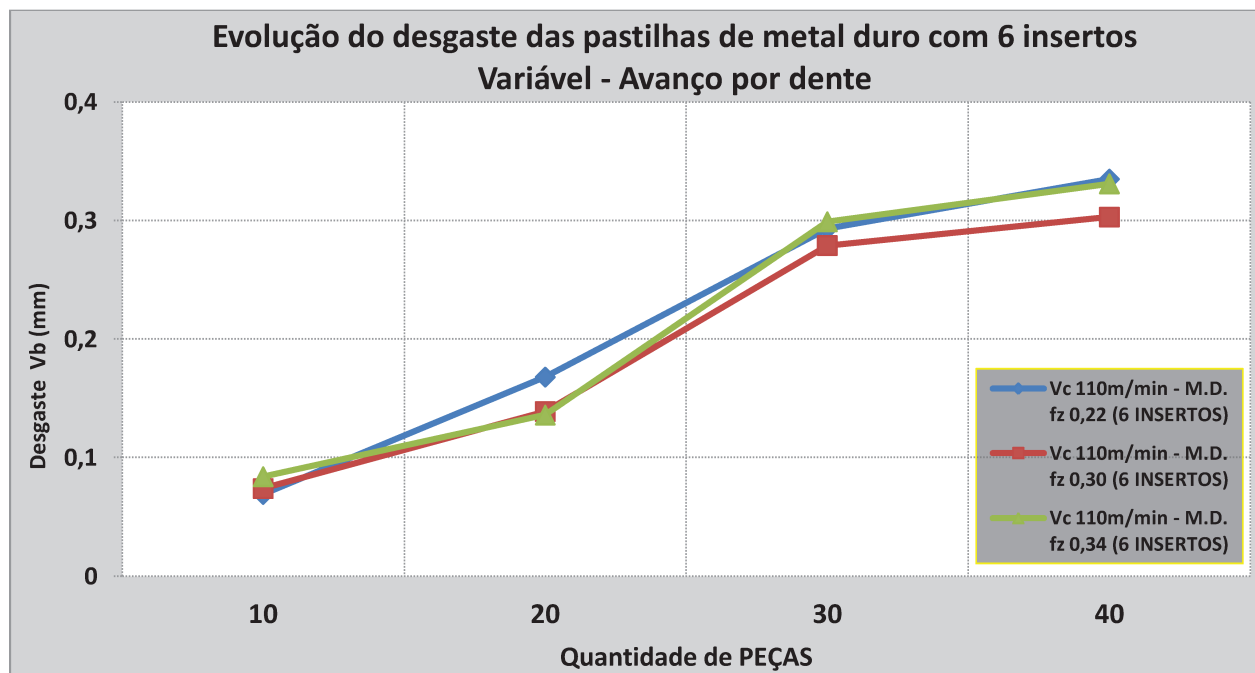


Figura 3.14 - Gráfico da evolução do desgaste dos insertos de metal duro com o avanço por dente como variável

A figura 3.15 mostra os resultados de potência consumida versus número de peças usinadas para os ensaios em que se teve variação do avanço por dente. Nela percebe-se que há um aumento na potência consumida à medida que se aumenta o avanço por dente. Levando-se em consideração a potência consumida na usinagem da 1ª. peça (ferramenta ainda sem desgaste) houve um aumento de 21% da potência quando se alterou o avanço por dente de 0,22mm para 0,30mm (36% de aumento do avanço), e um aumento de 9% da potência quando se alterou o avanço por dente de 0,30mm para 0,34mm (13% de aumento do avanço). Isto está em acordo com a literatura (Diniz, Marcondes e Coppini, 2008) que afirma que a Potência de Corte (P_c) aumenta, mas não na mesma proporção da avanço (f), porque a Pressão Específica de Corte (K_s) cai com o aumento de f . Isto é possível porque a contribuição dada pelo fluxo lateral de cavaco (parte do volume de material deformado da peça não se transforma em cavaco, mas sim escorrega entre a peça e a superfície de folga da ferramenta) fica percentualmente menos importante quando se aumenta o avanço.

Outro ponto importante a ser destacado nesta figura é que a contribuição do desgaste para o crescimento da potência consumida é significativa. Quando se utilizou $f_z = 0,30$ mm o crescimento da potência entre a 1ª peça usinada e a 40ª peça foi de 7,6%, enquanto quando se usou $f_z = 0,22$ mm este crescimento foi de 20% (maior crescimento percentual dentre as 3 curvas). Esta diferença de

variação percentual da potência consumida entre a 1ª e a 40ª peça deve-se provavelmente ao da potência ao longo da vida da ferramenta não é tão intenso.

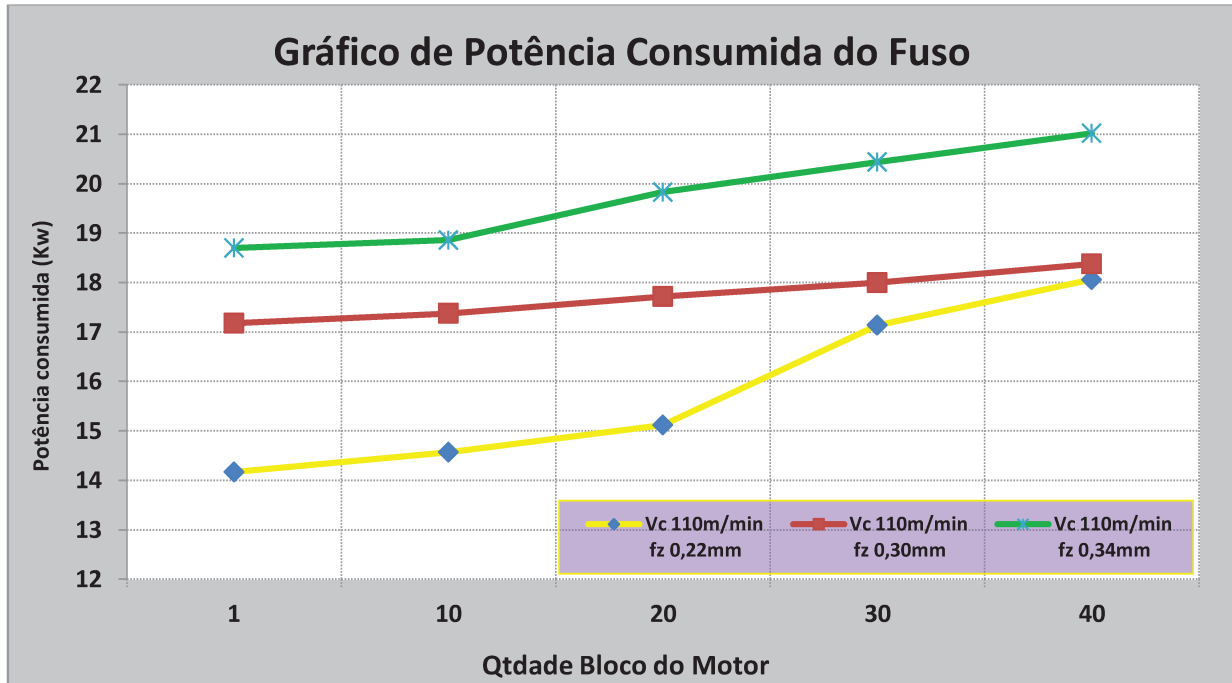


Figura 3.15 - Gráfico do consumo de potência do fuso da máquina usando a velocidade de avanço como variável

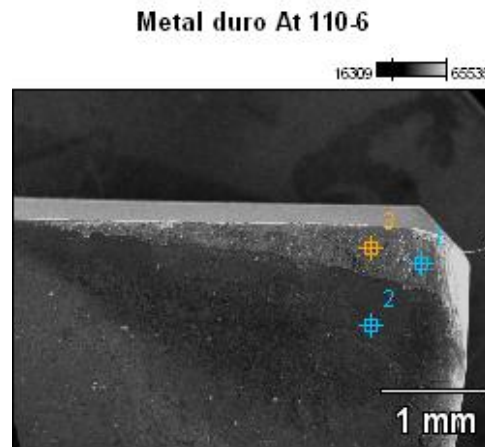
3.5. Análise dos mecanismos de desgaste

Os insertos utilizados nos experimentos foram submetidos à análise por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) com sistema de energia dispersiva (EDS). Este procedimento objetivou a análise do mecanismo de desgaste das arestas de corte.

Foram analisadas as arestas dos insertos de metal duro em fim de vida utilizados nos ensaios em que se variou a velocidade de corte e a quantidade de insertos. Os insertos com a variação do avanço por dente foram submetidos ao MEV e ao EDS a cada 10 peças mandriladas até completar o fim de vida. Com relação aos ensaios com ferramenta de cerâmica, somente as arestas utilizadas no experimento com três insertos puderam ser analisadas, porque no experimento utilizando seis insertos de cerâmicas os mesmos quebraram no momento do experimento, impossibilitando a análise.

Os insertos usados nos experimentos foram limpos por ataque da solução de 10 gramas de ferrocianeto de potássio [$K_4 [Fe(CN)_6]$], 10 gramas de hidróxido de potássio (KHO) e 100 mililitro de água destilada, imerso de 4 à 6 antes de serem colocados no microscópio.

A figura 3.16 mostra foto tirada no MEV da região desgastada da superfície de folga de uma das pastilhas utilizada nos ensaios realizado nas condições $v_c = 110$ m/min, $f_z = 0,22$ mm, 6 insertos e ferramenta de metal duro.



**Figura 3.16 – Vista da aresta de corte do inserto
($v_c 110$ m/min – $f_z 0,22$ mm – 6 insertos – Metal Duro) em fim de vida da ferramenta**

Nesta figura não se vê riscos paralelos à direção de corte que, se ocorressem, indicariam desgaste de origem abrasiva. Fez-se análise de EDS nos 3 pontos mostrados na figura e o resultado destas análises estão mostrados na figura 3.17. O ponto 2, que está fora da região desgastada, mostra predominância de titânio e alumínio, pois ali a cobertura da ferramenta está intacta (a cobertura é de TiAlN). Nos pontos 1 e 3 que estão mais próximos da aresta de corte, encontra-se uma alta quantidade de ferro e manganês, mostrando que houve adesão de material da peça na região desgastada da superfície de folga.

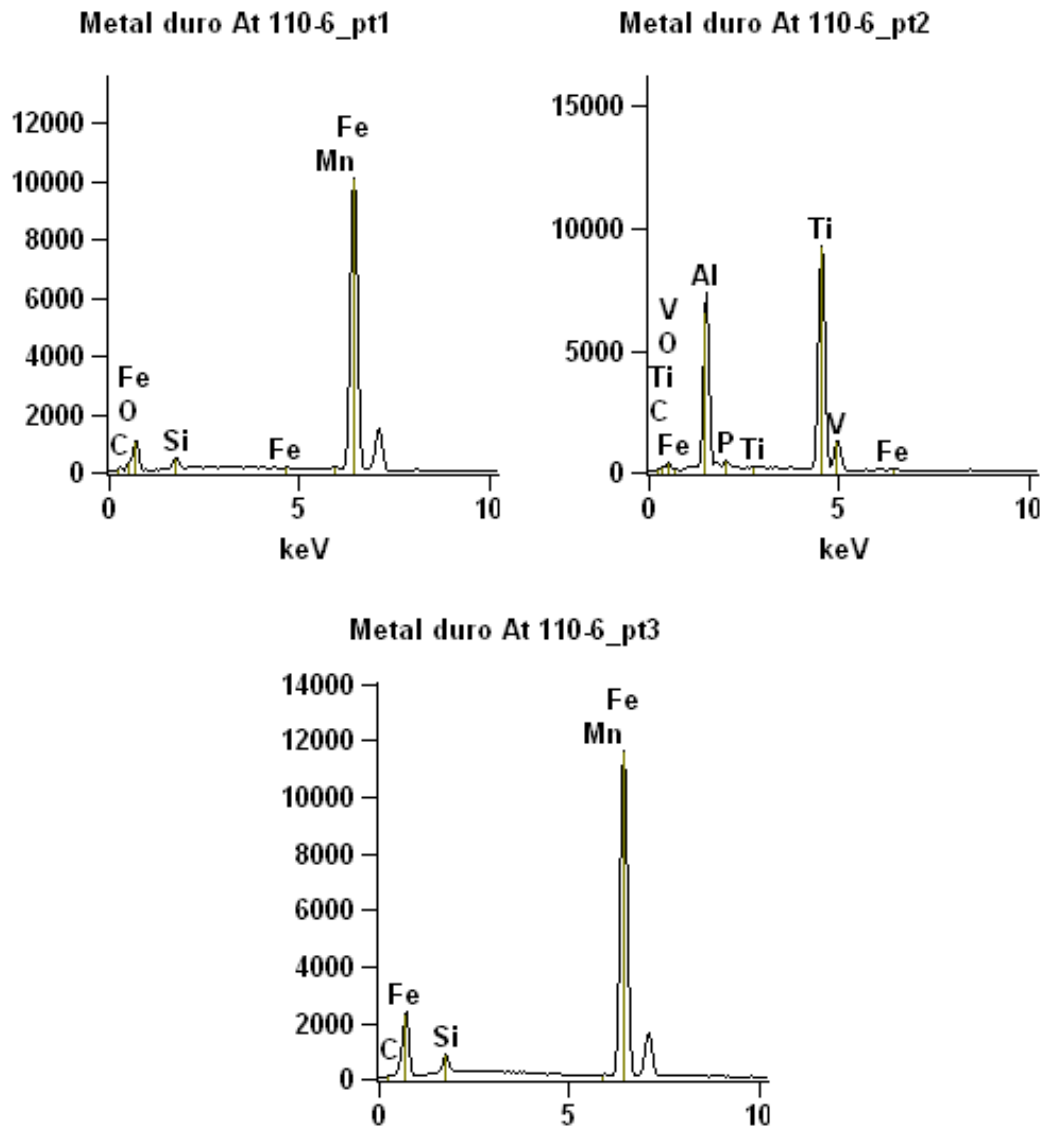
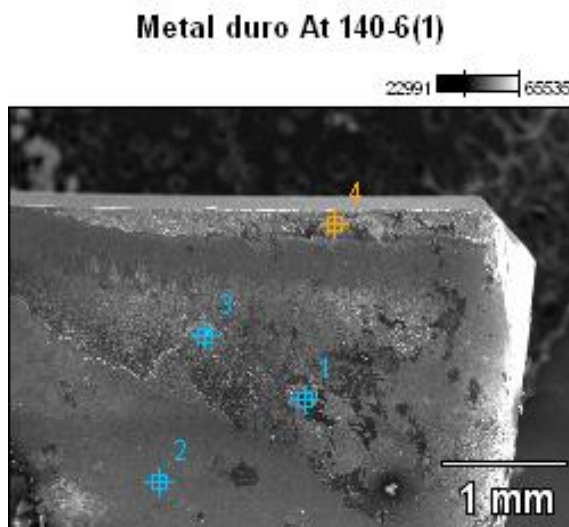


Figura 3.17 – Elementos químicos encontrados nos insertos de metal duro, a uma velocidade de corte de 110m/min, avanço por dente de 0,22mm e 6 insertos em uso

A figura 3.18 mostra foto tirada no MEV da região desgastada da superfície de folga de uma das pastilhas utilizada nos ensaios realizado nas condições $v_c = 140$ m/min, $f_z = 0,22$ mm, 6 insertos e ferramenta de metal duro. De novo não se vê riscos abrasivos na região desgastada. Os pontos 1, 2 e 3 mostrados na figura estão fora da região desgastada e a análise EDS neles (figura 3.19) indicou a presença de elementos da cobertura da ferramenta, como era de se esperar. O ponto 3, além da presença de elementos da ferramenta, mostrou também a presença de elementos do fluido de corte

como fósforo e pequena quantidade de material da peça, provavelmente devido ao contato com o material do cavaco retirado da peça.



**Figura 3.18 – Vista da aresta de corte do inserto
(v_c 140m/min – f_z 0,22mm – 6 insertos – Metal Duro) em fim de vida da ferramenta**

No ponto 4, verifica-se a presença de elementos como ferro, manganês e silício que são materiais presentes exclusivamente na peça usinada e no cavaco, mostrando de novo que houve adesão de material da peça/cavaco na região desgastada da superfície de folga.

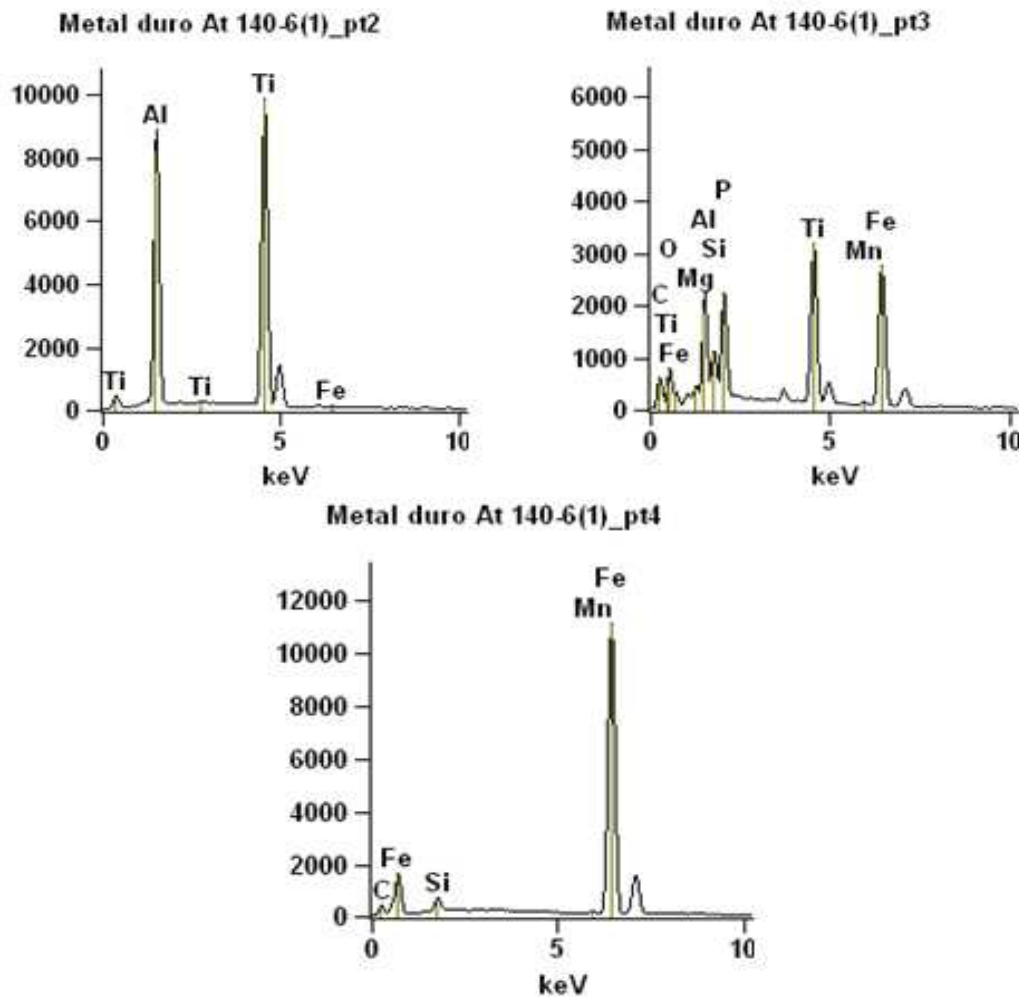
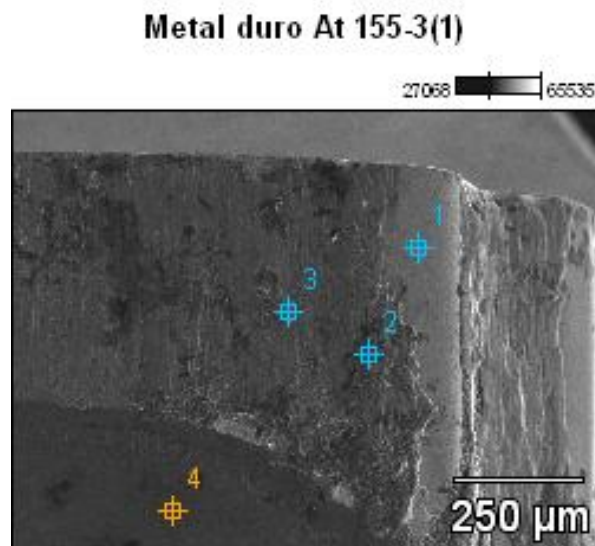


Figura 3.19 – Elementos químicos encontrados nos insertos de metal duro, a uma velocidade de corte de 140m/min, avanço por dente de 0,22mm e 6 insertos em uso

A figura 3.20 mostra foto tirada no MEV da região desgastada da superfície de folga de uma das pastilhas utilizada nos ensaios realizado nas condições $v_c = 155$ m/min, $f_z = 0,22$ mm, 6 insertos e ferramenta de metal duro. De novo não se vê riscos abrasivos na região desgastada. Nesta figura pode-se também ver que o desgaste e a velocidade de ocorrência do desgaste foram tais que a ferramenta chegou a lascar.



**Figura 3.20 – Vista da aresta de corte do inserto
(v_c 155m/min – fz0,22mm – 3 insertos – Metal Duro) em fim de vida da ferramenta**

A figura 3.21 mostra os resultados da análise EDS. O ponto 4, que está fora da região desgastada (ver figura 3.20) mostra somente a presença de elementos da cobertura da ferramenta. Os pontos 2 e 3 mostram a forte presença de material da peça/cavaco aderidos à superfície desgastada. O ponto 1, que está na vizinhança da região lascada, mostra principalmente a presença de elementos do substrato da ferramenta, como tungstênio e cobalto, mostrando que ali toda a camada de cobertura já havia sido removida.

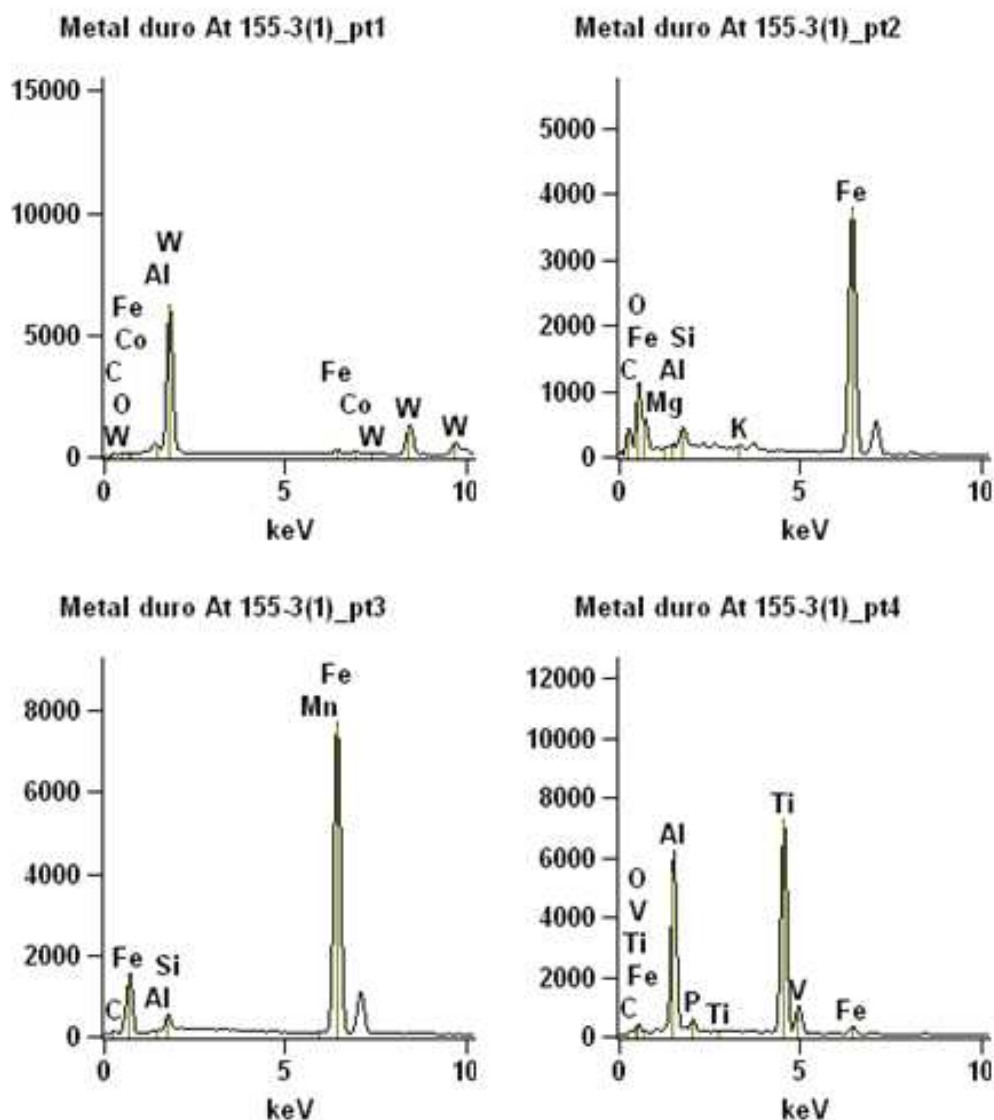
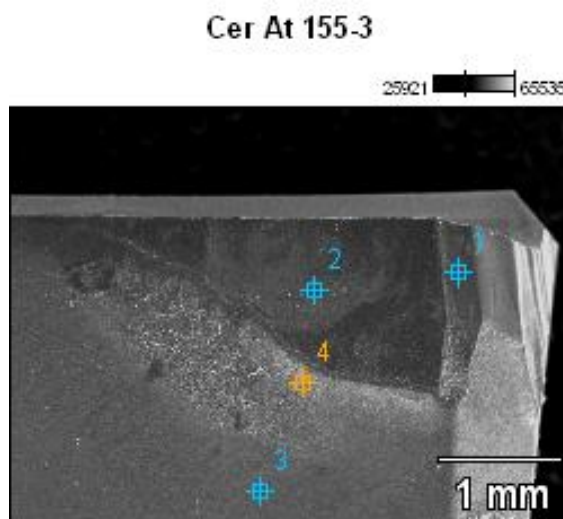


Figura 3.21 – Elementos químicos encontrados nos insertos de metal duro, a uma velocidade de corte de 155m/min, avanço por dente de 0,22mm e 3 insertos em uso

Depois da análise do desgaste destas 3 ferramentas pode-se concluir que ele ocorreu principalmente devido ao mecanismo de adesão e arranque de partículas da ferramenta (attrition). A pressão de corte foi tal que permitiu que, durante a formação do cavaco, parte do material da peça/cavaco extrudasse entre ferramenta e peça (talvez auxiliado por algum desgaste inicial gerado por um outro mecanismo) e aderisse à superfície de folga da ferramenta. Esta camada aderida era arrancada pelo atrito entre ferramenta e peça levando consigo partículas da cobertura e do substrato da ferramenta. Ao arrastar partículas da ferramenta, o desgaste era mais ainda incentivado, já que

estas partículas bastante duras, atritavam com a própria ferramenta. Pode-se concluir que o mecanismo principal de desgaste foi este devido à presença de camada do material da peça/cavaco aderida em todas as regiões desgastadas, como também pela região do substrato exposta na figura 3.20. Conseguiu-se tirar uma foto da ferramenta no momento que, naquela região (ponto 1 da figura 3.20), a camada aderida havia sido removida e ainda não tinha sido substituída por outra camada, deixando o substrato exposto. É lógico que, na continuidade deste processo de desgaste, principalmente quando a taxa desgaste é alta devido à alta velocidade de corte (como ocorreu quando se utilizou $v_c = 155$ m/min), o risco de lascamento da ferramenta (remoção de macro-partículas e não de micro-partículas) é alto, como se viu na ponta da ferramenta mostrada na figura 3.20.

A figura 3.22 mostra foto tirada no MEV da região desgastada da superfície de folga de uma das pastilhas utilizada nos ensaios realizado nas condições $v_c = 155$ m/min, $f_z = 0,22$ mm, 3 insertos e ferramenta de cerâmica.



**Figura 3.22 – Vista da aresta de corte do inserto
($v_c 155$ m/min – $f_z 0,22$ mm – 3 insertos – Cerâmica) em fim de vida da ferramenta**

Há quatro pontos indicados conforme demonstrado na figura 3.22. Nos pontos 1, 2 e 3, verifica-se a presença de alta concentração de silício (figura 3.23) que existe tanto na peça quanto no inserto. Porém, como o ponto 3 não tem contato com a peça, há grande probabilidade que o silício

encontrado seja somente do inserto. Foi encontrado também tântalo, presente somente ao material do inserto conforme demonstrado na figura 3.23. No ponto 4, que se refere exatamente à fronteira da região de desgaste (fronteira entre a área de contato com a peça e a área sem contato), verifica-se a presença de material como silício, alumínio e cobalto referente ao inserto mas também zinco e zircônio que são materiais do óleo refrigerante utilizado no experimento. Isto significa que o fluido de corte chegava bem próximo à interface peça-ferramenta, mas não penetrava nela. Assim, o fluido tinha uma ação refrigerante bastante eficiente, já que atingia regiões próximas à fonte geradora de calor, mas não tinha ação lubrificante, pois não penetrava nas interfaces para poder ter ação de redução do coeficiente de atrito.

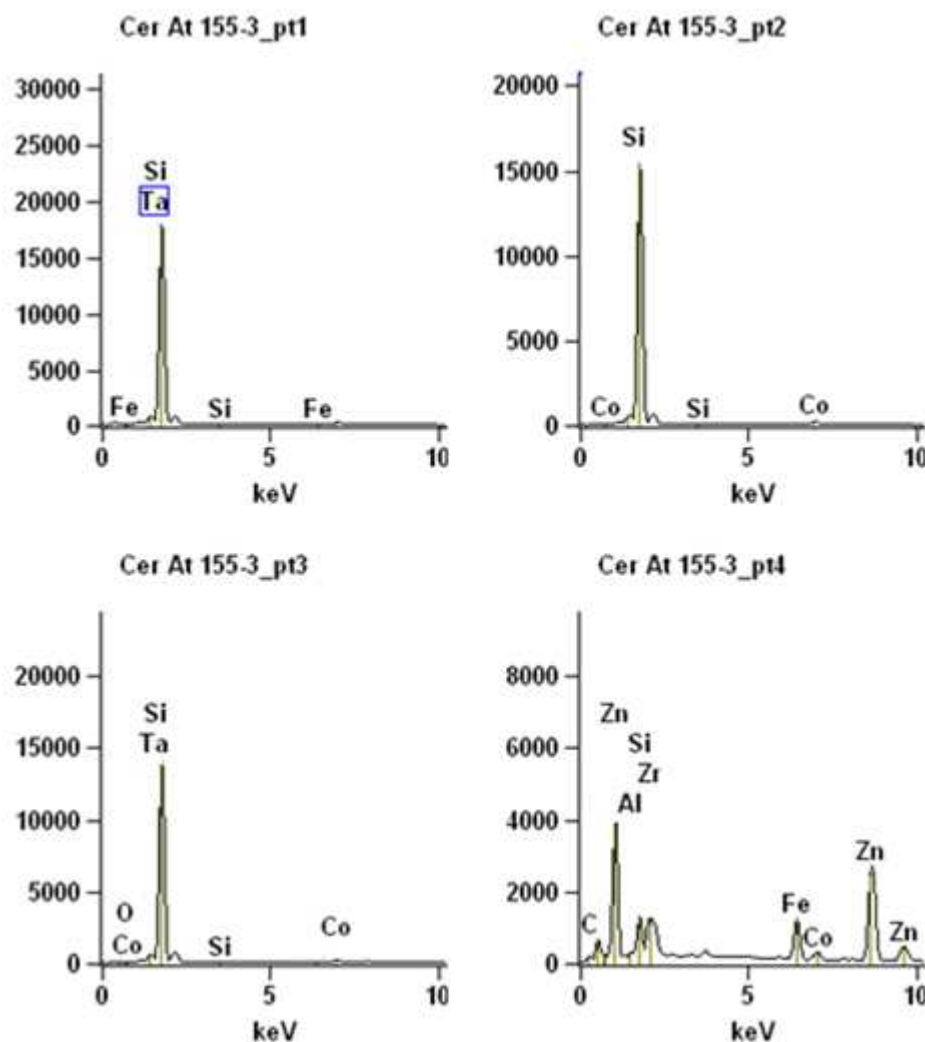


Figura 3.23 – Elementos químicos encontrados nos insertos de cerâmica, a uma velocidade de corte de 155m/min, avanço por dente de 0,22mm e 3 insertos em uso

Uma análise visual da figura 3.22 mostra uma superfície lisa e a figura 3.23 mostra a presença em pequena quantidade de elementos da peça. Estes pontos são indicações de que o desgaste difusivo estiver presente. Porém, a aparência facetada da região de desgaste também indica que houve quebra de partículas macroscópicas da ferramenta, talvez causada pela tensão térmica gerada pela alta refrigeração realizada pelo fluido de corte.

Numa tentativa de se entender o processo de desgaste da ferramenta de metal duro desde o início de sua vida, fez-se análise da superfície desgastada de uma das ferramentas em vários momentos de sua vida. A figura 3.24 mostra foto tirada no MEV da região desgastada da superfície de folga de uma das pastilhas utilizada no ensaio realizado nas condições $v_c = 110$ m/min, $f_z = 0,30$ mm, 6 insertos e ferramenta de metal duro, após 10 peças usinadas.

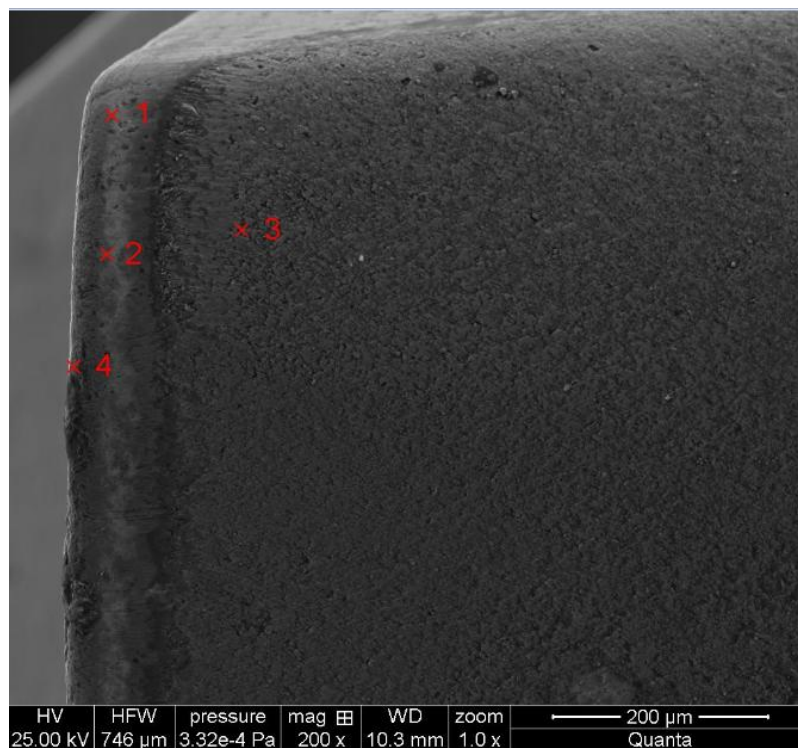


Figura 3.24 – Vista da aresta de corte do inserto
($v_c 110$ m/min – $f_z 0,30$ mm – 6 insertos – Metal Duro) com 10 peças usinadas

A análise de EDS dos quatro pontos indicados na figura 3.24 está mostrada na figura 3.25. Nos pontos 1 e 2, verifica-se a presença de elementos da cobertura (titânio e alumínio), como

também elementos do substrato da ferramenta (W). No ponto 3, que é um ponto fora da região desgastada, encontra-se alta concentração de alumínio e titânio presentes na cobertura do inserto. No ponto 4, encontra-se ainda bastante material da cobertura da ferramenta Al e Ti. Vê-se que após 10 peças usinadas ainda não se iniciou o processo de adesão da material da peça/cavaco na superfície de folga da ferramenta (não se verifica a presença marcante de Fe na região de desgaste), adesão esta bastante presente na ferramenta após 40 peças usinadas. Também, mesmo na região desgastada ainda se verifica bastante a presença de material da cobertura, o que demonstra que o desgaste não era profundo a ponto de remover esta camada de material.

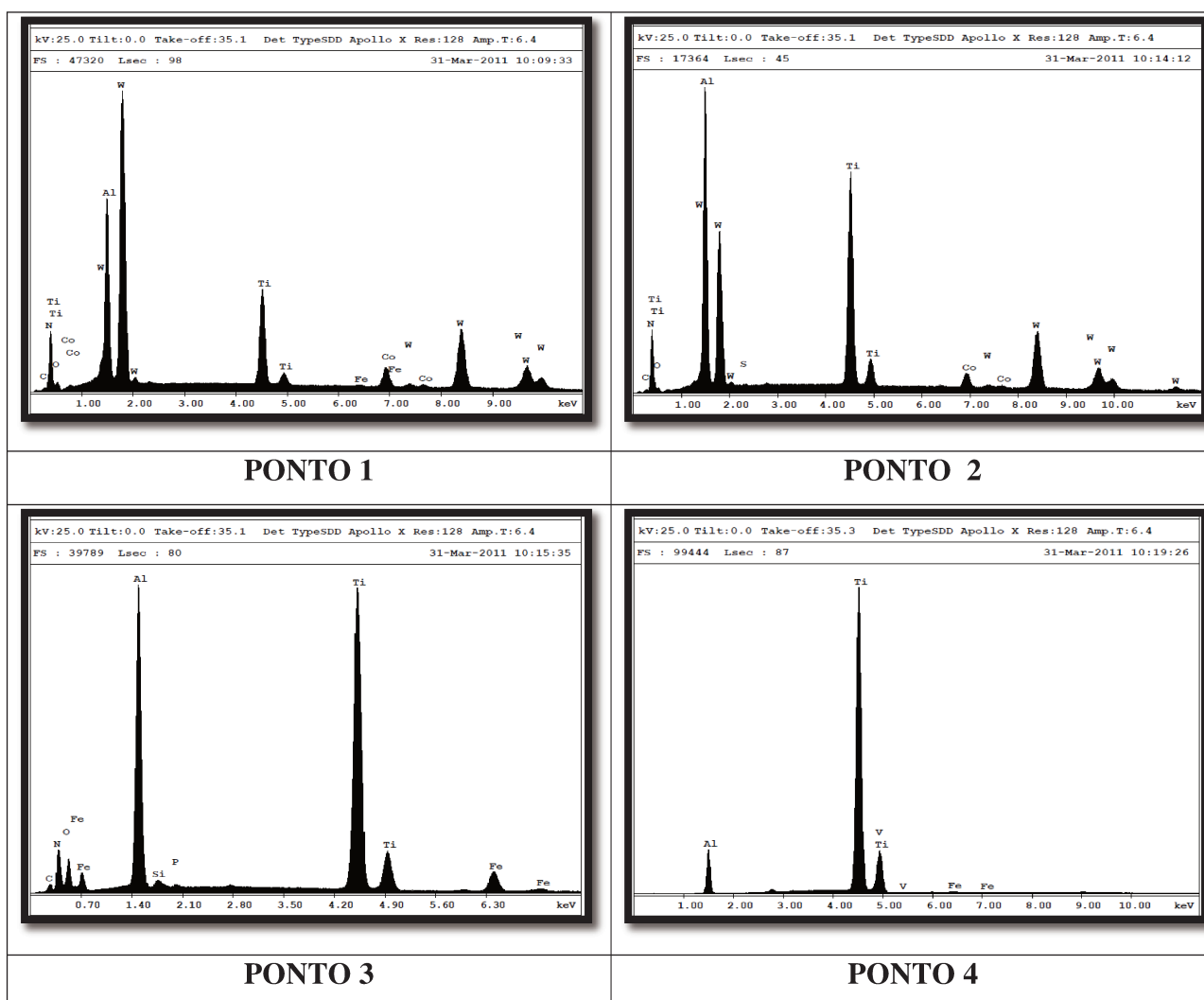


Figura 3.25 – Elementos químicos encontrado no inserto de M.D., a uma v_c 110m/min, Avanço por dente de 0,30mm após 10 peças usinadas

A figura 3.26 mostra foto tirada no MEV da região desgastada da superfície de folga de uma das pastilhas utilizada no ensaio realizado nas condições $v_c = 110$ m/min, $f_z = 0,30$ mm, 6 insertos e ferramenta de metal duro, após 20 peças usinadas.

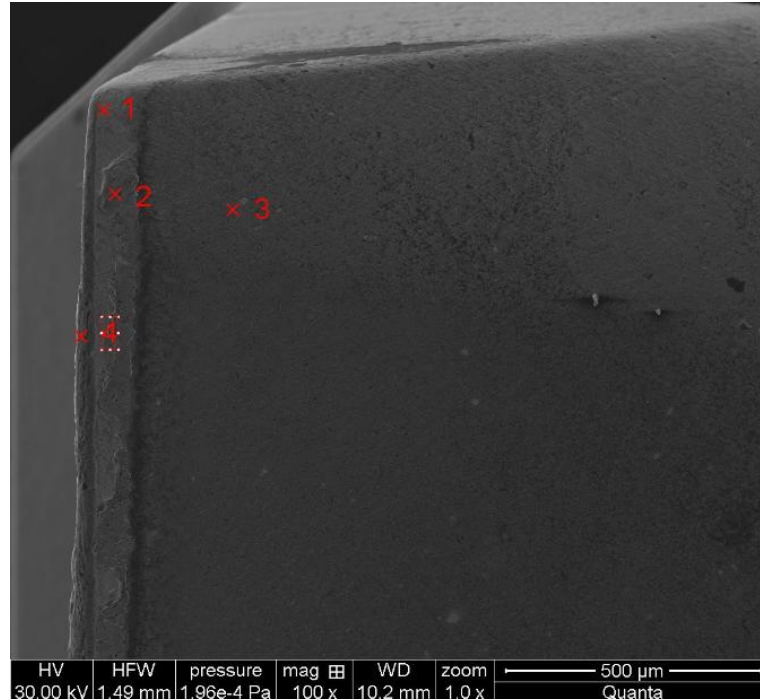


Figura 3.26 – Vista da aresta de corte do inserto
(v_c 110m/min – f_z 0,30mm – 6 insertos – Metal Duro) com 20 peças usinadas

A análise de EDS dos quatro pontos indicados na figura 3.26 está mostrada na figura 3.27. No ponto 1, verifica-se a presença de alta concentração de tungstênio referente ao substrato do inserto e uma pequena concentração de Fe da peça. Conclui-se então que nesta porção da região desgastada, a cobertura já havia sido removida e o processo de adesão de material da peça/cavaco dava sinais de sua presença. No ponto 2, a presença do Fe proveniente da peça/cavaco é bastante intensa, mostrando que o processo de adesão já havia realmente se iniciado. O ponto 3 é fora da região desgastada e, portanto, somente possui elementos da cobertura da ferramenta como alumínio e titânio. Algum teor de W aparece porque a análise EDS é capaz de detectar elementos que está a alguma distância da superfície analisada. Assim, o W que está a alguns microns de distância é mostrado na análise. No ponto 4, encontra-se somente alumínio e titânio da cobertura, mostrando que nesta porção da região desgastada, o processo de adesão ainda não havia se iniciado.

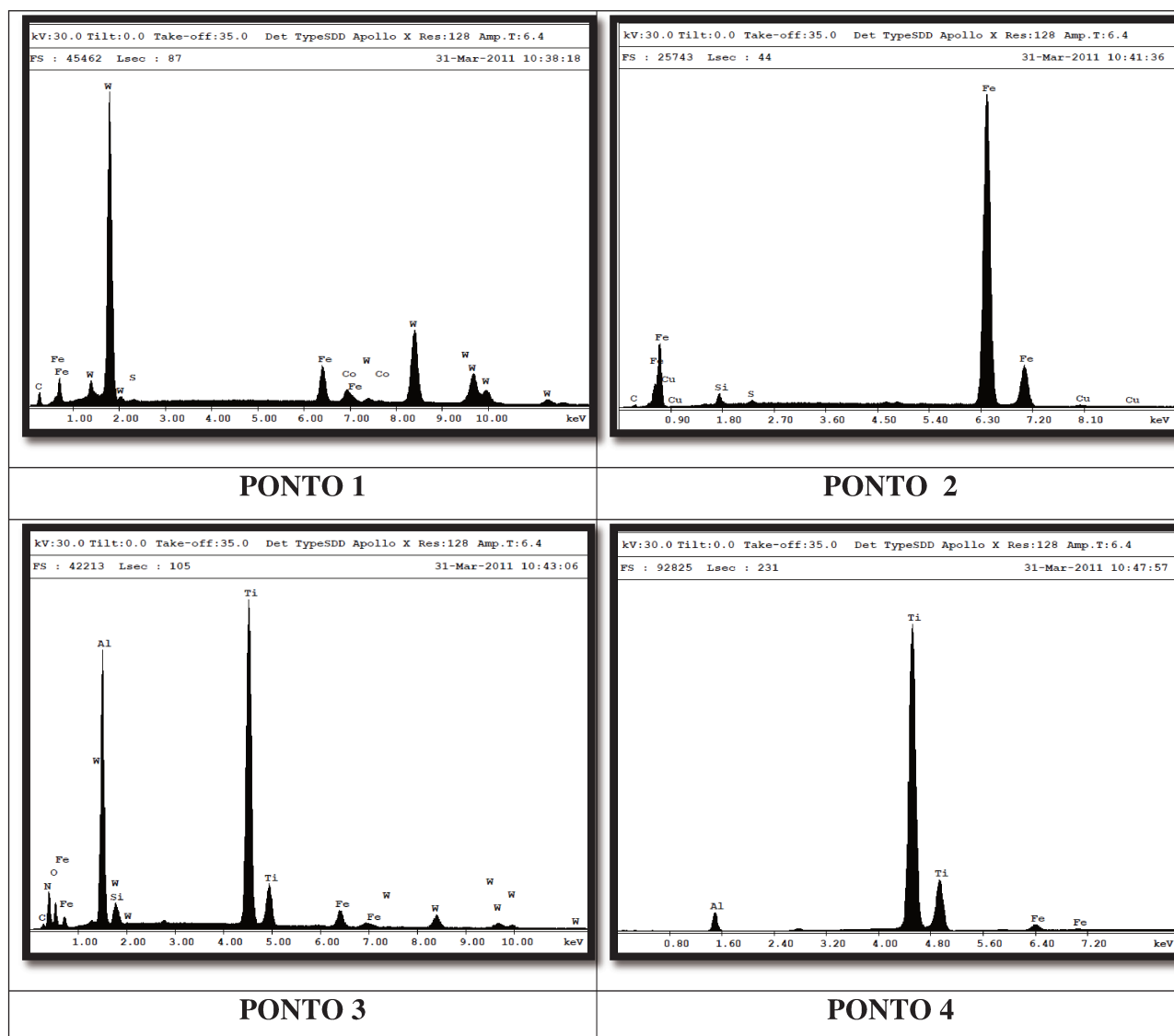
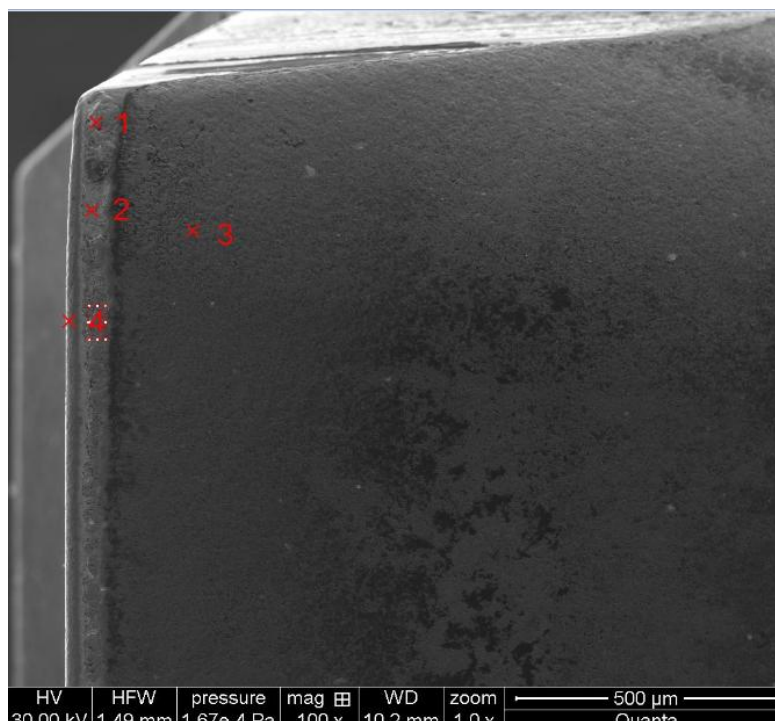


Figura 3.27 – Elementos químicos encontrado no inserto de M.D., a uma v_c 110m/min, Avanço por dente de 0,30mm e 20 peças usinadas

A figura 3.28 mostra foto tirada no MEV da região desgastada da superfície de folga de uma das pastilhas utilizada no ensaio realizado nas condições $v_c = 110$ m/min, $f_z = 0,30$ mm, 6 insertos e ferramenta de metal duro, após 30 peças usinadas.



**Figura 3.28 – Vista da aresta de corte do inserto
($v_c 110\text{m/min}$ – $f_z 0,30\text{mm}$ – 6 insertos – Metal Duro) com 30 peças usinadas**

A análise de EDS dos quatro pontos indicados na figura 3.28 está mostrada na figura 3.29. Similarmente ao que ocorreu com a ferramenta após 20 peças usinadas, agora, com 30 peças usinadas a região desgastada mostra ponto coberto por material da peça/cavaco (ponto 1), ponto em que a cobertura havia sido removida e o substrato está exposto (ponto 2) e ponto em que a cobertura ainda estava intacta (ponto 4). Logicamente, o ponto 3, que está fora da região desgastada, mostra somente elementos da cobertura e pouco concentração de elementos do substrato da ferramenta.

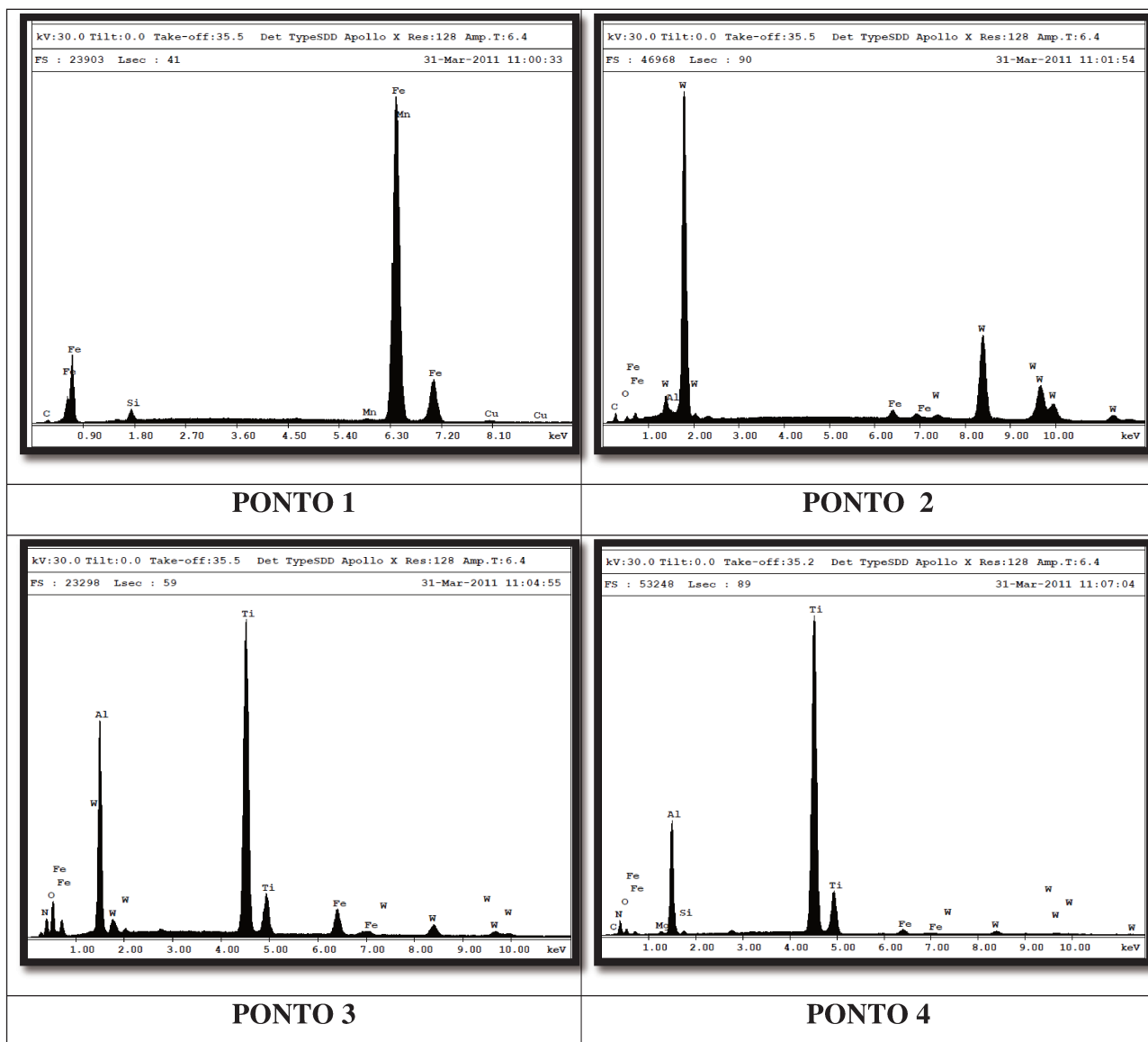


Figura 3.29 – Elementos químicos encontrado no inserto de M.D., a uma v_c 110m/min, Avanço por dente de 0,30mm e 30 peças

A figura 3.30 mostra foto tirada no MEV da região desgastada da superfície de folga de uma das pastilhas utilizada no ensaio realizado nas condições $v_c = 110$ m/min, $f_z = 0,30$ mm, 6 insertos e ferramenta de metal duro, após 40 peças usinadas (fim do ensaio).

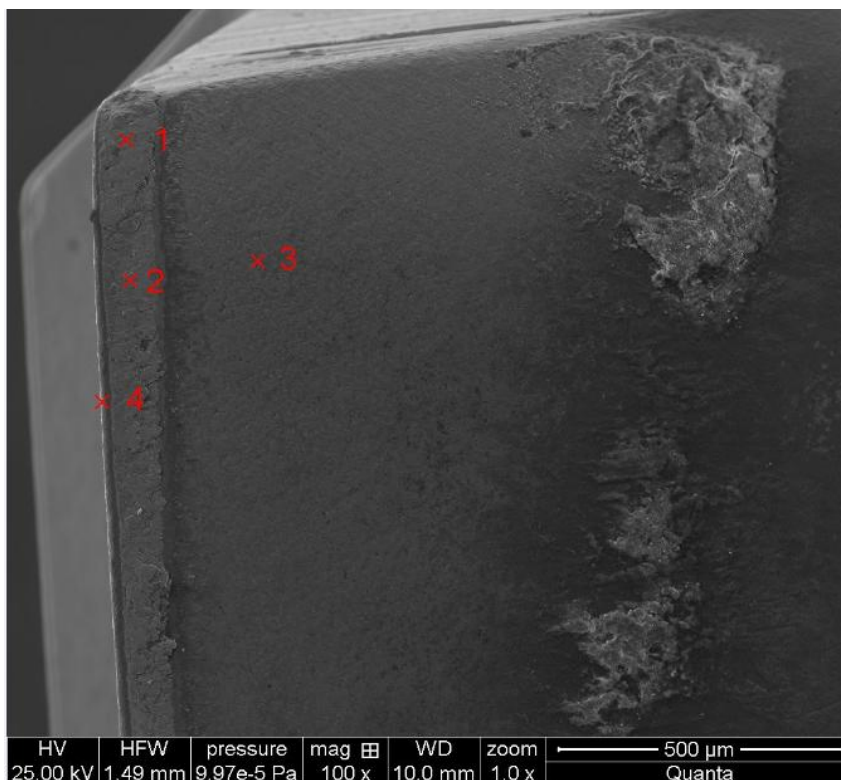


Figura 3.30 – Vista da aresta de corte do inserto

(v_c 110m/min – fz0,30mm – 6 insertos – Metal Duro) com 40 peças usinadas

A análise de EDS dos quatro pontos indicados na figura 3.30 está mostrada na figura 3.31. Nos pontos 1 e 2, constata-se a presença de alta concentração de ferro presente na peça/cavaco, indicando que o processo de adesão na ferramenta já era bastante acentuado. Mesmo assim, ainda havia uma parte da porção desgastada em que o desgaste não havia se aprofundado na ferramenta e, assim, a cobertura ainda estava presente (ponto 4, que tem forte concentração de Ti e Al da cobertura). No ponto 3, que está fora da região desgastada, apresenta logicamente somente elementos da cobertura.

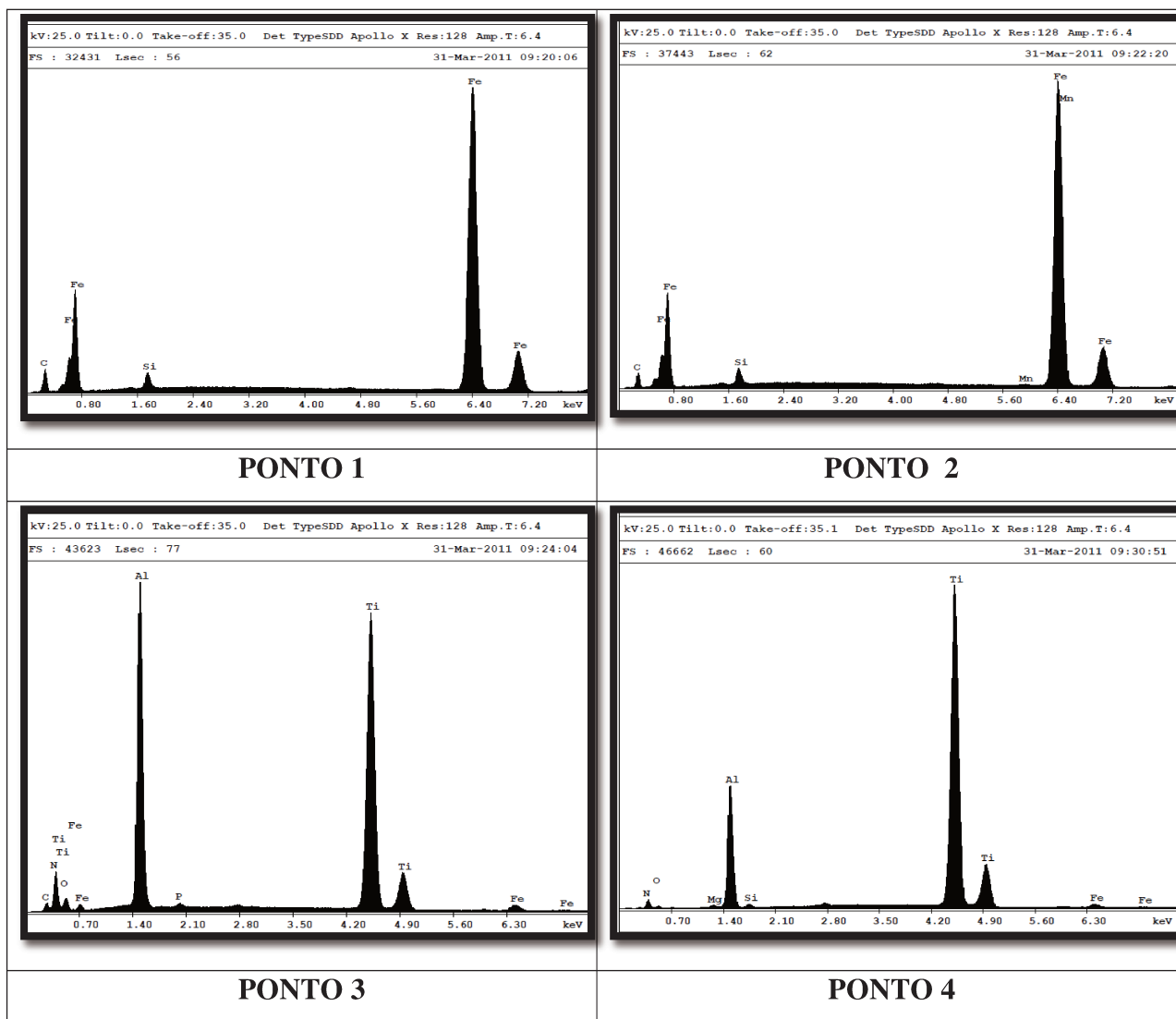


Figura 3.31 – Elementos químicos encontrado no inserto de M.D., a uma v_c 110m/min, Avanço por dente de 0,30mm e 40 peças usinadas

Após a análise destas figuras, pode-se tentar definir quais foram os mecanismos de desgaste da ferramenta ao longo de sua vida. Com 10 peças usinadas a adesão ainda não está presente. Algum outro mecanismo de desgaste (provavelmente a difusão, dada a aparência lisa da região desgastada, típica do desgaste difusivo, sem a presença de riscos paralelos à direção de corte, típicos da abrasão) foi o responsável pela remoção da camada de cobertura (já se vê pontos com o substrato exposto na figura 3.31) que gerava o aumento do coeficiente de atrito e propiciava a adesão do material da peça/cavaco. A presença de algum desgaste também facilitou a extrusão deste material entre peça e ferramenta para que a adesão fosse possível. A partir disto, a adesão começou a crescer

gradualmente. Com 20 peças usinadas já se tinha mais presença de Fe oriundo da peça na ferramenta e também porções com o substrato exposto (W mostrado na análise EDS) e, a partir da peça 30, a adesão estava bastante presente, tornando-se o principal mecanismo de desgaste, que conduziu a ferramenta a valores alto de desgaste.

3.6. Análise do tempo pelo volume de cavaco removido

A figura 3.32 mostra a vida da ferramenta para cada experimento realizado no qual fica caracterizado que menores velocidades de corte e material de metal duro são os mais indicados para o processo de mandrilamento em desbaste dos mancais de um bloco do motor fabricado em ferro fundido vermicular. Vê-se nesta figura que o uso de inserto com material de cerâmica à base de nitreto de silício não se mostrou adequado para este tipo de operação. Vê-se também que os avanços por dente utilizados no experimento mantiveram a mesma vida de ferramenta.

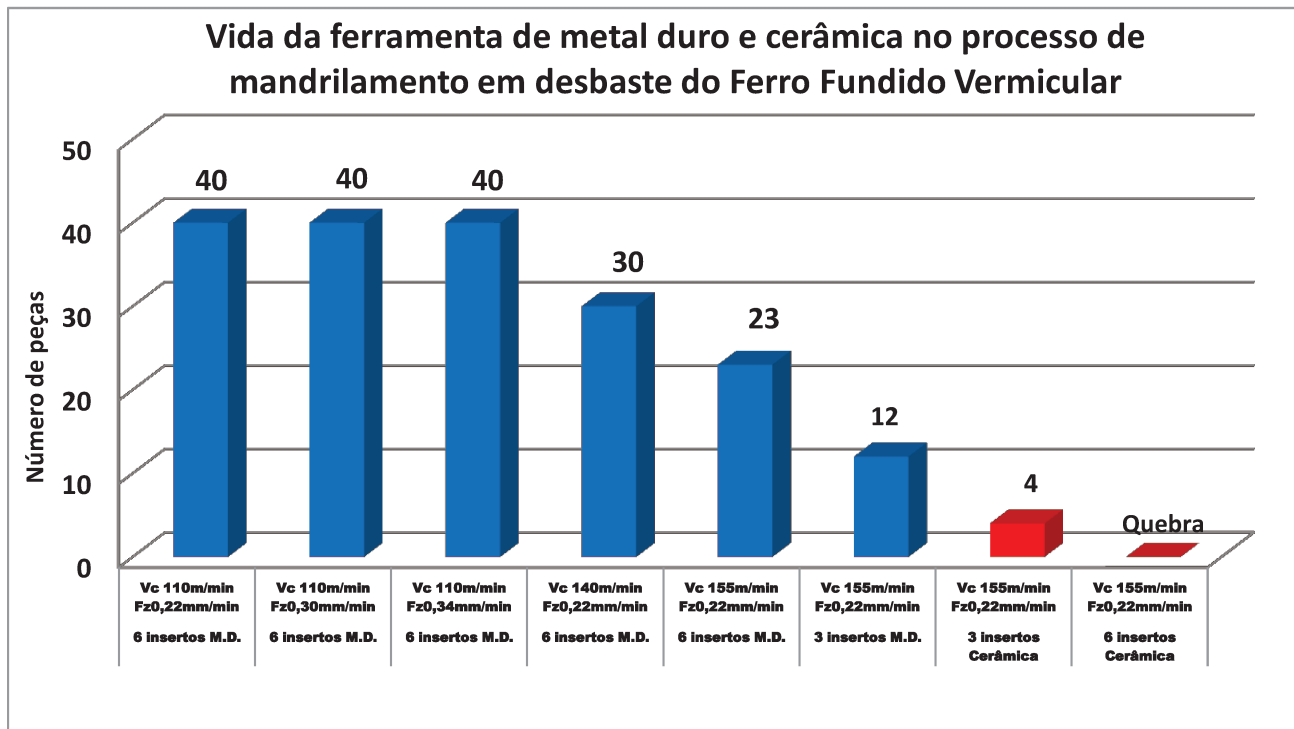


Figura 3.32 – Gráfico da quantidade de peças produzidas por variável nos experimentos

Para se ter uma idéia de qual foram as melhores condições de usinagem dentre as que foram testadas neste trabalho e, conseqüentemente, escolher o conjunto de condições a serem utilizadas no

meio produtivo, construiu-se a figura 3.33. Na construção desta figura, os experimentos em que se utilizou ferramentas cerâmicas não foram levados em consideração, já que o desempenho destas ferramentas não foi razoável. Os ensaios em que se utilizou avanço por dente de 0,22 mm e se variou a velocidade de corte, se a máquina utilizada nesta operação não for gargalo (isto é, o tempo da operação não é importante), a condição a ser utilizada é aquela com velocidade de corte de 110m/min, já que ela propicia economia de ferramenta. Se a máquina for gargalo, há que se calcular a velocidade de máxima produção (v_{cmxp}) para este avanço a fim de se escolher a velocidade a ser utilizada. Diniz et al (2008) definem v_{cmxp} de acordo com a equação 3.2.

$$v_{cmxp} = \left(\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}} \right)^{1/x} \quad (3.2)$$

Onde K e x são os expoentes da equação de vida da ferramenta de Taylor ($T \cdot v_c^x = K$), t_{ft} é o tempo de troca da ferramenta e T é a vida da ferramenta em minutos.

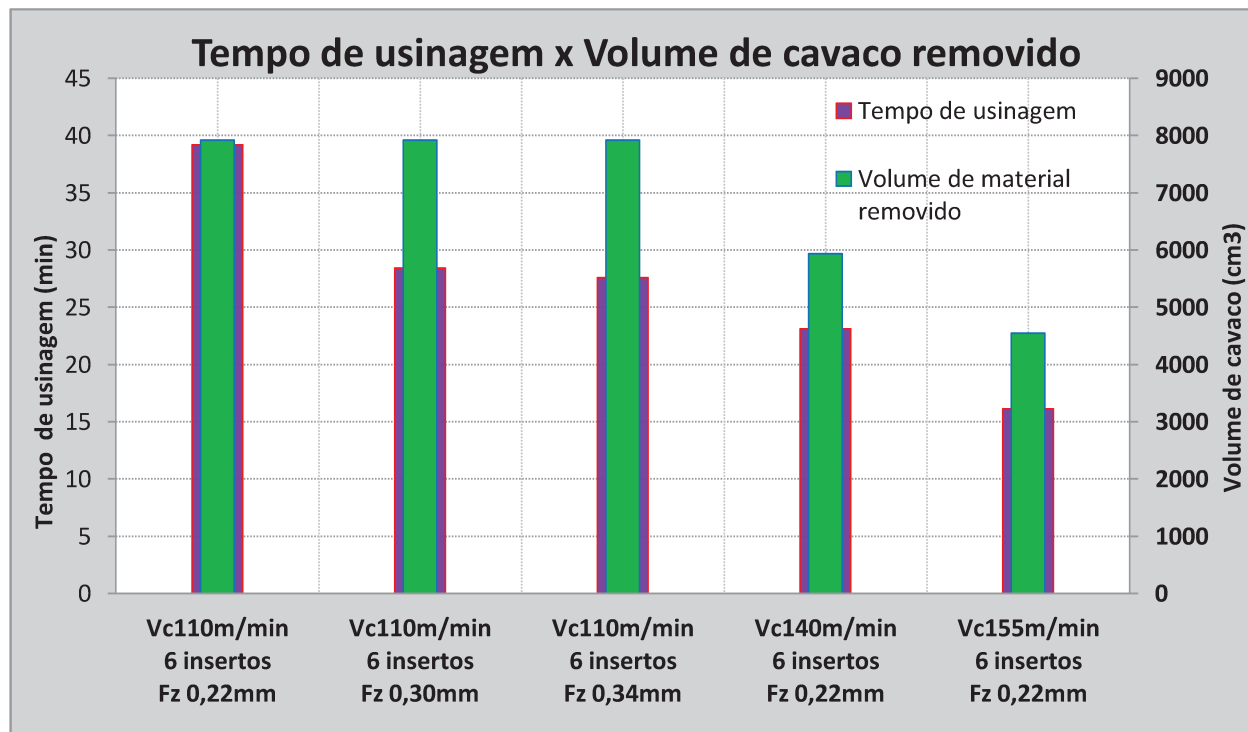


Figura 3.33 – Gráfico de tempo de usinagem x volume de cavaco removido

Utilizando-se os dados de vida de ferramenta obtidos nos ensaios com as 3 velocidades de corte utilizadas neste trabalho, tem-se que x e K são, respectivamente, 2,6 e $7,9 \times 10^6$. Com isto, considerando-se um tempo de troca das ferramentas de 2 minutos, tem-se que a velocidade de máxima produção é 289,5 m/min. Assim, em uma máquina gargalo utilizando-se o avanço por dente

de 0,22 mm, dentre as velocidades utilizadas nos ensaios seria interessante utilizar-se a velocidade de 155 m/min, já que a usinagem com este valor de v_c , apesar de consumir mais ferramentas, propicia menor tempo de produção por peça (já que ela a maior velocidade dentre as utilizadas que ainda é menor que v_{cmax}).

Como visto, o uso de maiores avanços não gerou diminuição da vida da ferramenta. Assim, como se está em operação de desbaste (a rugosidade da peça não é importante) é interessante utilizar-se o maior avanço possível. Dentre os utilizados neste trabalho, seria adequado se utilizar $f_z = 0,34$ mm, pois com ele consegue-se um corte mais rápido sem ainda se ter quebra da aresta de corte. Seria importante também se obter a velocidade de máxima produção com este avanço, a fim de se saber a velocidade a ser utilizada se a máquina for gargalo. Esta é uma outra sugestão para um futuro trabalho.

4. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve por objetivo analisar as condições de usinagem e encontrar influências positivas no processo de mandrilamento em desbaste dos mancais de um bloco de motor, fabricado em ferro fundido vermicular.

Por meio dos resultados obtidos nas condições experimentadas, pode-se concluir que:

- ❖ Quanto maior a velocidade de corte, menor a vida final da ferramenta;
- ❖ A utilização de um maior número de insertos na ferramenta proporcionou maior vida, tanto em termos de tempo de usinagem, quanto em termos de volume de material removido;
- ❖ Insertos de cerâmica com nitreto de silício não são indicados para o mandrilamento em desbaste do ferro fundido vermicular;
- ❖ A alteração da velocidade de avanço não influencia na vida da ferramenta;
- ❖ Após definir a melhor velocidade de corte, a velocidade de avanço foi limitada pela potência consumida do fuso e não pelo desgaste das arestas dos insertos;
- ❖ A melhor condição de corte foi velocidade de corte de 110m/min, avanço por dente de 0,34mm e seis insertos de metal duro montados simultaneamente.
- ❖ O principal mecanismo de desgaste de flanco das pastilhas de metal duro foi o “*attrition*”. Porém, para que a adesão de material da peça/cavaco sobre a superfície de folga pudesse acontecer, foi necessário que, inicialmente, algum outro mecanismo (provavelmente a difusão) gerasse o desgaste da ferramenta.

Sugestões para próximos trabalhos

As informações descritas prevêm possibilidades das variações, sabendo-se que

o laboratório utilizado neste trabalho não as permitiu.

- Utilização de maiores velocidades de corte conjuntamente com maiores avanços por dente;
- Utilização de outros materiais de ferramentas. O CBN seria uma opção a ser testada;
- Variação das alturas das pastilhas, tanto na direção axial quanto na direção radial;
- Verificar se é possível aumentar ainda mais o número de arestas da ferramenta, para propiciar ainda maior produção.

5. REFERÊNCIAS

BALDACIM, Sandro A. **Desenvolvimento, Processamento e Caracterização de Compósitos Cerâmicos Si_3N_4 – $\text{SiC}_{(w)}$** . 2000. 170p. Tese (Doutorado). Departamento de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo.

BELONI, A.L. **Metodologia via redes neurais para estimativa da rugosidade e do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento frontal**. 2001. 194p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.

BRAUN, Silvana; Appel, L.G.; Schmal, M. **A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas a diesel - a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras**. Química Nova, Vol. 27, No. 3, 472-482, 2003.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos. Características Gerais, Tratamento Térmico, Principais Tipos**. 7ª Edição ampliada e revisada, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2005.

CONSALTER, L.; GUEDES, L.; PUREY, J.; - Usinabilidade de ferros fundidos. **FMP Guia de Equipamentos e Insumos**. 1987.

DAWSON, S.; **Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design. SinterCast - Technical Publication**. 1999.

DAWSON, S.; HOLLINGER, I.; ROBBINS, H.; DAETH, J.; REUTER, U.; SCHULZ, H. The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron. **SAE World Congress**, 2001.

DAWSON, S. **Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron. AFS Casting Congress**. 2002.

DAWSON, S.; SCHROEDER, T. Practical Applications for Compacted Graphite Iron. **AFS Transactions**. 2004.

DAWSON, S.; Compacted Graphite Iron – A New Material for Highly Stressed Cylinder Blocks and Cylinder Heads. **Internationales Wiener Motorensymposium**, 2007.

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

DORÉ, C.; BOEHS, L.; GUESSER, L. W. Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular com Diferentes Microestruturas. **8th Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica**. 2007.

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

FERRER, Jorge A. G.. **Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento**. 2006. 228p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

FERRER, Jorge A. G.; DINIZ, A. E.. Otimização do fresamento frontal de diversas superfícies de ferro fundido cinzento. **Anais do III Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF**, Vol. 1, pp.1 –1, Joinville, Santa Catarina, 2005.

GABALDO, Sander. **Uma Contribuição a Melhoria do Processo de Fresamento de Ferro Fundido Vermicular – CGI**. 2009. 136p. Tese (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

GODINHO, A.F. **Análise do Mandrilamento de cilindros de bloco de motores em Ferro Fundido Vermicular com diferentes concepções de ferramentas.** 2007. 128p. Tese (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

GUEDES, Luiz F. M. . FENG/PUCRS. **Processo de usinagem e conformação.** 2006

KASSACK, J. ; REUTER, U. AUDI CGI Production Planning. **In: 5th COMPACTED GRAPHITE IRON MACHINING WORKSHOP. Technische Universitat Darmstadt.** 2002.

KOPPKA, Frank; ABELE, Eberhard. Economical processing of compacted graphite iron. **6th COMPACTED GRAPHITE IRON MACHINING WORKSHOP. Technische Universitat Darmstadt.** 2003.

GUESSER, L. W.; SCHROEDER, T.; DAWSON, S. Production experience with compacted graphite iron automotive components. **AFS Transactions 01-071**, 2001.

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.

MAKINO. Disponível em <[competitiveproduction.com /features /default. aspx? article](http://competitiveproduction.com/features/default.aspx?article)> . Acesso em Janeiro de 2011.

MAPAL do BRASIL. Disponível em <Mapal.com/en/products/catalogues-and-brochures>. Acesso em Dezembro de 2010.

MARWANGA, R. O. ; VOIGT, R. C. ; COHEN, P. H. Influence of Graphite Morphology and Matrix Structure on Chip Formation During Machining of Gray Irons. **AFS Transactions: American Foundrysmen Society.** 1999.

MOCELLIN, Fabiano. **Desenvolvimento de Tecnologia para Brunimento de Cilindros de Blocos de Motores em Ferro Fundido Vermicular**. Tese 2007. 264p. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

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

MOURA, Bruna S.. **Transesterificação Alcalina de Óleos Vegetais para Produção de Biodiesel: Avaliação Técnica e Econômica**. Dissertação 2010. 166p. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

NICOLELLA, Gilberto; Marques J.F.; Skorupa, L. A. Sistema de Gestão Ambiental: aspectos teóricos e análise de um conjunto de empresas. **ISSN 1516-4691 Documento 39. Embrapa Meio Ambiente**. 43p. Jaguariúna, SP. 2004.

REUTER, U., SCHULZ, H. Compact and bijou: The problems associated with compacted graphite iron manufacturing can be overcome. **Engine Technology International**. 1999.

REUTER, U.; SAHM, A.; SCHULZ, H. CGI production on transfer lines and machining centers. **Compacted Graphite Iron Machining Workshop**. 2000.

SAHM, A.; ABELE, E.; SCHULZ, H. State of the art in CGI machining. **5th Compacted Graphite Iron Machining Workshop**. 2002

SINTERCAST. Compacted Graphite Iron. **Technical Publication**. What is CGI? Disponível em: <<http://www.sintercast.com/Tecnology>> Acesso em: março de 2010

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

SOUTO, Ulisses B. , **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica**. Tese 2007. Pag19. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia.

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

VASILASH, Gary S. Automotive Design & Production. **Gardner Publication**. 2006.

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

XAVIER, Fabio A.. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal Duro, Cerâmica e CBN**. 2003. 146p. Tese (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

XAVIER, Fabio A.. **Estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício aplicadas no torneamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento**. 2009. 267p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

YUSSEFIAN, N.Z., MOETAKEF-IMANI, B. The prediction of cutting force for boring process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 2008.