

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO
VERMICULAR COM FERRAMENTAS DE METAL-DURO, CERÂMICA E CBN

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

FÁBIO ANTÔNIO XAVIER

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2003.

ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO
VERMICULAR COM FERRAMENTAS DE METAL-DURO, CERÂMICA E CBN

FÁBIO ANTÔNIO XAVIER

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA DE MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FABRICAÇÃO

E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.
Orientador

Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Prof. Wilson Luiz Guessser, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Lourival Boehs, pela oportunidade, orientação, colaboração e companheirismo;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização do trabalho;

À CAPES, pelo apoio financeiro;

À Empresa Tupy Fundições, pela doação dos materiais fundidos, máquinas, materiais bibliográfico e apoio dos Funcionários;

Aos colaboradores da Tupy Fundições, que participaram diretamente do desenvolvimento da pesquisa, em especial ao Eng. Cássio Luiz de Andrade, Eng. Carlos de Souza Cabezas, M. Eng, ao Eng. Paulo Yves, Murilo Lemke, Silvio Borba e ao Dr. Wilson Luiz Guessser;

Aos colegas e amigos do Laboratório do Grucon, em especial ao Eng. Fabiano Mocellin, M.Sc., ao Eng. Delmonte Nunes Friedrich, ao Eng. Luiz Carlos De Cesaro Cavaler, pelo apoio e companheirismo;

Aos colegas e amigos do Usicon, Eng. Fernando Souza Pereira, Sérgio Ari dos Santos, Tomaz Monteiro Fidélis Neto, Valtair Fabriciano Garcez e Joe Schmitz;

Aos membros dos laboratórios do LMP e Labmat pela disponibilização dos equipamentos e informações;

Aos Familiares, à noiva, parentes e amigos, pela compreensão e apoio incondicionais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	06
LISTA DE TABELAS.....	12
SIMBOLOGIA.....	13
RESUMO.....	15
ABSTRACT.....	16
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA.....	19
2.1 Objetivo.....	19
2.1.1 Objetivo geral.....	19
2.1.2 Objetivos específicos.....	19
2.2 Justificativa.....	19
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1 Fabricação do ferro fundido vermicular (CGI).....	21
3.2 Propriedades físicas e mecânicas do vermicular.....	23
3.3 O processo de torneamento.....	26
3.3.1 O processo de corte.....	26
3.3.2 Ferramenta de corte de geometria definida.....	28
3.4 Materiais para ferramentas de corte.....	30
3.4.1 Metal-duro.....	32
3.4.2 Cerâmica.....	35
3.4.3 CBN.....	36
3.5 Desgaste das ferramentas de corte.....	37
3.6 Tecnologia de superfície.....	39
3.6.1 Rugosidade da superfície.....	40
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – USINAGEM DO CGI.....	42
4.1 Melhorias do CGI por fatores metalúrgicos.....	44
4.1.1 Efeito da forma da grafita.....	45
4.1.2 Tipo de perlita.....	45

4.1.3	Proporção de perlita/ferrita.....	47
4.1.4	Efeito dos estabilizadores de perlita.....	49
4.1.5	Efeito do silício.....	51
4.1.6	Efeito do enxofre.....	52
4.1.7	Efeito das inclusões.....	53
4.1.8	Efeito do titânio e do cromo.....	54
4.2	Desenvolvimento dos materiais das ferramentas.....	55
4.2.1	Usinagem com ferramenta de metal-duro.....	57
4.2.2	Usinagem com ferramenta de CBN.....	63
4.2.3	Usinagem com ferramentas de cerâmica.....	66
4.3	Melhoria das técnicas de usinagem.....	68
4.3.1	Usinagem com insertos múltiplos.....	68
4.3.2	Usinagem com insertos rotativos.....	70
4.3.3	Usinagem com o processo freso-mandrilamento.....	72
4.4	Considerações finais.....	72

5 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....74

5.1	Método utilizado.....	74
5.2	Caracterização do material usinado.....	75
5.2.1	Geometria dos corpos de prova.....	75
5.2.2	Composição química.....	76
5.2.3	Análise microestrutural.....	76
5.2.4	Determinação da dureza.....	78
5.2.5	Determinação da resistência mecânica.....	79
5.3	Caracterização das ferramentas de corte.....	79
5.3.1	Ferramentas de metal-duro.....	80
5.3.2	Ferramentas de cerâmica.....	81
5.3.3	Ferramentas de CBN.....	82
5.4	Critério de fim de vida das ferramentas.....	82
5.5	Ensaio de usinagem.....	83
5.5.1	Parâmetros de corte utilizados.....	84
5.5.2	Fixação da peça.....	85
5.5.3	Fixação da ferramenta.....	85

5.5.4 Máquina-ferramenta.....	86
5.5.5 Medição do desgaste das ferramentas.....	86
5.5.6 Aquisição de fotos.....	87
5.5.7 Medição da rugosidade.....	87
5.5.8 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	88
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	89
6.1 Ferramenta de metal-duro.....	89
6.1.1 Ferramenta MD-A.....	89
6.1.2 Ferramenta MD-B.....	95
6.1.3 Comparação entre as ferramentas MD-A e MD-B.....	100
6.1.4 Qualidade da superfície gerada.....	103
6.2 Ferramentas cerâmicas.....	105
6.2.1 Ferramenta CR-A.....	105
6.2.2 Ferramenta CR-B.....	108
6.2.3 Comparação entre as ferramentas CR-A e CR-B.....	113
6.2.4 Análise química das ferramentas cerâmicas.....	115
6.2.5 Qualidade da superfície gerada.....	116
6.3 Ferramentas de CBN.....	118
6.3.1 Ferramenta CB-A.....	118
6.3.2 Ferramenta CB-B.....	121
6.3.3 Comparação entre as ferramentas CB-A e CB-B.....	124
6.3.4 Análise química das ferramentas de CBN.....	125
6.3.5 Qualidade da superfície gerada.....	128
6.4 Análise econômica.....	129
6.5 Comparação geral.....	132
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	135
7.1 Conclusões.....	135
7.2 Proposições para novos trabalhos.....	137
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139

LISTA DE FIGURAS

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – ASPECTOS GERAIS

Figura 3.1: Micrografia óptica do ferro fundido vermicular atacada com nital (ASM, 1996).....	21
Figura 3.2: Curva S – Percentual de nodularidade em função da porcentagem de Mg (Segeant, 1978; Dawson, 1994).....	22
Figura 3.3: Forma espacial dos tipos de grafitas dos ferros fundidos. (a) Ferro fundido cinzento. (b) Ferro fundido vermicular. c) Ferro fundido nodular.....	24
Figura 3.4: Ilustração do torneamento longitudinal (CIMM, 2002).....	26
Figura 3.5: Formação do cavaco no ferro fundido (Cohen, 2000).....	27
Figura 3.6: Partes de uma ferramenta de geometria definida (CIMM, 2002).....	28
Figura 3.7: Representação do ângulo de incidência, de cunha e de saída no plano ortogonal (CIMM, 2002).....	30
Figura 3.8: Ângulos da ferramenta no plano de referência (CIMM, 2002).....	30
Figura 3.9: Microestrutura básica de um metal-duro (CIMM, 2000).....	32
Figura 3.10: a) Revestimento de TiC/TiCN/TiN aplicado em uma ferramenta de metal duro (Edwards, 1993). b) Revestimento de TiAlN monocamada aplicado sobre o metal-duro (Prengel et al., 2001).....	34
Figura 3.11: Revestimento de TiAlN multicamada sobre metal-duro (Prengel et al., 2001).....	35
Figura 3.12: Mecanismos de desgaste que atuam em ferramentas de usinagem (König, 1987).....	38
Figura 3.13: Ferramenta com desgaste de flanco e cratera (König, 1997).....	39

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – USINAGEM DO CGI

Figura 4.1: Comparação entre a usinabilidade do ferro fundido cinzento e vermicular em operações de usinagem em linhas “ <i>transfer</i> ” (Reuter et al., 2000).....	43
Figura 4.2: Variações químicas e microestruturais que pode influenciar na usinagem do ferro fundido vermicular.....	44

Figura 4.3: Redução da vida da ferramenta com o aumento da quantidade de cementita na fase de perlita no ferro fundido cinzento (Bates, 1996).....	46.
Figura 4.4: Resultado de usinabilidade variando os tempos de desmoldagem das ligas de vermicular (Mocellin, 2002a).....	47
Figura 4.5: Vida da ferramenta em função da quantidade de perlita / ferrita na usinagem de vermicular: (a) ferramenta de metal-duro; (b) ferramenta CBN (Dawson et al. 1999).....	48
Figura 4.6: Efeito do aumento da proporção de silício: (a) e (b) 100%, devido à adição do manganês; (c) e (d) 99%, devido ao Sb e Cu (Dawson et al., 1999)...	50
Figura 4.7: Vida da ferramenta em função da quantidade de Cu na liga mantendo o mesmo tempo de desmoldagem (Mocellin, 2002a).....	51
Figura 4.8: Efeito do teor de silício do CGI na vida da ferramenta no torneamento (Dawson, et al., 1999).....	52
Figura 4.9: Ferramenta de metal-duro durante o torneamento do CGI variando a percentagem de titânico na liga (Dawson, et al., 1999; Guessser, 2001).....	55
Figura 4.10: Vida das ferramentas para corte contínuo do ferro fundido vermicular perlítico (Phillips, 1982).....	56
Figura 4.11: Teste de torneamento em vermicular (alta e baixa proporção de perlita) comparado com cinzento (Reuter et al., 2000; Gastel et al., 2000).....	57
Figura 4.12: Comparação dos tipos de ferramentas em velocidades diferentes usinando diferentes ligas de ferro fundido (Reuter, et al., 2000).....	58
Figura 4.13: Percurso de corte em quilômetros obtidos com diferentes tipos de metal-duro variando a velocidade de corte (Leuze, 2000).....	59
Figura 4.14: Desgaste de quina para diferentes tipos de metal-duro revestidos na operação de torneamento(Bormmann, 2000).....	60
Figura 4.15: Desgaste de quina para diferentes tipos de metal-duro revestidos na operação de torneamento com velocidade de corte baixa (Bormmann, 2000)....	60
Figura 4.16: Tempo de vida para diferentes tipos de ferramentas de metal-duro variando a velocidade de corte e o percentual de titânio (Bormann, 2000).....	61
Figura 4.17: Comparação da média de desgaste de flanco VB (Werthein, 2002).....	63
Figura 4.18: Comparação da média dos valores de rugosidade R_z	63
Figura 4.19: Formação do TiO_2 por oxidação (Reuter et al.,2000).....	65

Figura 4.20: (a) Formação da camada protetora de MnS sobre inserto de PCBN na usinagem do ferro fundido cinzento; (b) ausência da camada protetora na usinagem do ferro fundido vermicular (Reuter et al., 2000).....	65
Figura 4.21: Percurso de corte obtido no torneamento de CGI utilizando diferentes tipos de cerâmicas com diferentes velocidades de corte (Leuze,2000).....	66
Figura 4.22: Comprimento de corte para ferramentas cerâmicas no torneamento do CGI (Reuter et al., 2000).....	67
Figura 4.23: Comprimento de corte para ferramentas cerâmicas no fresamento do CGI (Reuter et al., 2000).....	67
Figura 4.24: Desgaste de flanco após 64 cilindros usinados por ferramenta com um inserto (Kress, 2000).....	69
Figura 4.25: Desgaste de flanco no mandrilamento com duas pastilhas de metal-duro (Kress, 2000).....	69
Figura 4.26: Ferramentas de mandrilamento com insertos múltiplos de diferentes fabricantes.....	70
Figura 4.27: Ferramenta com insertos rotativos Rotary Technologies: (a) Desbaste (b) Acabamento (Reuter et al., 2000).....	71

5 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Figura 5.1: Geometria dos corpos de prova utilizados.....	75
Figura 5.2: Microscópio e microcomputador utilizados para análise microestrutural do CGI.....	77
Figura 5.3: Micrografia do ferro fundido vermicular: a) sem ataque de nital 2% 100x e b) Micrografia do ferro fundido vermicular com ataque de nital 2% 100x.....	77
Figura 5.4: Perlita do ferro fundido vermicular MEV 5.000x nital 2%.....	78
Figura 5.5: Esquema dos raios das ferramentas: Ferramenta MD-A com quina alisadora; Ferramenta MD-B com raio convencional.....	80
Figura 5.6: Esquema do revestimento aplicado na ferramenta de metal-duro. a) Ferramenta MD-A. b) Ferramenta MD-B.....	81
Figura 5.7: Insertos de metal-duro utilizados na usinagem do ferro fundido vermicular: Ferramenta MD-A (a) e Ferramenta MD-B (b).....	81
Figura 5.8: Ferramenta cerâmica.....	82

Figura 5.9: Ferramentas de CBN: Ferramenta CB-A (a); Ferramenta CB-B (b).....	82
Figura 5.10: Critério de fim de vida: Marca de desgaste no flanco da ferramenta.....	83
Figura 5.11: Ensaios de desgaste realizados.....	84
Figura 5.12: Sistema de fixação dos corpos de prova.....	85
Figura 5.13: Ferramenta montada no suporte e fixada no torno.....	86
Figura 5.14: Torno Okuma utilizado na realização dos ensaios de torneamento.....	86
Figura 5.15: Lupa de ferramentaria para medição do desgaste VB_{max}	87
Figura 5.16: Sistema utilizado para aquisição de imagens das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de torneamento.....	87
Figura 5.17: Rugosímetro utilizado para aquisição dos valores de rugosidade R_z	88
Figura 5.18: Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	88

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 6.1: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, com velocidade de corte de 160 m/min.....	90
Figura 6.2: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-A na condição 1.....	91
Figura 6.3: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, com velocidade de corte de 180 m/min.....	92
Figura 6.4: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-A na condição 2.....	92
Figura 6.5: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, com velocidade de corte de 200 m/min.....	93
Figura 6.6: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-A na condição 3.....	94
Figura 6.7: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, para as velocidades de corte de 160; 180 e 200 m/min.....	94
Figura 6.8: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-B, com velocidade de corte de 160 m/min.....	95
Figura 6.9: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-B na velocidade de corte de 160 m/min.....	96
Figura 6.10: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-B, com velocidade de corte de 180 m/min.....	97
Figura 6.11: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-B na velocidade de corte de 180 m/min.....	97

Figura 6.12: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-B, com velocidade de corte de 200 m/min.....	98
Figura 6.13: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-B na velocidade de corte de 200 m/min.....	99
Figura 6.14: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-B, para as velocidade de corte de 160; 180 e 200 m/min.....	99
Figura 6.15: Comparação dos tempos de vida de MD-A e MD-B.....	101
Figura 6.16: Curva de vida para as ferramentas MD-A e MD-B.....	102
Figura 6.17: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas MD-A e MD-B, na velocidade de corte de 160 m/min.....	103
Figura 6.18: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas MD-A e MD-B, na velocidade de corte de 180 m/min.....	104
Figura 6.19: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas MD-A e MD-B, na velocidade de corte de 200 m/min.....	104
Figura 6.20: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-A, com velocidade de corte de 500 m/min.....	106
Figura 6.21: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-A na condição 1.....	106
Figura 6.22: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-A, com velocidade de corte de 350 m/min.....	107
Figura 6.23: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-A na condição 2	107
Figura 6.24: Comparação entre as curvas de desgaste da ferramenta CR-A.....	108
Figura 6.25: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-B, com velocidade de corte de 500 m/min.....	109
Figura 6.26: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-B na condição 1.....	110
Figura 6.27: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-B, com velocidade de corte de 350 m/min.....	110
Figura 6.28: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-B na condição 2.....	111
Figura 6.29: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-B, com velocidade de corte de 200 m/min.....	112
Figura 6.30: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-B na condição 3.....	112
Figura 6.31: Comparação entre as curvas de desgaste da ferramenta CR-B.....	113
Figura 6.32: Comparação dos tempos de vida obtidos entre as ferramentas de CR-A e CR-B.....	114
Figura 6.33: Curva de vida para as ferramentas CR-A e CR-B.....	114

Figura 6.34: Espectro da análise química: a) Ferramenta CR-A na condição 1; b) Ferramenta CR-B na condição 1.....	116
Figura 6.35: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas CR-A e CR-B, na velocidade de corte de 500 m/min.....	117
Figura 6.36: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas CR-A e CR-B, na velocidade de corte de 350 m/min.....	117
Figura 6.37: Comportamento do desgaste da ferramenta CB-A, com velocidade de corte de 700 m/min.....	118
Figura 6.38: Caracterização do desgaste da ferramenta CB-A na condição 1.....	119
Figura 6.39: Comportamento do desgaste da ferramenta CB-A, com velocidade de corte de 550 m/min.....	120
Figura 6.40: Caracterização do desgaste da ferramenta CB-A na condição 2.....	120
Figura 6.41: Comparação entre as curvas de desgaste da ferramenta CB-A.....	121
Figura 6.42: Comportamento do desgaste da ferramenta CB-B, com velocidade de corte de 700 m/min.....	122
Figura 6.43: Caracterização do desgaste da ferramenta CB-B na condição 1.....	122
Figura 6.44: Comportamento do desgaste da ferramenta CB-B, com velocidade de corte de 550 m/min.....	123
Figura 6.45: Caracterização do desgaste da ferramenta CB-B na condição 2.....	124
Figura 6.46: Comparação entre as curvas de desgaste da ferramenta CB-B.....	124
Figura 6.47: Comparação dos tempos de vida obtidos entre as ferramentas de CB-A e CB-B.....	125
Figura 6.48: Espectro da análise química: a) Ferramenta CB-A na condição 1; b) Ferramenta CB-A na condição 2.....	126
Figura 6.49: Espectro da análise química: a) Ferramenta CB-B na condição 1; b) Ferramenta CB-B na condição 2.....	126
Figura 6.50: Espectro da análise química: a) corpo de prova para a ferramenta CB-A na condição 1; b) corpo de prova para a ferramenta CB-B na condição 1.....	127
Figura 6.51: Curvas de rugosidade R_z para CB-A e CB-B, na V_c de 700 m/min.....	128
Figura 6.52: Curvas de rugosidade R_z para CB-A e CB-B, na V_c de 550 m/min.....	128
Figura 6.53: Caracterização da textura da superfície: a) textura gerada pela ferramenta MD-A; b) textura gerada pela ferramenta MD-B.....	129
Figura 6.54: comparação entre as ferramentas dos fabricantes A e B, utilizando metal-duro, cerâmica e CBN em diferentes condições de corte.....	134

LISTA DE TABELAS

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – ASPECTOS GERAIS

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular comparado com o cinzento e nodular (Technical Articles, 2000; ASM, 1996;; Guessser, 1997; Hick, 2000).....	25
---	----

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – USINAGEM DO CGI

Tabela 4.1: Parâmetros de usinagem para o CBN e metal-duro nos testes de fresamento e torneamento.....	48
Tabela 4.2: Especificação do substrato do metal-duro, geometria, tipo de revestimento, espessura do revestimento e chanfro/raio da ferramenta.....	62
Tabela 4.3: Composição dos corpos de prova em porcentagem.....	62

5 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Tabela 5.1: Composição química do ferro fundido vermicular.....	76
Tabela 5.2: Caracterização do material através da análise de imagens.....	77
Tabela 5.3: Dureza Brinell média dos corpos de prova.....	79
Tabela 5.4: Resistência mecânica do material usinado.....	79
Tabela 5.5: Esquema de codificação de ferramentas.....	79
Tabela 5.6: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.....	85

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 6.1: Cálculo das constantes da equação de Taylor.....	102
Tabela 6.2: Cálculo das constantes da equação de Taylor para as ferramentas cerâmicas.....	115
Tabela 6.3: Valores para cálculo e resultados da análise econômica da usinagem.....	131

SIMBOLOGIA

α	[Graus]	ângulo de incidência da ferramenta;
α_o	[Graus]	ângulo de incidência da ferramenta no plano ortogonal;
β	[Graus]	ângulo de cunha da ferramenta;
β_o	[Graus]	ângulo de cunha da ferramenta no plano ortogonal;
γ	[Graus]	ângulo de saída de cavaco;
γ_o	[Graus]	ângulo de saída de cavaco no plano ortogonal;
ε	[Graus]	ângulo de quina da ferramenta;
ε_r	[Graus]	ângulo de quina da ferramenta no plano de referência;
κ	[Graus]	ângulo de posição do gume;
κ_r	[Graus]	ângulo de posição do gume principal no plano de referência;
κ'_r	[Graus]	ângulo de posição do gume secundário no plano de referência;
a_p	[mm]	profundidade de corte;
C_{fTV}	[R\$]	custo da ferramenta por gume;
C_p	[R\$/min]	custos relativos a máquinas, juros de capital empatado, custo da área ocupada, entre outros,
C_T		constante que representa a V_c para um $T = 1$ min
C_v		constante que representa a vida T pra uma $V_c = 1$ m/min
d	[mm]	diâmetro usinado;
D	[mm]	diâmetro externo do corpo de prova;
f	[mm]	avanço;
$F_{calc.}$		valor estatístico calculado
F_{cr}		valor estatístico fornecido por tabela;
f_z	[mm]	avanço por gume;
l_f	[mm]	comprimento de usinagem.
K		expoente da equação de Taylor
K_{fe}	[R\$/peça]	custo de vida da ferramenta por peça;
KM	[mm]	afastamento médio da cratera da ferramenta;
KT	[mm]	profundidade da cratera da ferramenta;
L	[mm]	comprimento do corpo de prova;
R^2		coeficiente de correlação
R_a	[μ m]	desvio médio das amplitudes;

R_y	[μm]	altura máxima do perfil de rugosidade;
R_z	[μm]	profundidade média de rugosidade;
SV_α	[mm]	deslocamento do gume no sentido do flanco;
SV_γ	[mm]	deslocamento do gume no sentido da face;
T	[min]	Tempo de vida da ferramenta;
T_{ve}	[min]	vida econômica da ferramenta
t_p	[min]	tempo de corte efetivo por peça.
T_{vmaxpr}	[min]	vida da ferramenta para produção máxima;
V_c	[m/min]	velocidade de corte;
$V_{c\ min}$	[m/min]	velocidade econômica;
VB	[mm]	desgaste de flanco;
VB_{Max}	[mm]	desgaste de flanco máximo;
V_{max}	[m/min]	velocidade de corte para máxima produção

RESUMO

Nos últimos anos, têm se intensificado as pesquisas no aperfeiçoamento dos motores diesel, objetivando aumentar a eficiência energética e reduzir os níveis de emissão de poluentes. Uma das maneiras de aumentar esta eficiência é aumentar os picos de pressão de explosão do combustível na câmara de combustão. O material tradicionalmente utilizado para a fabricação de blocos de motores diesel, ferro fundido cinzento, chegou a um limite de resistência, possibilitando este aumento de pressão somente pelo aumento da espessura das paredes do bloco, o que eleva o peso e, por sua vez, não cumpre com a exigência especificada. Neste contexto, o ferro fundido vermicular ou *Compacted Graphite Iron (CGI)* aparece como um material substituto para tal aplicação, com características de condutividade térmica e amortecimento próximas ao do ferro fundido cinzento, porém, com propriedades mecânicas superiores, possibilitando a fabricação de motores com menor peso, melhor desempenho e redução de poluição ambiental por gases e ruídos. A utilização do CGI apresenta como desvantagem sua pior usinabilidade quando comparado com o ferro fundido cinzento, motivando pesquisas na melhoria de suas ligas, aprimoramento das técnicas de usinagem e desenvolvimento dos materiais das ferramentas, no qual este trabalho está inserido. O objetivo é analisar tecnicamente o desempenho de diferentes tipos de materiais de ferramentas de corte na usinagem do CGI em processo de corte contínuo. Como critérios para análise, foram utilizados o tempo de vida das ferramentas e a qualidade das superfícies usinadas. Foram testadas ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN, sendo que o metal-duro mostrou os melhores resultados em termos de desgaste de ferramentas e acabamento das superfícies usinadas.

Palavras-chave: ferro fundido vermicular, usinagem, ferramentas de corte.

ABSTRACT

In the last few years, the amount of research on the improvement of diesel engines has intensified, aiming at increasing the energy efficiency and reducing the emission levels of pollutants. One means of improving this efficiency is to increase the pressure of the fuel's explosion in the combustion chamber. The material traditionally used for the manufacture of diesel engine blocks, gray cast iron, reached its strength limit, and therefore this pressure increase can be reached only by using thicker block walls, which increases weight and consequently the specified design requirements are not met. In this context, Compacted Graphite Iron (CGI) appears as a substitute material for such application, since it has good thermal conductivity and damping, close to those of the gray cast iron, but with better mechanical properties, enabling the manufacture of engines with lower weight, better performance and reduction of environmental pollution by gases and noise. The disadvantage of using CGI is its worse machinability when compared with gray cast iron, which motivates research on the improvement of its alloys, improvement of machining techniques and development of cutting tool materials, and this is the area that this work considers. The objective is to analyze technically the performance of different types of cutting tool materials when machining CGI under continuous cutting. As analysis criteria, cutting tool life and machined surface quality were used. The materials of the tested tools were: carbide, ceramic and CBN, and it is concluded that carbide showed the best results in terms of tool wear and finishing of the machined surfaces.

Keywords: compacted graphite iron, machining, cutting tools.

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca das corporações por novos mercados, pela redução dos custos e agregação de valor ao produto tem sido acompanhada de soluções compromissadas com a redução da poluição ambiental, como a redução da emissão de poluentes atmosféricos e de ruídos (Wüttemberger, 1994a).

Neste contexto, a indústria automobilística e seus fornecedores vêm buscando cada vez mais melhorar seus processos e produtos, bem como desenvolver novos materiais que permitam alcançar a solução de compromisso entre lucro e baixo impacto ambiental.

Neste desenvolvimento pelo aumento da qualidade dos produtos, o ferro fundido vermicular ou “Compacted Graphite Iron” (CGI) tem se apresentado como um material de uso em potencial na indústria automobilística. A boa resistência à abrasão, resistência mecânica e à fadiga, boa condutividade térmica, facilidade de fundição e homogeneidade de propriedades fazem deste material um forte candidato a substituto do ferro fundido cinzento, na fabricação de blocos de motores diesel e em outras aplicações (ASM, 1996), possibilitando uma maior economia de combustível, redução da emissão de poluentes, do nível de ruído e também pela relação peso do bloco/Hp, menor que a verificada em outros materiais (ASM, 1996; Wüttemberger, 1994b).

Entretanto, a utilização do ferro fundido vermicular limita-se devido a sua dificuldade de ser usinado quando comparado com o ferro fundido cinzento, principalmente em processos de usinagem contínuos como torneamento e mandrilamento, aumentando os custos de fabricação. Estes problemas fizeram com que várias pesquisas fossem desenvolvidas, com a intenção de tornar viável e competitiva a usinagem do vermicular, envolvendo universidades, empresas automobilísticas, indústrias fabricantes de ferramentas, fundições e empresas de usinagem de blocos de motores (Reuter, 1999).

As pesquisas estão divididas em três campos (Dawson et al.; 1999): melhoria do CGI por fatores metalúrgicos; aprimoramento das técnicas de usinagem; e desenvolvimento dos materiais das ferramentas para usinagem.

A Tupy Fundições Ltda, fornecedora de blocos de motores para as principais indústrias automobilísticas, vem desenvolvendo pesquisa na área de ferro fundido vermicular desde 1992 (Guessser, 2001), tendo como primeiros passos o domínio das

etapas do processo de fabricação (fundição-usinagem), o controle do processo e a melhoria da usinabilidade por fatores metalúrgicos.

Agora o momento é de conhecer os fatores relacionados à tecnologia de usinagem, que é importante para que a empresa citada possa competir ainda mais intensamente no mercado global, agregando valor ao seu produto, gerando empregos e aumentando as divisas do nosso país.

A presente pesquisa objetiva analisar tecnicamente a usinagem do CGI com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN, utilizando o processo de torneamento. O trabalho é fruto da parceria de longa data do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC com a Tupy Fundições Ltda. Na presente pesquisa, a empresa forneceu o material para usinar, a máquina-ferramenta, grande quantidade de material bibliográfico e viabilizou uma intensa discussão técnica com seus especialistas. Além disto, estabeleceu uma parceria com duas empresas fabricantes de ferramentas, as quais forneceram os insertos utilizados na pesquisa.

A execução do trabalho consta da avaliação dos tempos de vida das ferramentas e da qualidade das superfícies usinadas, geradas pelos diferentes tipos de ferramentas empregadas. O trabalho também avalia a influência do tipo de revestimento aplicado nas ferramentas de metal-duro, o aumento da velocidade de corte sobre a vida das ferramentas e o raio da ferramenta sobre a rugosidade gerada, fornecendo a conclusão do melhor material de ferramenta para usinar o vermicular, em processo de corte contínuo.

A redação do trabalho está estruturada da seguinte forma: capítulo 1, uma breve explanação geral; no capítulo 2, os objetivos e a justificativa que motivaram a execução do trabalho. No capítulo 3, é mostrada a fundamentação teórica sobre aspectos gerais da usinagem. No capítulo 4, é realizada a fundamentação teórica sobre a usinagem do ferro fundido vermicular. O capítulo 5 trata da metodologia empregada na pesquisa, juntamente com os resultados da caracterização dos materiais e equipamentos utilizados. O capítulo 6 apresenta os resultados e discussões; o capítulo 7 aborda as conclusões e sugestões para trabalhos futuros; e o capítulo 8 apresenta a lista das referências bibliográficas.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo geral

Pesquisar qual o melhor material de ferramenta para usinar o ferro fundido vermicular, no processo de corte contínuo, visando identificar a ferramenta que forneça o maior tempo de vida e a melhor qualidade para a textura da superfície usinada, observando-se a relação destas grandezas com o custo e produtividade.

2.1.2 Objetivos específicos

- Analisar o desempenho entre as ferramentas de metal-duro, cerâmica e de CBN, bem como a diferença entre as ferramentas fornecidas por fabricantes distintos;
- avaliar a influência do aumento da velocidade de corte sobre a vida das ferramentas;
- estudar a influência da geometria da ferramenta na qualidade da textura da superfície; e
- analisar economicamente o desempenho das ferramentas ensaiadas.

2.2 Justificativa

Os problemas causados pelo transporte urbano, principalmente pela emissão de poluentes como o dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (efeito estufa), têm recebido atenção especial de alguns governos e membros da sociedade civil (Würtemberger, 1994a). Estes setores têm realizado pressões políticas na indústria de automotores para desenvolver veículos com maior eficiência energética e menos poluentes, estipulando metas para o consumo de combustível.

Órgãos como “*Corporate Average Fuel Economy*” (Corporação para economia média de combustível) (CAFE), nos Estados Unidos, e “*Europe Union*” (União Européia) estipularam metas de consumo, respectivamente, de 8,56 l/100km e

5,0 l/100 km para os próximos anos (Würtemberger, 1994b).

Novas fontes de energia foram desenvolvidas, dando origem a automóveis movidos a energia solar, elétrica, a gás liquefeito de petróleo (GLP), gás natural (GN), entre outras, mas o fato é que, atualmente, quase todos os veículos utilizam derivado de petróleo como fonte de energia.

Assim, se continuarem os atuais padrões de consumo por carros médios e grandes, por questões de segurança e conforto, os níveis de consumo especificado pela CAFE e EU só serão alcançados com o uso de motores diesel, devido ao fato da sua superior eficiência energética quando comparado com motores a gasolina, gás natural e GLP (Diesel Fórum, 2002).

Portanto, as questões ambientais são o maior impulsionador no desenvolvimento de blocos de motores a diesel em vermicular, pois estes permitem a fabricação de motores a diesel mais rentáveis e limpos.

Estas qualidades do motor são obtidas quando se aumentam os picos de pressão de explosão do combustível (SinterCast, 2002). O material tradicionalmente utilizado para a fabricação de blocos de motores a diesel, o ferro fundido cinzento, chegou a um limite de resistência, possibilitando este aumento de pressão somente pelo aumento da espessura das paredes do bloco, o que eleva o peso e, por sua vez, não cumpre com a exigência especificada (CIMM, 2002).

Como o CGI apresenta características de condutividade térmica e amortecimento próximas ao do ferro fundido cinzento, todavia com propriedades mecânicas superiores, permite fabricar motores com menor peso, melhor desempenho e redução de poluição ambiental por gases e ruídos. A utilização do CGI é restrita em decorrência de sua maior dificuldade em ser usinado em processos de corte contínuo, existindo a necessidade de reduzir os seus custos.

A Tupy Fundições Ltda, empresa brasileira fabricante de componentes automotivos de classe mundial, visualizando as possibilidades de utilização do CGI, há anos vem desenvolvendo tecnologia de fabricação de peças do referido material. Mais recentemente busca desenvolver e aperfeiçoar a usinagem destas peças, para que possa competir ainda mais fortemente no mercado global, agregando mais valor ao seu produto, gerando empregos e aumentando as divisas do nosso país.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA – ASPECTOS GERAIS

O ferro fundido vermicular, também denominado como CGI – “Compacted Graphite Iron”, é conhecido desde a década de 40, quando Morrogh, investigando a produção de ferro fundido nodular pela adição de terras raras (cério e magnésio), obteve a estrutura descrita por ele como “quasi-flake” (quase lamelas), conforme mostra a Figura 3.1 (Altstetter, 197-; Oathout, 1978; Sergeant, 1978).

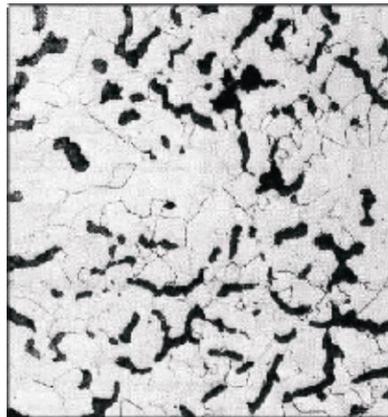


Figura 3.1: Micrografia óptica do ferro fundido vermicular atacada com nital (ASM, 1996).

A definição técnica desta liga é dada pelas normas American Society for Testing Materials (ASTM) A842-85, Japanese Industrial Standards (JIS) G5502 e International Organization for Standardization (ISO) – 945-1975, que classificam a liga pelo tipo e forma da grafita. Mas, de uma maneira geral, pode-se classificar o CGI de alta qualidade como uma liga que apresenta partículas de vermiculos com menos de 20% de nódulos e ausência de grafitas na forma de lamelas (Altstetter, 197-; Monroe, 197-; Dawson, 1993, Sintercast, 1994; Dawson, 1994; Sahm et al., 2002).

3.1 Fabricação do ferro fundido vermicular (CGI)

Nos mais de cinquenta anos decorridos desde a sua descoberta, a comercialização do CGI foi limitada pela falta de habilidade e alto custo em controlar um processo industrial que assegurasse a obtenção da morfologia da sua grafita obtida nos laboratórios de pesquisas.

Muitos métodos foram estudados e desenvolvidos para garantir a obtenção do CGI, mas apenas dois exibiram resultados positivos para utilização em escala industrial (Monroe, 19xx; Altstetter, 197-; Oathout, 1978; Dawson, 1993; Dawson, 1994):

1– Tratamento da liga com elementos nodulizantes (magnésio e cério) e antinodulizantes (titânio);

2– Tratamento da liga com quantidades controladas de elementos que promovem a nodulização da grafita, como o magnésio.

O tratamento da liga com elementos nodulizantes e anti-nodulizantes foi uma melhora significativa na tecnologia da fabricação do CGI, quando, na década de 60, Shelleng relatou que a obtenção do CGI poderia ser realizada pela inibição da formação da grafita esferoidal através da combinação da adição de magnésio e titânio, partindo do princípio de que o primeiro, em alto teor, assegura que a grafita não crescerá na forma lamelar, enquanto que o segundo impede o crescimento da grafita na fórmula de nódulos (Altstetter, 197-; Guesser et al., 2001).

Uma década se passou, e Sergeant (1978) continuou contribuindo significativamente para o entendimento do domínio da fabricação do CGI, concluindo que a estrutura deste poderia ser obtida somente com o controle do magnésio residual (ou o chamado controle da “curva-S”), em que os valores de magnésio na liga devem variar na faixa de 0,015 a 0,020%. Esta quantidade é insuficiente para gerar o ferro fundido nodular e suficiente para assegurar uma faixa estável do CGI. Esta técnica, segundo Sergeant (1978), era tida na época como: “...tão difícil como impraticável o seu controle”. A figura 3.2 ilustra a Curva-S.

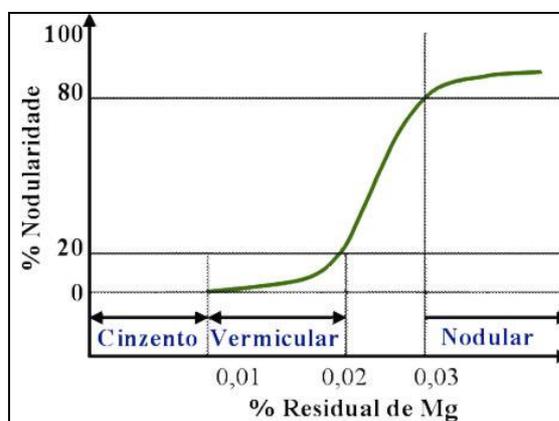


Figura 3.2: Curva S – Percentual de nodularidade em função da porcentagem de Mg (Sergeant, 1978; Dawson, 1994).

Continuando as pesquisas em busca de um melhor entendimento e controle de obtenção do CGI, descobriu-se, posteriormente, que a adição de 0,08 a 0,10% de titânio ampliava os limites da presença de magnésio na curva-S para pelo menos 0,030%, produzindo, assim, uma reprodutibilidade razoável em processos industriais (Altstetter, 19xx; Sergeant, 1978; Evans, 1978).

Esse método aumenta a resistência ao desgaste, mas tem como inconveniente a redução da usinabilidade da liga, uma vez que o titânio tenderá a formar carbonetos e carbonitretos que agirão negativamente na usinagem, restringindo sua aplicação (Guesser, 2001).

Na Tupy Fundições Ltda, desde o início da década de 90, tem-se produzido o CGI através da adição de titânio entre 0,10 a 0,15% na liga, pois é fabricada uma peça em que sua aplicação como item final exige pequenas operações de usinagem, sendo economicamente viável sua produção desta maneira (Guesser, 2001).

O segundo método de obtenção do CGI não mostra o mesmo problema quando da adição do titânio, visto que o controle do magnésio residual na faixa descrita na curva-S (Figura 3.2) assegura uma quantidade suficiente de nodulizante para evitar que a grafita cresça na forma lamelar e insuficiente para que ela alcance totalmente a forma nodular. Esse processo produz uma liga de alta qualidade, mas que necessita de equipamentos especiais dotados de técnicas de análise térmica e oxidação para garantir a microestrutura desejada da liga (Dawson, 1994; Guesser, 2001; Mocellin, 2002a).

É importante lembrar que, além dos cuidados citados acima, outros como: teores de carbono (C), enxofre (S), silício (Si); velocidade de resfriamento, espessura das paredes e outros são necessários para produzir o CGI (Dawson, 1994; Mocellin, 2002a).

3.2 Propriedades físicas e mecânicas do vermicular

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

físicas e mecânicas distintas a cada uma delas. Estas diferenças podem ser visualizadas na Figura 3.3 (Sergeant, 1978, Ziegler, 197-; Dawson,1994).

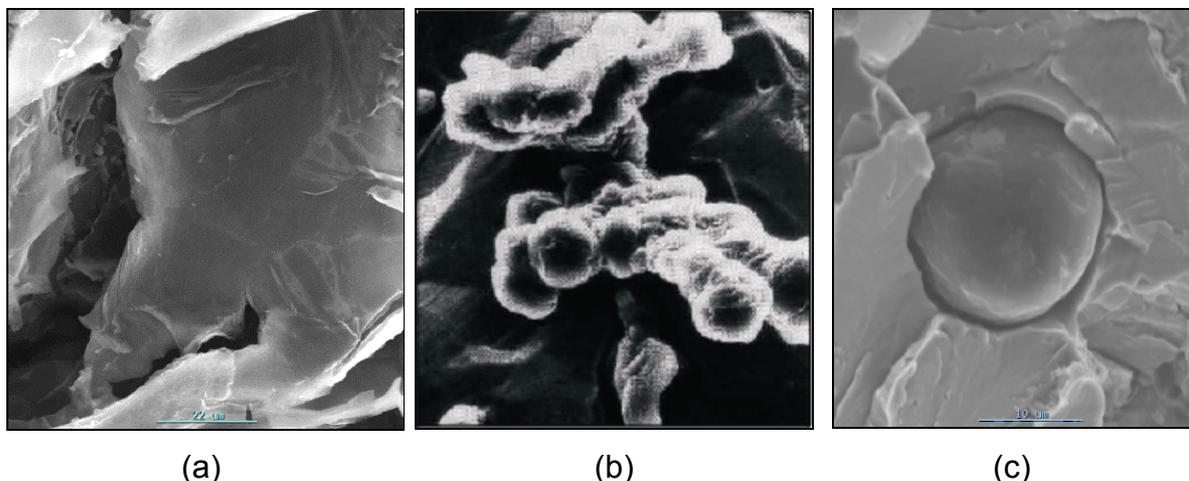


Figura 3.3: Forma espacial dos tipos de grafitas dos ferros fundidos. (a) Ferro fundido cinzento. (b) Ferro fundido vermicular. c) Ferro fundido nodular.

O ferro fundido cinzento apresenta grafitas na forma de lamelas, com cantos agudos e superfícies lisas. Suas grafitas são interconectadas e sem orientação preferencial, formando uma rede quase contínua. De acordo com Ziegler (197-) e Dawson (1994b), as grafitas, por possuírem uma alta condutividade térmica, da ordem de aproximadamente 3-5 vezes maior que a do ferro, garantem ao material uma boa condutividade térmica; e devido as suas orientações neste, proporcionam uma excelente capacidade de amortecimento de vibrações. Essa se deve ao caminho que as ondas sonoras realizam ao se propagarem através do ferro, refletindo-se na superfície das grafitas e sendo enfraquecida pela sua transformação em calor. Deste modo, ao mesmo tempo em que se têm vantagens em razão da forma e orientação das grafitas na matriz, têm-se desvantagens com a redução da resistência mecânica, da ductilidade e da tenacidade do material. Isto é causado em função das discontinuidades provocadas na matriz pelos cantos agudos das grafitas, que agem como pontos de concentração de tensões e planos de propagação de trincas (Ziegler, 197-; Dawson, 1993; Dawson, 1994b; Marquard et al. 1998).

No ferro fundido nodular, as grafitas se apresentam na forma de nódulos, não gerando discontinuidades na matriz, o que ocasiona menor concentração de tensões. Esta disposição das grafitas confere ao material um aumento da sua

resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, maior que o encontrado no ferro cinzento. Como desvantagens, pode se citar: menor condutividade térmica da liga, em virtude de as grafitas não se mostrarem interconectadas; menor capacidade de amortecimento e pior usinabilidade quando comparado com o ferro fundido cinzento e o CGI (Ziegler, 197-; Dawson, 1993).

Quanto ao CGI, a morfologia da sua grafita apresenta lamelas espessas com cantos arredondados, interconectados e com superfície áspera e irregular, daí o nome de vermicular (Dawson; 1993; Sintercast, 1994a).

Os cantos arredondados não agem mais como pontos de concentração de tensões e a grafita interconectada propicia uma taxa maior de transferência de calor e dissipação de vibrações que o nodular. Portanto, esta forma de grafita é responsável pela liga possuir boas características de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga térmica, amortecimento e condutividade térmica intermediária aos ferros cinzentos e nodulares, descritos na Tabela. 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular comparado com o cinzento e nodular (Technical Articles, 2000; ASM, 1996; Guessser, 1997; Hick, 2000).

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

A associação das propriedades salientadas na tabela anterior faz deste material uma excelente opção para diversas aplicações, entre elas, blocos de motores diesel, cabeçotes de blocos de motores, discos de freios, escapamentos, coletores, turbinas, entre outras (Oathout 1978, Sergeant 1978, Cooper 1978; Dawson 1994c.; Guessser 1997; Marquard et al. 1998; Dawson et al.; 1999 ; Mocellin, 2002).

3.3 O processo de torneamento

O torneamento é um processo mecânico de corte, no qual a peça, em geral, executa o movimento rotativo em torno do eixo principal da máquina; e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar (Ferraresi, 1995; König, 1997).

Este processo é um dos mais utilizados dentro da indústria, por ser de fácil operação e economicamente viável, apresentando expressiva participação na fabricação de peças usinadas. Segundo König (1997), ele possibilita realizar:

- torneamento longitudinal;
- faceamento;
- torneamento de perfis;
- torneamento de roscas;
- torneamento de geração; e
- torneamento de forma.

Neste trabalho, foi realizada a operação de torneamento longitudinal externa, em que a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina, como é ilustrado na Figura 3.4.

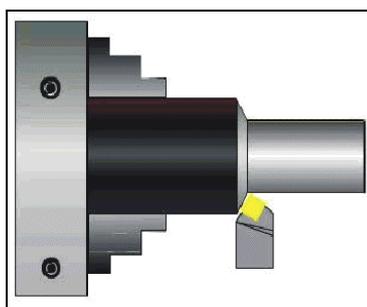


Figura 3.4: Ilustração do torneamento longitudinal (CIMM,2002).

3.3.1 O processo de corte

O processo de corte no torneamento inicia-se quando a ferramenta penetra na peça, fazendo com que uma pequena porção do material seja deformada elástica e plasticamente, aumentando as tensões até que ocorra o cisalhamento do material e este escoe sobre a superfície da face da ferramenta, formando o cavaco.

Na usinagem do ferro fundido, o cavaco é influenciado pela forma da grafita. No

ferro fundido cinzento, durante a usinagem, a ferramenta primeiro comprime o material, como as suas grafitas possuem lamelas afiadas, ocorre uma concentração de tensão nas suas extremidades, e devido ao fato de elas serem interconectadas, cria-se um plano de propagação de trincas à frente do gume (Figura 3.5(a)). Com o avanço da ferramenta, o material é removido completamente com uma menor força de corte (b). Durante a usinagem, a ferramenta de corte não está sempre em contato com o material, pois uma porção de material é removida à frente da ferramenta, gerando crateras (c). O arrancamento de material contribui para a liberação da grafita que age como lubrificante e piora a rugosidade da superfície usinada (d) (Cohen et al.; 2000; Georgiou, 2002)

No ferro fundido nodular, a grafita na forma de nódulos é deformada pela ação compressiva da ferramenta, antes da separação do cavaco. Esta microestrutura permite o escoamento e ductilidade que o ferro fundido cinzento não exhibe durante a usinagem. Assim, o material flui na forma de um cavaco contínuo sobre o gume da ferramenta similar ao cavaco de um aço (Georgiou, 2002).

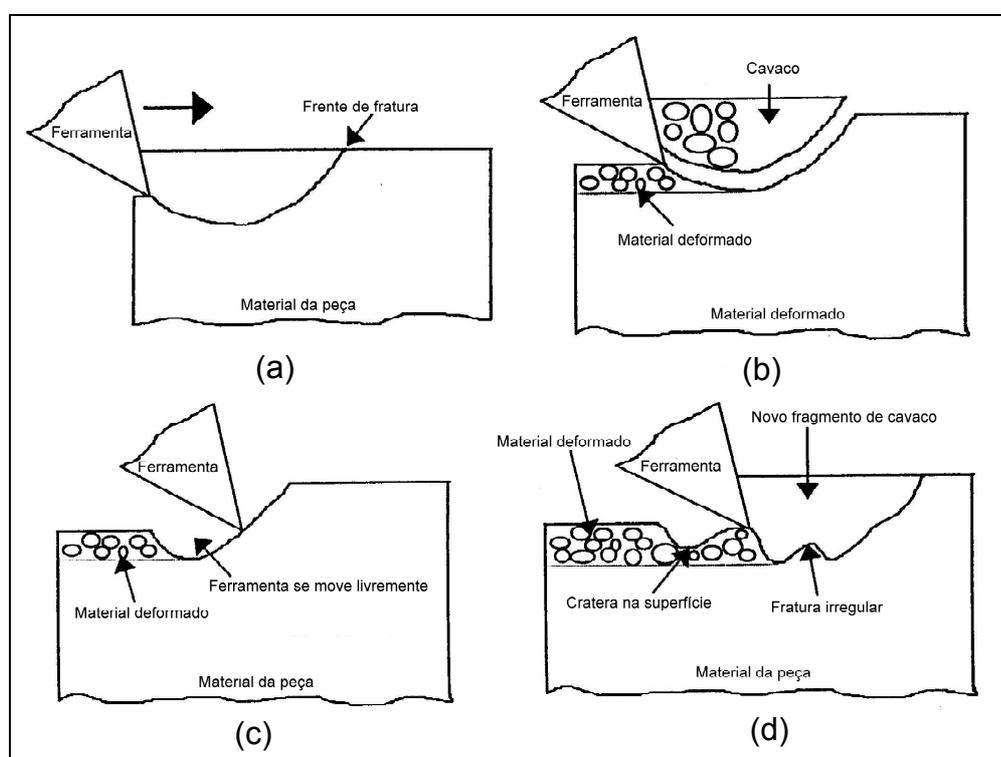


Figura 3.5: Formação do cavaco no ferro fundido (Cohen, 2000).

A formação do cavaco do CGI é segmentada, com característica dúctil do nodular e frágil do cinzento (Reuter et al., 1999). Como ocorre no ferro fundido cinzento, o

CGI é usinado através de uma trinca no plano da grafita que possui uma resistência menor aos esforços de corte. A diferença é que, como as arestas das lamelas das grafitas são arredondadas, o corte requer uma maior força, já que o formato do cavaco é muito mais parecido com a formação ocorrida durante a usinagem do nodular.

O processo de corte, bem como a formação e o tipo de cavaco gerado, está diretamente ligado com a ferramenta de corte, que será explicado no item a seguir.

3.3.2 Ferramenta de corte de geometria definida

Com o conhecimento do processo de corte e do mecanismo de formação do cavaco do material, busca-se, por meio da inspeção das variáveis geométricas da ferramenta de corte, controlar as características do processo de usinagem a fim de torná-lo economicamente viável.

As características de saída do cavaco, força de corte, desgaste da ferramenta, qualidade da superfície, entre outras, são diretamente influenciadas pela geometria cortante da ferramenta. Isto significa que se deve conhecer a definição de uma ferramenta de corte, suas partes, ângulos, tipos de materiais para sua fabricação, com o objetivo de obter um resultado satisfatório durante a usinagem, adaptando a geometria da ferramenta ao material da peça e ao material da ferramenta. A Figura 3.6 mostra uma ferramenta de torneamento ou aplainamento com a definição das superfícies, flancos e quinas.

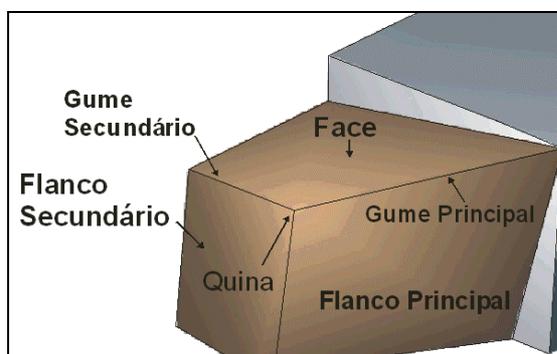


Figura 3.6: Partes de uma ferramenta de geometria definida (CIMM, 2002).

Segundo Weingaertner & Schroeter (1991) e König (1997), no desenvolvimento de uma ferramenta, para assegurar um bom desempenho durante a usinagem, a sua

geometria deve atender aos requisitos de projetos:

- limitar o desgaste da ferramenta;
- reduzir os esforços e o atrito;
- obter superfícies de boa qualidade na peça; e
- simplificar a afiação.

Isso significa que a forma da ferramenta não é a mesma para todas as condições de corte. Ela depende de uma solução de compromisso entre as exigências, que muitas vezes são contraditórias (Weingaertner & Schroeter, 1991).

Uma das maneiras de atender a essas exigências é trabalhar a variação dos valores dos ângulos que compõem a ferramenta. A dimensão destes influencia diretamente o processo de corte, no qual, como será mostrada a seguir, uma variação pode significar melhora ou piora nos resultados obtidos na usinagem.

Conforme Stemmer (1995), em uma ferramenta de corte de geometria definida, os principais ângulos são:

- ângulo de incidência principal α_o ;
- ângulo de saída do cavaco γ_o ;
- ângulo de cunha β ;
- ângulo de direção do gume κ_o ; e
- ângulo de quina ϵ_o .

Ângulo de incidência principal α_o : influencia consideravelmente as características da usinagem. Se este for grande, a cunha é enfraquecida e pode ter acúmulo de calor, o que aumenta as chances de lascamento e quebra da ferramenta. Quando o mesmo tende a zero, o desgaste do flanco aumenta em decorrência dos caldeamentos (Stemmer, 1995; König, 1997).

Ângulo de saída do cavaco γ_o : é o responsável pela saída do cavaco. Quando possui valor positivo, diminui a força de corte e a força de avanço, melhorando a qualidade da superfície. Se o ângulo possui valor negativo, é utilizado para usinar materiais que apresentam difícil usinabilidade, protegendo a ferramenta de impactos e reduzindo o calor do seu gume.

Ângulo de cunha β_o : é o resultado da soma dos valores dos ângulos de incidência e de saída do cavaco diminuídos de 90° . Sendo assim, sua variação está diretamente relacionada à resistência mecânica da ferramenta (Figura 3.7).

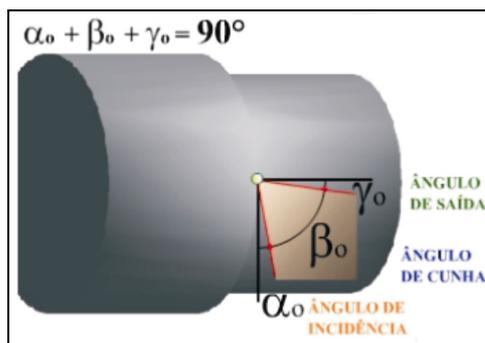


Figura 3.7: Representação do ângulo de incidência, de cunha e de saída no plano ortogonal (CIMM, 2002).

Ângulo de direção κ_r : é medido entre as superfícies de corte e de trabalho da ferramenta. Quando utilizado um valor menor que 90° , faz com que o corte inicie afastado da quina da ferramenta, incidindo os esforços de corte em um lugar mais resistente, apto a absorver o impacto inicial. Se mantido um valor igual a 90° , o corte se inicia subitamente em toda a extensão do gume principal, podendo provocar quebra ou lascamento do mesmo.

Ângulo de quina ϵ_r : é o responsável pela estabilização da cunha de corte e por direcionar a saída de cavaco. Protege a quina da ferramenta contra impactos e atenua vibrações (Stemmer, 1995) (Figura 3.8).

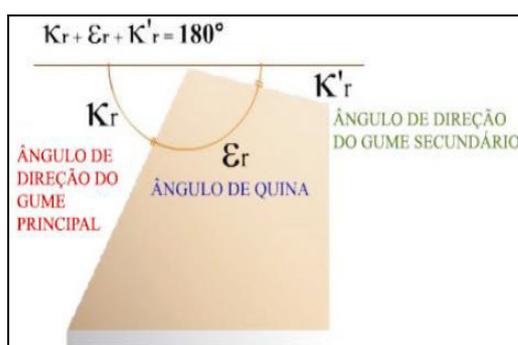


Figura 3.8: Ângulos da ferramenta no plano de referência (CIMM, 2002).

3.4 Materiais para ferramentas de corte

As pesquisas e desenvolvimentos na área de materiais para ferramentas de corte buscam continuamente descobrir novos materiais e melhorar as características dos já existentes (König, 1997). Estas características são físicas, mecânicas e

geométricas, como: elevada dureza a frio e a quente, tenacidade e resistência ao desgaste.

Dos materiais utilizados para a fabricação de ferramentas de corte, muitas vezes, o que se sobressai em uma determinada propriedade é inferior nas outras, o que torna necessário buscar um equilíbrio entre as propriedades de uma ferramenta. As características da ferramenta escolhida influenciarão nas trocas de ferramentas, escolhas das máquinas, tempos de fabricação, custo do operador, entre outros fatores (König, 1997; Stemmer, 1995).

Os materiais para ferramentas mais utilizados nas operações de usinagem não apresentam uma classificação geral. Porém, muitos autores os listam de acordo com sua resistência a abrasão. König (1997), um destes autores, classifica os materiais na seguinte ordem:

- aços-ferramentas,
- aços-rápidos;
- stellite ou ligas duras;
- metal-duro;
- cerâmica de corte;
- nitreto de boro cúbico, e
- diamante.

Já na escolha do material para ferramenta, segundo Ferraresi (1995) e Diniz (1999), alguns fatores devem ser ponderados:

- material a ser usinado;
- processo de usinagem;
- condição da máquina-ferramenta;
- forma e dimensões da ferramenta;
- custo do material da ferramenta; e
- condições da operação.

Na usinagem do ferro fundido cinzento, três tipos de materiais são largamente usados para fabricar ferramentas de corte. São eles: o metal-duro, a cerâmica e o CBN. Todos apresentam bons tempos de vida quando comparados com os outros tipos de materiais para ferramenta, utilizando maiores velocidades de corte, avanço e profundidade de corte.

Devido a isto, a revisão bibliográfica sobre materiais para ferramentas de corte será focada nestes três tipos de materiais.

3.4.1 Metal-duro

O metal-duro é um produto obtido por meio da metalurgia do pó, constituído por partículas duras (carbonetos) e um ligante sinterizado. O ligante tem como função constituir a ligação dos carbonetos frágeis, obtendo um corpo resistente. Já os carbonetos fornecem a alta dureza a quente, resistência ao desgaste e à compressão.

O metal-duro tem como constituição básica carbonetos de tungstênio e de cobalto (WC-Co), onde o WC é a parte com elevada dureza e o Co é o ligante (König, 1997; Diniz; 1999). A Figura 3.9 mostra uma microestrutura básica do metal duro.

A classificação do metal-duro convencional é feita pela norma ISO-513-1975, sendo dividido em três grupos convencionais: P, M e K, conforme sua aplicação na usinagem, sendo que a classe K é utilizada para a usinagem do ferro fundido comum e coquilhado, maleáveis de cavaco curto, no qual o ferro fundido vermicular se encontra.



Figura 3.9: Microestrutura básica de um metal-duro (CIMM, 2002).

Procurando melhorar as propriedades físicas e mecânicas desses grupos convencionais, foram desenvolvidos metais-duros com a adição de elemento de liga, cujo objetivo foi obter uma melhoria significativa da durabilidade da ferramenta.

Os elementos constituintes adicionados são: Carboneto de Titânio (TiC), Carboneto de Tântalo (TaC), Carboneto de Nióbio (NbC) e Nitreto de Titânio (TiN), em que cada um destes elementos apresentam propriedades distintas de dureza, resistência a abrasão, tenacidade, condutividade térmica e estabilidade química.

O TiC possui um menor coeficiente de atrito, reduzindo o calor gerado. Já o TaC e o de NbC aumentam a tenacidade devido ao refinamento do grão da matriz do

metal-duro, tendo como conseqüência o aumento da resistência do gume. Quanto ao TiN, este exhibe uma maior estabilidade química que o TiC, propiciando uma menor tendência à difusão na ferramenta (Stemmer, 1995; König, 1997).

Outro fator que contribuiu para a melhoria do desempenho das ferramentas de metal-duro foi o desenvolvimento de processos de revestimentos duros aplicados sobre o substrato. Isto possibilitou uma expressiva redução dos desgastes das ferramentas, com conseqüente aumento da produtividade nas linhas de produção da indústria.

Este processo utiliza determinadas vantagens de alguns materiais com elevada dureza e estabilidade química, que são depositados sobre matrizes de metal-duro com propriedades intermediárias (Stemmer, 1995). Sua utilização proporciona a redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta, redução do fator de recalque do cavaco e do calor gerado no flanco e na face da ferramenta (Bork, 1995).

A deposição da camada de revestimento se dá por dois processos: o PVD (Physical Vapour Deposition) e o CVD (Chemical Vapour Deposition).

O CVD é amplamente utilizado para ferramentas de metal-duro, por ser um processo que permite uma boa difusão entre o revestimento e o substrato. É realizado em um forno com atmosfera protetora de hidrogênio, com temperaturas variando na ordem de 900 a 1100°C e pressão levemente negativa, apresentando facilidade em regular e controlar as camadas de revestimentos depositadas sobre o substrato de metal-duro (König, 1997; Diniz, 1999).

Atualmente, os tipos de revestimentos mais usados no processo industrial são: TiC, TiN, Al₂O₃, TiCN, TiAlN, TiAlN revestido por WC/C e TiAlN multicamadas. Cada um destes apresentam características próprias como cor, dureza, espessura, aplicabilidade e desempenho.

As principais características de cada um deles são:

Carboneto de Titânio (TiC): Apresenta baixo coeficiente de dilatação térmica e atrito, que levam a uma redução da temperatura no gume da ferramenta, reduzindo, assim, a ocorrência de difusão. Quando comparado com o TiN, sua dureza é mais elevada, o que ocasiona maior resistência a abrasão (König, 1997).

Nitreto de Titânio (TiN): Possui uma ligação interna maior que o TiC em função da sua estabilidade química, tendo menor tendência à difusão na usinagem de aços (Stemmer, 1995; König, 1997; Diniz, 1999).

Óxido de Alumínio (Al_2O_3): É caracterizado por uma alta dureza a quente, resistência à oxidação e ações químicas, com excelente resistência ao desgaste de cratera. Tem como desvantagem a baixa resistência a oscilações de temperaturas e alta fragilidade (König, 1997).

Carbonitreto de Titânio (TiCN): Apresenta boa resistência ao desgaste do flanco do TiC e estabilidade química do TiN, resistindo contra o desgaste de cratera e o de oxidação. É muito utilizado na usinagem dos ferros fundidos (Balzers, 2002).

A Figura 3.10a ilustra estes revestimentos aplicados sobre o metal-duro na forma de multicamadas.

Nitreto de Titânio-alumínio (TiAlN): É um processo no qual, durante a deposição, alguns átomos de Ti são substituídos por átomos de Al. Isto proporciona uma maior resistência ao desgaste, oxidação e estabilidade química, dependendo da sua aplicação. A Figura 3.10b ilustra este tipo de revestimento em monocamada.

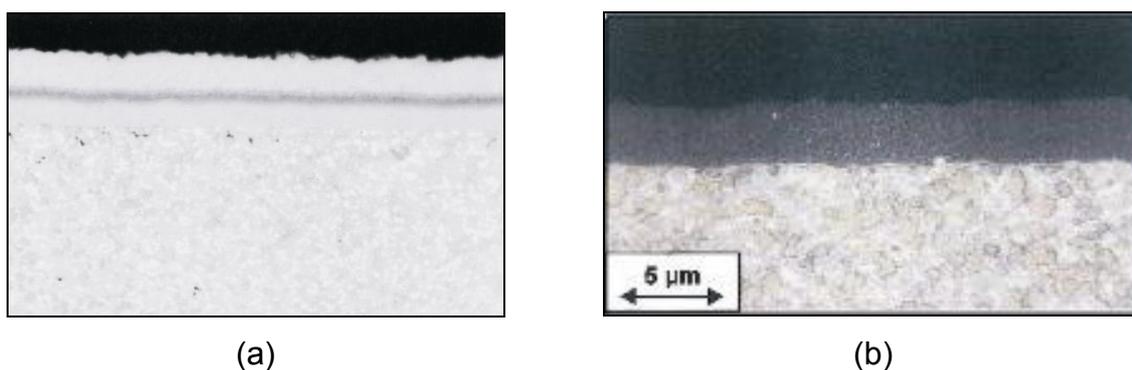


Figura 3.10: a) Revestimento de TiC/TiCN/TiN aplicado em uma ferramenta de metal duro (Edwards, 1993). b) Revestimento de TiAlN monocamada aplicado sobre o metal-duro (Prengel et al., 2001).

Nitreto de Titânio-alumínio (TiAlN) Revestido por WC/C: Este tipo de revestimento tem como característica minimizar a utilização de fluidos de corte, através da aplicação de uma camada de WC/C sobre o revestimento de TiAlN, reduzindo o coeficiente de atrito de 0,4 para 0,2 e garantindo sua aplicação em processos de furação e rosqueamento.

Nitreto de Titânio-alumínio Multicamadas (TiAlN): É um dos últimos desenvolvimentos no revestimento, combinando diferentes proporções alternadas de Ti e Al. Este tipo de revestimento se destaca na usinagem a seco; sua disposição na ferramenta é mostrada na Figura 3.11 (Prengel et al., 2001).

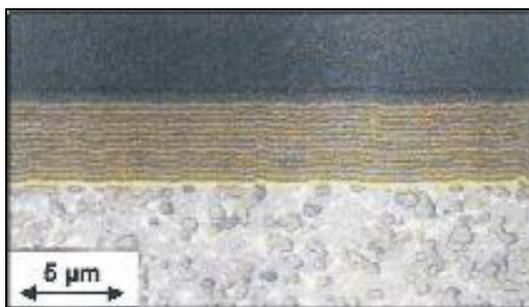


Figura 3.11: Revestimento de TiAlN multicamada sobre metal-duro (Prenzel et al., 2001).

3.4.2 Cerâmica

O material cerâmico é citado como ferramenta de corte desde a década de 50, quando os primeiros experimentos foram realizados, passando por uma série de aperfeiçoamentos na sua fabricação até que alcançasse uma parte significativa do consumo de ferramentas na década de 80.

Como ferramenta de corte, a cerâmica mostra as seguintes qualidades (Stemmer, 1995; König, 1997):

- alta dureza a quente, permitindo altas velocidades de cortes;
- elevada estabilidade química do óxido de alumínio, não havendo fenômenos de oxidação e difusão;
- alta resistência à compressão; e
- baixo coeficiente de atrito.

Isto permite que operem com velocidades de corte superiores às das ferramentas de metal-duro, resultando em aumento da taxa de remoção de cavaco e melhor acabamento da superfície. Outra vantagem que pode ser citada é a grande quantidade de calor gerado que é liberada juntamente com os cavacos, tendo como consequência menos calor gerado na peça usinada, no inserto e no porta-ferramenta.

Quanto a problemas relacionados à sua aplicação, pode-se ressaltar (Stemmer, 1995; König, 1997):

- alta fragilidade e
- condutibilidade térmica baixa, sendo muito sensível a variações bruscas de temperatura.

As cerâmicas são classificadas de acordo com a sua composição, e estão divididas em cerâmicas óxidas, mistas e à base de nitreto de silício (Si_3N_4) (König, 1997; Diniz, 1999;).

As cerâmicas óxidas ou puras são caracterizadas por apresentarem um teor superior a 90% de óxido de alumínio (Al_2O_3), que dá a cor branca característica deste material e que lhe confere excelente dureza a quente. São aplicadas no desbaste e acabamento dos ferros fundidos nodulares e maleáveis até a dureza de 400 HB, aproximadamente (König, 1997).

Ao grupo das cerâmicas mistas pertencem os materiais óxidos com menos de 90% de Al_2O_3 , mas que são complementados com combinações metálicas que proporcionam sua cor mais escura. Estas combinações também aumentam a resistência a abrasão e reduzem a sensibilidade ao choque térmico da cerâmica. São aplicadas na usinagem de desbaste e acabamento de ferro fundido duro, maleável, nodular e cinzento, até uma dureza de 700 HB (König, 1997; Diniz, 1999).

As ferramentas de nitreto de silício (Si_3N_4) são cristais de destes, com uma fase de óxido de silício (SiO_2) que são sinterizados na presença de óxido de ítrio (Y_2O_3) e de manganês (MgO). Sua fabricação é realizada pela técnica da metalurgia do pó, mas de difícil sinterização (Edwards, 1993). É reconhecida como um dos materiais cerâmicos mais tenazes, apresentando elevada qualidade em função de sua dureza, resistência ao desgaste abrasivo, choque térmico e boa tenacidade, porém é péssima em relação à estabilidade química (Diniz, 1999). Seu principal campo de aplicação é na usinagem do ferro fundido cinzento, onde o cavaco de característica curta não tende a causar difusão na ferramenta (Edwards, 1993; Diniz, 1999).

3.4.3 CBN

O nitreto de boro cúbico (CBN) é o segundo material mais duro para ferramentas de corte. Foi obtido pela primeira vez em 1957, pela transformação do nitreto de boro de estrutura hexagonal em estrutura cúbica (Stemmer, 1995; König, 1997).

O grão de CBN (esfarelita) pode ser obtido pelo aquecimento de nitrogênio com boro, em cápsula de metal, com temperatura aproximada de 1800 °C e pressão de 8,5 GPa. Outra maneira de se obter o grão é alterar a estrutura da forma hexagonal para cúbica sob grande pressão e altíssima temperatura, mas que é mantido em segredo pelos fabricantes.

A fabricação na forma de pastilhas se dá através do processo de sinterização, onde os grãos de CBN, juntamente com catalisador, são submetidos a alta pressão e temperatura (Stemmer, 1995; Ray, 1989).

Na usinagem, é um material quimicamente mais estável que o diamante e pode usinar algumas ligas ferrosas sem o problema de difusão. Quanto às propriedades mecânicas, sua tenacidade exhibe valores similares ao material cerâmico, mas possui uma dureza quase duas vezes maior que a da alumina (Diniz, 1999).

A utilização do CBN se dá em operações em que o diamante policristalino não pode ser utilizado ou quando o metal-duro não possui a dureza requerida para realizar a tarefa. Seu uso proporciona um tempo de vida maior à ferramenta, com conseqüente diminuição do tempo em que a máquina permanece parada para troca de ferramenta e ajustagem, além de permitir velocidades e avanços maiores do que as outras ferramentas (König, 1997; Diniz, 1999).

Como desvantagem, pode-se mencionar o alto custo da ferramenta de CBN, sensivelmente maior do que as ferramentas de metal-duro e cerâmica.

3.5 Desgaste das ferramentas de corte

Os desgastes na ferramenta de corte podem ocorrer de forma isolada e/ou superposta em decorrência de solicitações térmicas, mecânicas e químicas, sendo muito difícil isolá-los durante a usinagem.

Como fatores principais do desgaste, Stemmer (1995) e König (1997) citam:

Deformação plástica: ocorre quando a dureza a quente do material não resiste mais às pressões de usinagem e o material da ferramenta escoá.

Abrasão: caracterizada pelo arrancamento de partículas de matéria, em decorrência do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta.

Aderência: desgaste que ocorre quando o material da peça usinada e a superfície da ferramenta aderem um ao outro, devido à ação das altas temperaturas, pressões na zona de corte e ao fato de que a superfície inferior do cavaco está quimicamente mais ativa, facilitando a adesão. Durante a usinagem, poderá formar o gume postiço.

Difusão: quando a temperatura entre a peça e a ferramenta atinge valores

elevados, os átomos se tornam móveis procurando uma nova posição de equilíbrio. Este fenômeno acontece quando essa temperatura fica acima de dois terços da temperatura de fusão dos materiais envolvidos na usinagem. No caso do metal-duro, como o cobalto, possui um coeficiente de expansão térmica de aproximadamente 4 vezes maior que os dos outros carbonetos constituintes do metal-duro, o aumento da temperatura provoca a expulsão sob alta pressão do cobalto e a geração de tensões no interior do metal-duro, facilitando o seu desgaste por abrasão.

Oxidação do material: é um mecanismo de ação direta. Se o material da ferramenta apresenta afinidade com o oxigênio, sob altas temperaturas, ocorrerá a formação de filmes de óxidos em certas regiões da ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito, gerando desgaste (Diniz, 1999).

A Figura 3.12 ilustra a ação dos principais mecanismos de desgastes, segundo König (1997).

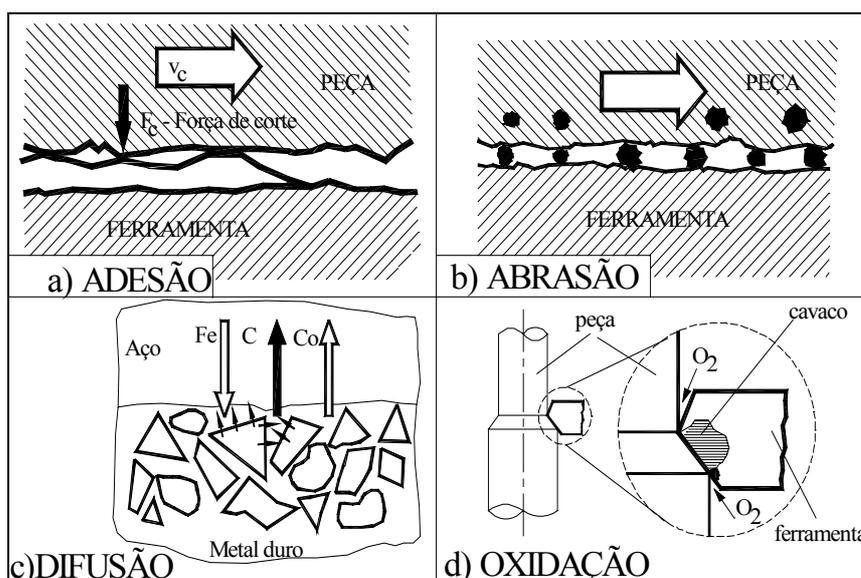


Figura 3.12: Mecanismos de desgaste que atuam em ferramentas de usinagem (König, 1997).

Estes mecanismos levam a uma série de desgastes, como o de flanco e de cratera, que serão explicados a seguir.

a) Desgaste de Flanco

Este tipo de desgaste decorre do atrito entre a peça e a ferramenta. O desgaste

de flanco não pode ser evitado, contudo pode ser minimizado pela correta escolha das condições de corte, material e geometria da ferramenta. A largura ou altura da marca de desgaste é mostrada no esquema da Figura 3.13. Este desgaste determina o grau de comprometimento da ferramenta para continuar ou não a usinagem.

b) Desgaste de Cratera

É o tipo de desgaste que ocorre devido ao atrito do cavaco com a face da ferramenta. Este atrito remove material e forma uma cratera, caracterizada pela sua profundidade KT e pela distância KM medida da posição do gume até o centro da cratera, conforme a Figura 3.13. Quando o desgaste aumenta muito se encontrando com o desgaste no flanco, ocorre a quebra da ferramenta.

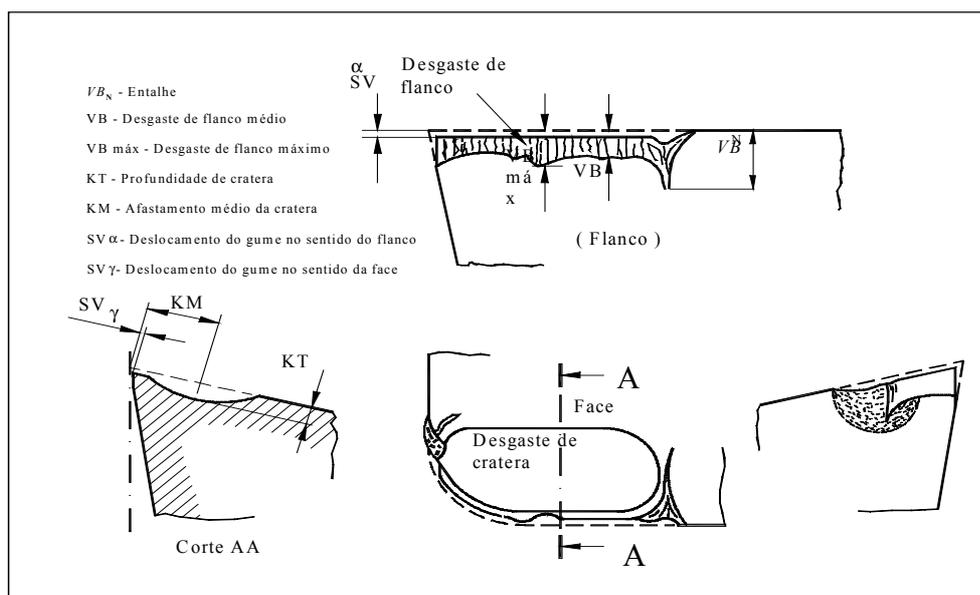


Figura 3.13: Ferramenta com desgaste de flanco e cratera (König, 1997).

3.6 Tecnologia de superfície

Tecnologia de superfície é a parte da engenharia que estuda um meio de descrever e avaliar uma superfície e as camadas logo abaixo dela.

Assim, é importante conhecer o conceito que define estas duas regiões citadas

anteriormente. A superfície é a região que limita a peça com o meio circundante e com ela se relacionam as propriedades da textura (rugosidade, ondulação e marcas da ferramenta). A outra região é compreendida pelas camadas logo abaixo da superfície, sendo relacionada com as propriedades de integridade (corrosão, trincas, alterações químicas e físicas dos materiais) (Bet, 1999).

Com o aumento das exigências dos consumidores por produtos com alto desempenho, vida e confiabilidade, a qualidade da superfície tem ganhado cada vez mais importância no meio industrial, sendo uma maneira de garantir o conhecimento e o controle dos aspectos da geometria e as funções da peça especificadas durante o projeto.

No processo de fabricação, a tecnologia de superfície tem um papel muito especial, avaliando o desgaste da ferramenta, as variações no material do componente e como a superfície da peça influenciará a vida de um componente em funcionamento (Bet, 1999).

Em função das características do trabalho, será enfatizado o controle da textura da superfície, em especial a rugosidade, com o objetivo de verificar o efeito da geometria e do desgaste da ferramenta sobre a qualidade da superfície.

3.6.1 Rugosidade da superfície

São irregularidades finas que geralmente resultam da ação inerente do processo de usinagem. Segundo König (1997) e Bet (1999), estas podem ser divididas em: rugosidade cinemática e de processo.

A rugosidade cinemática é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre a peça e a ferramenta. No torneamento, é influenciada pela forma do gume e pelo avanço.

Quanto à rugosidade de processo, sua causa está associada aos fenômenos que ocorrem no gume da ferramenta, estando, assim, diretamente correlacionada ao comportamento do material usinado.

Como parâmetros para determinação da rugosidade da superfície, pode-se citar os parâmetros verticais como R_a , R_y , R_z , entre outros.

O R_a representa a rugosidade média das amplitudes entre picos e vales, entretanto, como este representa uma média, o aparecimento de um pico ou de um vale não típico pode deturpar significativamente o seu valor, fazendo com que este

não represente mais o valor médio.

Quanto ao R_y , sua característica é de máxima e mais rígida, pois avalia a maior distância pico-a-vale dentro do percurso de medição. É um parâmetro utilizado para determinar as condições do pré-acabamento necessárias para operações de acabamento subsequente como a lapidação. Ele indica a quantidade de material que pode ser removida antes de atingir a dimensão limite da peça (SME, 1987).

Já o R_z é calculado pela média das distâncias pico-a-vale de cinco comprimentos de amostragem, sendo, assim, mais sensível a picos ou vales locais. É utilizado para o monitoramento de processos de fabricação, principalmente em superfícies de apoio, deslizamento e de ajustes mecânicos, nas quais os cilindros de motores estão incluídos.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - USINAGEM DO CGI

Desde a sua descoberta, o CGI é vislumbrado com amplas possibilidades de aplicação em diversos setores da indústria, por combinar características mecânicas e elásticas situadas entre o ferro fundido cinzento e o nodular, o que é ideal para a construção de blocos de motores a diesel principalmente (Phillips, 1982). Assim, nos últimos anos, uma série de pesquisas foi desenvolvida para viabilizar economicamente sua utilização.

No mercado automotivo, as previsões para os próximos anos indicam que o consumo do CGI irá aumentar; e em um futuro próximo, segundo Borrmann (2002), todos os blocos de motores a diesel serão fabricados em CGI.

No entanto, o que impede que a utilização dos blocos de CGI seja ampliada é sua maior dificuldade em ser usinado por determinados processos de corte quando comparado com o ferro fundido cinzento, material conhecido e amplamente usado na fabricação de blocos de motores a diesel (Reuter, 1999).

Atualmente, um dos maiores desafios é introduzir o CGI nas linhas “*transfer*”, utilizadas na usinagem do ferro fundido cinzento. Neste caso, busca-se alcançar o mesmo desempenho das ferramentas, mantendo os mesmos custos por peça trabalhada e evitando investimento adicional de capital em máquinas e ferramentas de corte.

Os primeiros resultados obtidos em testes, para implantar peças de vermicular em linhas “*transfer*”, foram realizados pelo Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen Technische Universität Darmstadt (PTW Darmstadt). A Figura 4.1 exibe os resultados obtidos na comparação entre o ferro fundido vermicular e o ferro fundido cinzento, em operações de usinagem intensamente utilizadas na fabricação de blocos de motores. As descrições das ferramentas usadas para obter este resultado não foram citadas pelo autor, informando somente um resultado genérico por processo.

Os resultados mostram que as ferramentas utilizadas na usinagem do vermicular apresentam, em todas as operações de usinagem, desempenho inferior quando comparado com o ferro fundido cinzento.

Em operações como furação e fresamento, a redução da vida da ferramenta pode ser atribuída à maior resistência mecânica do ferro fundido vermicular; mas, em operações de corte contínuo, como mandrilamento, a ferramenta atinge apenas

aproximadamente 5% da vida alcançada na usinagem do ferro fundido cinzento. Essa grande diferença constitui um desafio muito importante para ser entendido e superado (Reuter, 1999a; Georgiou, 2001; Gobel, 2002; Georgiou, 2002a; Georgiou, 2002b).

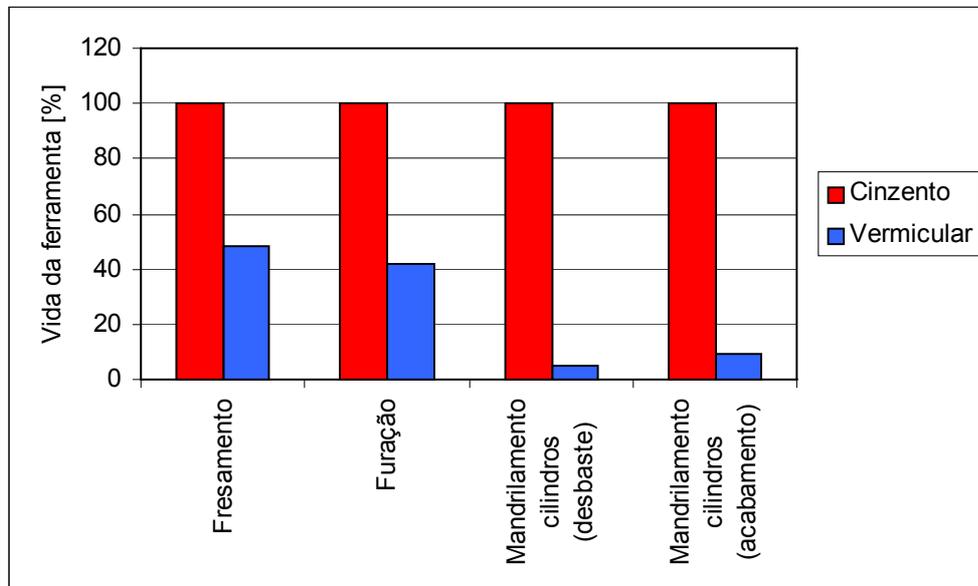


Figura 4.1: Comparação entre a usinabilidade do ferro fundido cinzento e vermicular em operações de usinagem em linhas “*transfer*” (Reuter et al., 2000).

O PTW Darmstadt vem contribuindo com vários estudos direcionados para a melhoria da usinagem do CGI. Este instituto de pesquisa, em parceria com empresas de fundição, indústrias automobilísticas, fabricantes de ferramentas e com a empresa comercializante da tecnologia e dos equipamentos que fabricam o CGI sem a adição de titânio, desenvolveu uma série de trabalhos para superar as dificuldades de utilização da liga (Reuter, 2002).

Em geral, estes trabalhos estão distribuídos em três grandes grupos para melhorar a usinagem do vermicular (Dawson; 1999):

- melhoria do CGI por fatores metalúrgicos;
- desenvolvimento dos materiais das ferramentas para usinagem e
- aprimoramento das técnicas de usinagem.

Assim, nos itens a seguir, serão explicados os desenvolvimentos mais recentes.

4.1 Melhoria do CGI por fatores metalúrgicos

Buscando um melhor entendimento dos fatores que afetam a usinagem do CGI, Dawson (1999), juntamente com as empresas Ford e Sintercast, e Mocellin (2002a), juntamente com a Tupy Fundições Ltda., pesquisaram algumas das variações na composição química e microestrutural no CGI (Figura 4.2) que podem influenciar na vida da ferramenta.

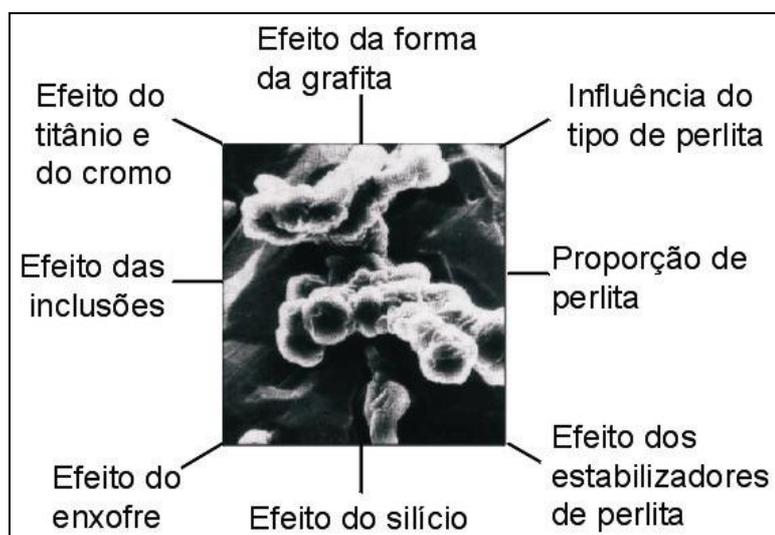


Figura 4.2: Variações químicas e microestruturais que podem influenciar na usinagem do ferro fundido vermicular.

Para a realização dos trabalhos de Dawson (1999) e Mocellin (2002 (a) e (b)), as ligas analisadas obedeceram a alguns requisitos mínimos. São eles:

- as variações metalúrgicas não podiam comprometer as propriedades desejáveis do CGI;
- não podiam melhorar uma operação de usinagem em sacrifício de outra; e
- as alterações deviam ser suficientemente pequenas para assegurar que o produto desenvolvido não se caracterizasse como uma nova liga, precisando, desta forma, passar por um novo ciclo de validação das propriedades do material e rendimento do motor.

Os resultados obtidos são salientados a seguir.

4.1.1 Efeito da forma da grafita

Os ferros fundidos não podem ter suas propriedades físicas e mecânicas explicadas somente pela composição química. Estas propriedades dependem da forma, tamanho e da quantidade de partículas de grafita (Dawson, 1994; Dawson, 1999).

Para demonstrar o efeito da forma da grafita, testes foram realizados visando comparar a usinabilidade de duas ligas, uma de ferro fundido vermicular e outra com uma combinação de 50% de ferro fundido vermicular e 50% de cinzento, obtida com a redução da porcentagem de magnésio na liga.

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas ferramentas de metal-duro classe GC 3005 (CNMG 120412-KM) Sandvik-Coromant, com velocidades de corte de 200 m/min, avanço de 0,2 mm e profundidade de corte de 1,5 mm.

Os resultados obtidos mostraram que o material composto por 50% de vermicular e 50% de cinzento apresentou um ganho de 30% na vida da ferramenta quando comparado com a liga de ferro fundido vermicular (Dawson, 1999).

Uma explicação possível para o aumento da vida da ferramenta é, conforme Dawson (1999), a mudança da forma de grafita de lamelar para vermicular. Isto faz com que se altere o mecanismo de formação do cavaco, passando de uma estrutura frágil, quando a grafita está na forma de lamelas, para uma estrutura dúctil na forma de vermicular.

No ferro fundido cinzento, as grafitas na forma de lamelas possuem em suas extremidades arestas muito “vivas”, que agem como pontos de concentração de tensões. Então, durante o processo de corte, a ferramenta comprime o material e, como as grafitas em forma de lamelas são interligadas, trincas se propagam em um plano de corte até o arrancamento do cavaco. Portanto, o cavaco não fica o tempo todo em contato com a ferramenta. Isso, aliado ao maior coeficiente de atrito do CGI e sua menor condutividade térmica, tende a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte, contribuindo para o maior desgaste desta (Reuter, 1999a; Georgiou, 2002b).

4.1.2 Tipo de perlita

Os estudos realizados neste campo estão preocupados em analisar a relação do

teor de Fe_3C na perlita com a vida da ferramenta, pois como é sabido a perlita no diagrama ferro-carbono é composta por uma fração em volume de 88% de ferrita e 12% de Fe_3C (cementita). Na prática, uma série de fatores contribui para este equilíbrio termodinâmico da matriz do ferro: a adição de elementos inoculantes que promovem o crescimento de grafita; elementos perlitizantes que atuam como barreiras de difusão para o carbono se depositar na forma de grafita, formando a perlita; e também, quanto ao comportamento da solidificação e a velocidade de resfriamento. Estes fatores tornam aceitável a consideração da proporção de Fe_3C na faixa entre de 8-15% na composição da perlita (Dawson1999).

Estudos realizados por Bates (1996) apresentam a relação entre a variação da porcentagem da Fe_3C na perlita com a usinabilidade de ferros fundidos nodulares e cinzentos. Os resultados obtidos em ensaios de furação, torneamento e fresamento utilizando ferramentas de CBN e metal-duro mostram que a vida da ferramenta decresce com o aumento da porcentagem de Fe_3C na perlita, como é mostrado na Figura 4.3.

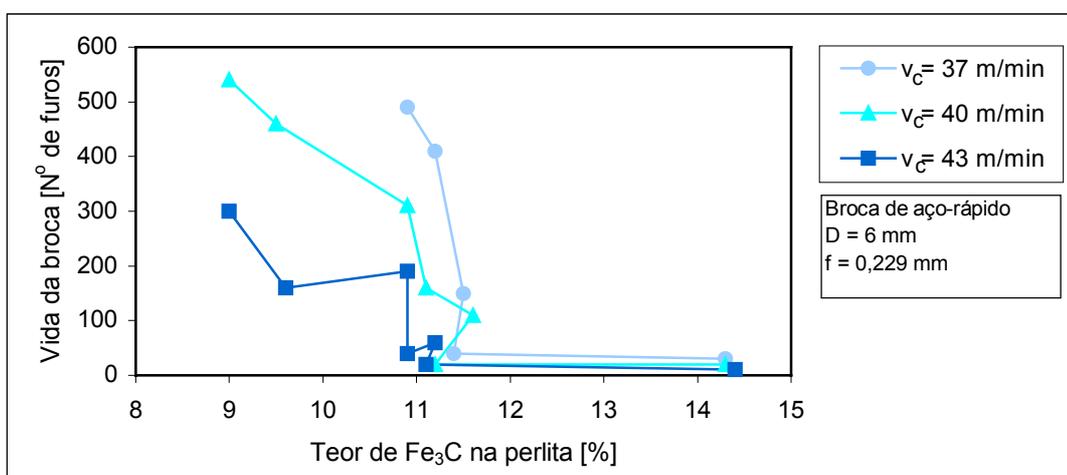


Figura 4.3: Redução da vida da ferramenta com o aumento da quantidade de cementita na fase de perlita no ferro fundido cinzento (Bates, 1996).

Mocellin (2002a), em sua dissertação, realizou ensaios avaliando os teores de elementos perlitizantes e o tempo de desmoldagem. Em seus experimentos, ele utilizou duas ligas com a mesma composição química, modificando apenas o tempo de desmoldagem, que passou de 20 min para 2 horas. A liga com menor tempo de desmoldagem, citada no trabalho como Vermicular 4, apresentou a perlita com maior

proporção Fe_3C do que o Vermicular 5, fabricada com um tempo de desmoldagem de 2 horas, que tem maior dureza que o Vermicular 4.

Na comparação da usinagem, o maior tempo de desmoldagem aumentou em aproximadamente 25% o tempo de vida da ferramenta, como pode ser visto na Figura 4.4.

Isto pode ser explicado pelo fato de que o aumento do tempo de resfriamento permite a difusão do carbono para as regiões de grafita, fazendo com que a austenita permaneça com menores quantidades de carbono e acarrete uma menor espessura das lamelas de Fe_3C (Mocellin, 2002a).

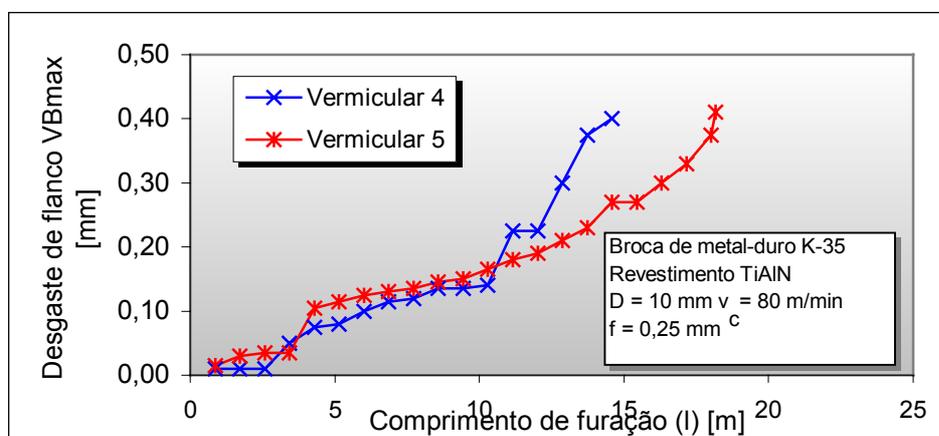


Figura 4.4: Resultado de usinabilidade variando os tempos de desmoldagem das ligas de vermicular (Mocellin, 2002a).

4.1.3 Proporção de perlita/ferrita

A quantidade de perlita e ferrita tem uma influência direta nas propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos. Ela determina a tensão limite de resistência; a elongação e a dureza, sendo estes fatores importantes na formação do cavaco e desgaste da ferramenta (Dawson, 1998, Reuter et al.; 2000a).

Para fazer uma análise da influência desta proporção de perlita na matriz, Dawson (1998) preparou duas ligas distintas de CGI. A primeira apresentava uma estrutura 100% perlítica, assegurando que o CGI teria a mesma quantidade de perlita contida no ferro fundido cinzento padrão, e a outra continha uma estrutura 70% perlítica, garantindo a mesma dureza do ferro fundido cinzento padrão.

Nos ensaios de usinagem foram empregados dois tipos de materiais de

ferramentas, metal-duro e CBN. As condições utilizadas nos ensaios podem ser visualizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros de usinagem para o CBN e metal-duro nos testes de fresamento e torneamento

Tipo de ferramenta	Fabricante	Tipo de Inserto	Geometria	v_c [m/min]	f	a_p (mm)
Fresamento						mm/z
Metal-duro	Kennametal	CH 2	SNMA 1204ENEM	150	0,15	2,0
Metal-duro	Kennametal	CH 2	SNMA 1204ENEM	250	0,15	2,0
CBN	Sumitomo	BN 600	SNGN 120408	400	0,15	2,0
CBN	Sumitomo	BN 600	SNGN 120408	800	0,15	2,0
Torneamento						mm
Metal-duro	Kennametal	KC9120	SNMA 120408	150	0,3	0,2
Metal-duro	Kennametal	KC 9120	SNMA 120408	250	0,3	0,2
CBN	Sumitomo	BNX 10	SNGN 120408	400	0,3	0,15
CBN	Sumitomo	BNX 10	SNGN 120408	800	0,3	0,15

Os resultados obtidos por estes ensaios podem ser visualizados nas Figuras 4.5 (a) e (b).

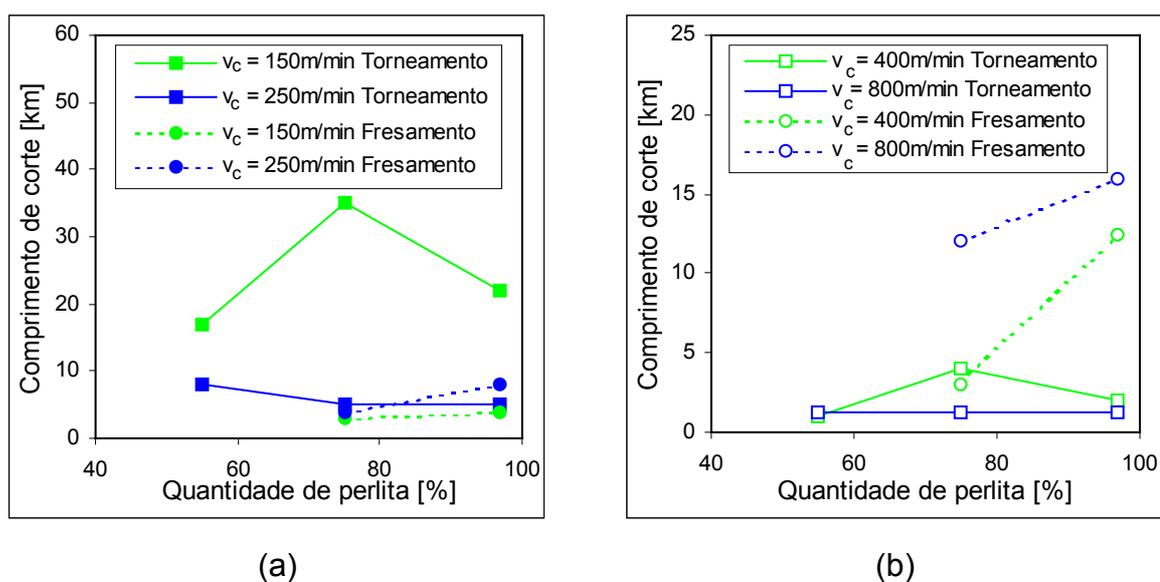


Figura 4.5: Vida da ferramenta em função da quantidade de perlita/ferrita na usinagem de vermicular: (a) ferramenta de metal-duro; (b) ferramenta CBN (Dawson et al. 1999).

Os resultados mostram que o rendimento do processo de fresamento utilizando ferramentas de CBN melhora com o aumento da quantidade de perlita e também da velocidade de corte. Um aumento da quantidade de perlita de 70-80% para 95% gera uma melhora na vida das ferramentas de metal-duro de 2-3 vezes, enquanto que no CBN aumenta seu rendimento de 1,5-3 vezes. As vidas das ferramentas durante as baixas velocidades de corte no torneamento (150 m/min para o metal-duro e 400 m/min para o CBN) mostram-se maiores com um nível máximo de 75% de perlita.

Outra observação importante é que, dentro da faixa entre 70-100% de perlita, diminuindo a quantidade dela, verifica-se a melhora do desempenho do torneamento e piora do fresamento. Portanto, o diferente comportamento apresentado pelo fresamento e o torneamento em relação à variação da quantidade de perlita torna difícil determinar uma quantidade ótima de perlita, pois a melhoria do desempenho da usinagem do CGI por uma operação não pode ser em detrimento da piora de outra (Dawson, 1999).

4.1.4 Efeito dos estabilizadores de perlita

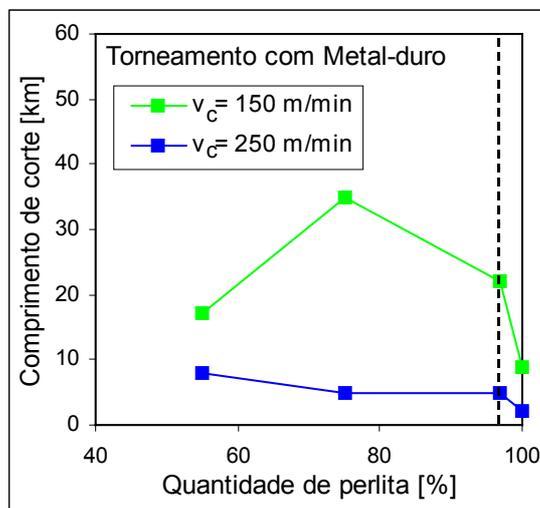
O CGI, quando comparado com o ferro fundido cinzento, apresenta uma tendência ferritizante, causada pela baixa quantidade de oxigênio e enxofre, que facilita a deposição de átomos de carbono sobre as partículas de grafita em formação (Dawson, 1999). Assim, elementos como: cobre, estanho, manganês e antimônio são adicionados como perlitizantes na liga.

Para avaliar os efeitos destes elementos perlitizantes, algumas ligas foram produzidas com base na combinação de elementos normalmente utilizados na estabilização da perlita, como o cobre (Cu) e o estanho (Sn); ora adicionando manganês (Mn), ora antimônio (Sb).

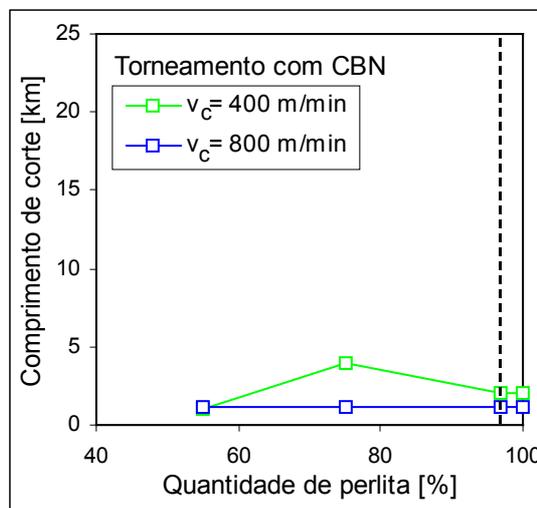
Os resultados dos testes de torneamento utilizando ferramentas de metal-duro e CBN, com suas respectivas velocidades de corte, podem ser visualizados na Figura 4.6.

Na análise dos dados, o material contendo 100% de perlita reduziu a vida da ferramenta de metal-duro em cerca de 50%, quando comparado com o material com 97,5% de perlita. A diferença de usinabilidade mostrada é atribuída pelos autores não ao aumento de 2,5% de perlita, e sim aos efeitos dos elementos perlitizantes na

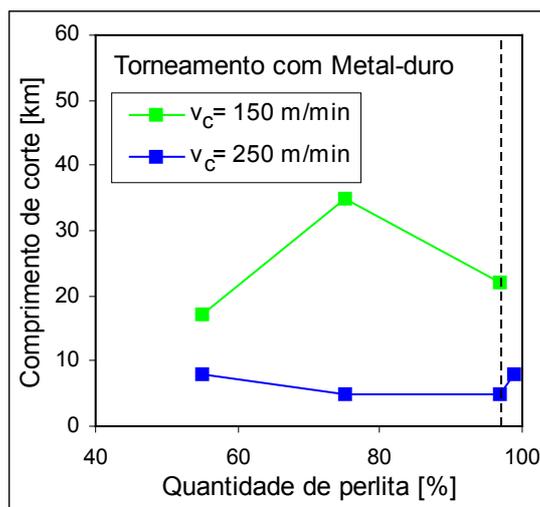
composição da cementita e na microdureza da ferrita, entre outras variações (Dawson, 1999).



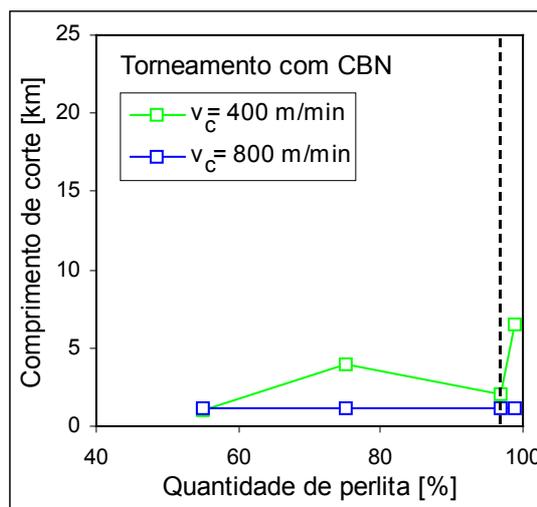
(a) (Cu+Sn) + Mn Perlita %



(b) (Cu+Sn) + Mn Perlita %



(c) (Cu+Sn) + Sb Perlita %



(d) (Cu+Sn) Perlita %

Figura 4.6: Efeito do aumento da proporção de silício: (a) e (b) 100%, devido à adição do manganês; (c) e (d) 99%, devido ao Sb, Cu e Sn (Dawson et al., 1999).

A liga que sofreu adição de antimônio, utilizando ferramenta de metal-duro e com velocidade de corte alta, mostrou um pequeno aumento na vida. A comparação deste resultado com o resultado obtido utilizando velocidades de corte baixa para o metal-duro não foi concluída até o momento da publicação.

Quanto à aplicação da ferramenta de CBN no material com antimônio, ocorreu

um pequeno aumento do tempo de vida quando utilizada velocidade de corte baixa, mas não apresentou alteração na usinagem com velocidade de corte alta. Em todos os ensaios realizados, o metal-duro obteve um desempenho superior ao CBN, sendo que o referido pesquisador não encontrou uma explicação plausível para este desempenho superior.

Neste trabalho de Dawson (1999), um fato que chama a atenção é que, quando o CGI apresenta quantidade de perlita de aproximadamente 75%, observa-se um aumento na vida das ferramentas, fato não explicado pela literatura consultada.

Mocellin (2002a) alterou os valores de Cu de 0,6% para 1,2% na liga e percebeu um aumento significativo na proporção de perlita. A liga descrita por ele como Vermicular 3₂, com 39% de perlita (0,6% de Cu), propiciou uma vida maior à ferramenta que a liga descrita como Vermicular 4, com 84% de perlita (1,2% de Cu). Estes resultados são mostrados na Figura 4.7.

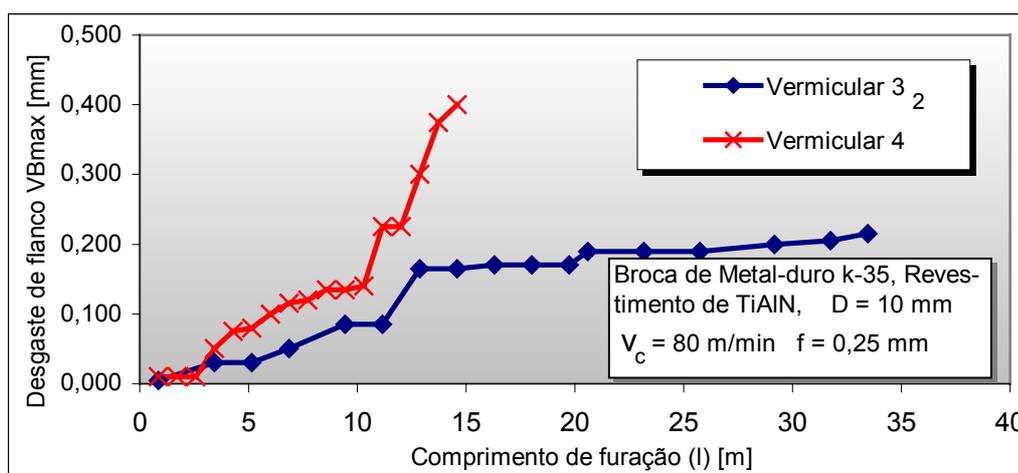


Figura 4.7: Vida da ferramenta em função da quantidade de Cu na liga mantendo o mesmo tempo de desmoldagem (Mocellin, 2002a).

De acordo com o autor, não se pode afirmar que a vida da ferramenta diminui com o aumento da porcentagem da perlita, pois a relação não é válida para qualquer situação (Mocellin, 2002a).

4.1.5 Efeito do silício

É sabido que um ferro fundido vermicular contém usualmente de 2-2,4% de

silício, e que uma redução na quantidade de elementos perlitizantes pode aumentar sua concentração para níveis acima de 3%, formando uma liga de CGI com matriz totalmente ferrítica. Essa concentração elevada de silício tende a endurecer a ferrita, aumentando significativamente a sua dureza e a resistência da liga.

Para avaliar o efeito da adição de silício na liga, testes de torneamento foram realizados por Dawson (1999) com corpos de prova de CGI obtidos com valores entre 3,0% e 4,0 % de silício. Os resultados obtidos foram comparados com um ferro fundido vermicular padrão, estabilizado com cobre e estanho. Na Figura 4.8 encontram-se os resultados dos experimentos com a devida comparação.

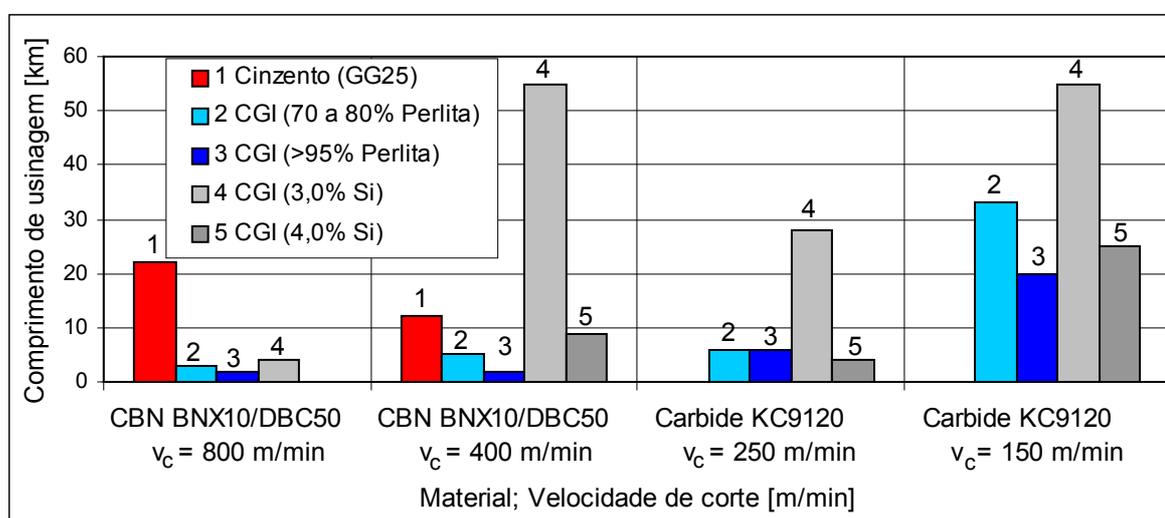


Figura 4.8: Efeito do teor de silício do CGI na vida da ferramenta no torneamento (Dawson et al., 1999).

Os resultados obtidos ressaltam que a usinabilidade do CGI é melhorada com a adição de 3,0% de silício, mas a sua dureza e sua resistência mecânica (386 MPa) são demasiadamente afetadas, isto é, diminuídas para aplicações em blocos de motores. Na liga que continha 4,0% de silício, a resistência mecânica se apresentou satisfatória, alcançando valores na ordem de (500 MPa). Como ponto negativo, mostrou uma redução da sua usinabilidade e uma perda em torno de 15% na sua condutividade térmica (Dawson, 1999).

4.1.6 Efeito do enxofre

O enxofre, juntamente com o manganês, formam o sulfeto de manganês (MnS),

composto capaz de melhorar a usinabilidade da liga que o contém. Este resultado foi demonstrado por Boehs (1979) e, mais recentemente, por Reuter (2000), que observou que a melhor usinabilidade do ferro fundido cinzento, quando comparado ao vermicular, deve-se à formação de uma camada lubrificante que adere à face da ferramenta, protegendo-a contra a oxidação e difusão.

Na pesquisa realizada por Dawson (1999), ficou provado que nos vermiculares não se observa a formação da camada lubrificante. A razão é o baixo teor de enxofre residual presente nos vermiculares, dez vezes menor do que o apresentado no ferro fundido cinzento. Outro fator importante constatado é que o enxofre residual no vermicular combina-se preferencialmente com o magnésio - elemento nodulizante - não ficando quantidade suficiente para se combinar com o manganês e formar a camada de MnS sobre a ferramenta.

4.1.7 Efeito das inclusões

Os ensaios realizados nesta categoria para melhorar a usinabilidade do CGI buscaram transformar as inclusões de alta dureza em inclusões de menor dureza, para que pudessem aderir na superfície da ferramenta, protegendo-a dos mecanismos de desgastes.

Assim, duas ligas foram produzidas (Dawson, 1999). A primeira teve sua seqüência de adição de elementos liga modificada para evitar a formação de silicato de magnésio, que exibe uma dureza média. Este método gerou inclusões com durezas menores, mas seu efeito benéfico sobre a qualidade da liga foi insignificante frente à maior dificuldade de fabricação do CGI.

Na segunda liga fabricada, procurou-se gerar uma camada de filme protetor a partir de inclusões contidas no material. A camada de filme protetor foi gerada pelas inclusões somadas ao efeito da influência do mecanismo de corte, pois no ferro fundido cinzento, quando utilizadas altas velocidades de corte, um filme protetor sobre a ferramenta é gerado. A formação deste dá-se por dois fatores: a presença de MnS e ao fato de que, em altas velocidades, a natureza frágil do ferro fundido cinzento provoca uma fenda no material acima do contato do gume da ferramenta. Deste modo, o contato da ferramenta é intermitente, havendo intervalos nos quais não existe contato abrasivo sobre a ferramenta.

Durante este período sem contato, as inclusões que estão sobre a ferramenta

têm a oportunidade de aderir fortemente a ela, antes do próximo contato abrasivo. Como o CGI tem uma natureza mais dúctil que o cinzento, é natural que exista um maior contato abrasivo entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho, não permitindo a aderência das inclusões devido ao constante contato abrasivo.

Em materiais dúcteis como os aços ao carbono e os aços inoxidáveis, as inclusões de MnS se depositam sobre a ferramenta durante a usinagem à baixa velocidade. Nesta ação, não se deve descartar, como fator formador da camada de MnS, a maior quantidade destas inclusões presentes nestes aços. Uma análise que reforça a idéia de que a abrasão tende a impedir a formação do filme protetor é que, com o aumento da velocidade de corte nos aços, ocorre uma redução na formação do filme protetor, o que fortalece a hipótese de que a abrasão impede a sua formação (Dawson et al., 1999).

4.1.8 Efeito do titânio e do cromo

Estes dois elementos podem ser introduzidos na liga através da adição da matéria-prima, como, por exemplo, sucata. Na liga, eles podem agir causando a degeneração da forma da grafita, o cromo aumenta a quantidade de Fe_3C ou forma inclusões abrasivas.

O titânio pode estar contido na liga basicamente sob três formas:

1º na adição de matéria-prima, aparecendo com teores entre 0,005 – 0,02% de titânio.

2º quando ele é adicionado intencionalmente para aumentar a resistência ao desgaste apresentando teores na faixa de 0,04 – 0,07% de titânio.

3º quando ele é adicionado intencionalmente, mas com a função de estabilizar a forma da grafita em CGI. Normalmente quando adicionado para esta função, a porcentagem de titânio presente na liga está entre 0,10 – 0,25%. A Figura 4.9 mostra o desgaste de uma ferramenta de metal-duro em um processo de torneamento avaliada para as velocidades de 150 e 250 m/min.

Como ilustra a Figura 4.9, a vida da ferramenta diminui drasticamente com o aumento do teor de titânio na liga (Dawson et al., 1999; Guessser; 2001).

Já o cromo é adicionado à liga para aumentar a resistência à tração sob elevadas temperaturas. O cromo é um potente formador de perlita e age aumentando a solubilidade do carbono no ferro. Desta forma, a liga contendo carbono possui uma

maior probabilidade de coquilhamento e formação de carbonetos, tais como $(Fe, Cr)_3C$. Dawson et al. (1999) recomendam que o teor de cromo esteja abaixo de 0,08%, por ser um resíduo que forma carbonetos.

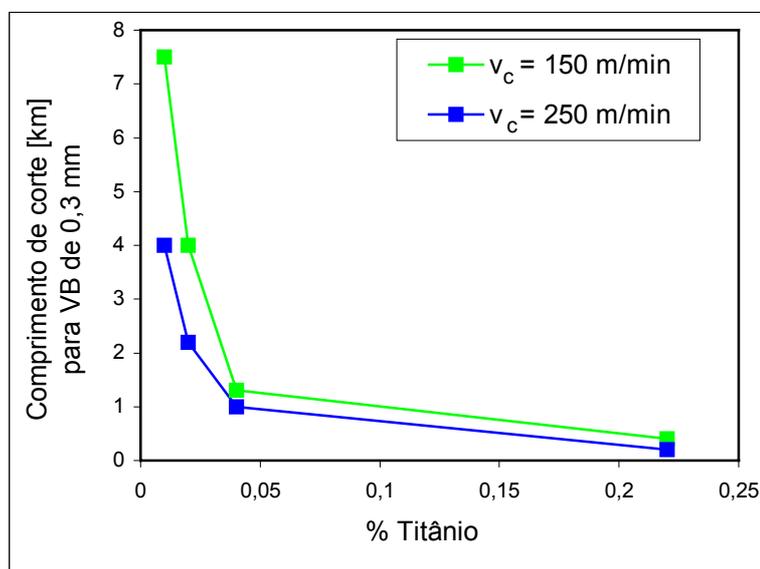


Figura 4.9: Ferramenta de metal-duro durante o torneamento do CGI variando a percentagem de titânio na liga (Dawson, et al., 1999; Guessser, 2001).

4.2 Desenvolvimento dos materiais das ferramentas

Dentre as várias pesquisas desenvolvidas ao longo dos últimos anos, muitas estão focadas no aprimoramento das ferramentas utilizadas para os processos empregados na fabricação de blocos de motores, como furação, fresamento, mandrilamento e brunimento.

Dado o foco do presente trabalho, usinagem do ferro fundido vermicular, serão mostradas informações referentes a pesquisas realizadas sobre o processo de mandrilamento e torneamento do referido material.

É importante lembrar que o processo de torneamento não é utilizado na usinagem de blocos de motores, mas dada a sua simplicidade, possibilita que seus resultados sejam usados em outros processos de corte contínuo. É o caso, por exemplo, do mandrilamento, que, na usinagem do vermicular, é tido como o processo mais crítico, concentrando um grande número de pesquisas.

Um dos primeiros trabalhos analisando a usinabilidade do vermicular, utilizando

diferentes tipos de ferramentas, foi realizado por Phillips (197-). Neste trabalho usinou-se uma liga de vermicular perlítico com ferramentas de metal-duro à base de carboneto de tungstênio, e também cerâmica de óxido de alumínio com e sem revestimento de WC.

Os resultados obtidos por Phillips (197-) indicam que o melhor desempenho na usinagem do ferro fundido vermicular perlítico é obtido com o uso da ferramenta de metal-duro. Os resultados dos ensaios realizados por Phillips são mostrados na Figura 4.10.

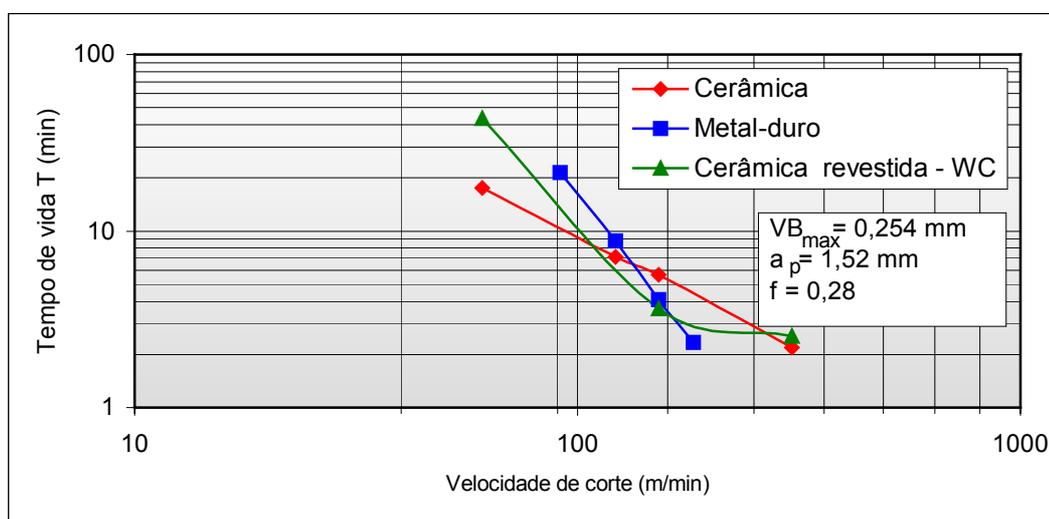


Figura 4.10: Vida das ferramentas para corte contínuo do ferro fundido vermicular perlítico (Phillips, 1982).

Recentemente, testes de torneamento em ferros fundidos cinzento e vermicular foram realizados no PTW em Darmstad, Alemanha, utilizando diversos tipos de materiais de ferramentas. As ligas de ferro fundido usinadas apresentavam teores de perlita baixos (LP = 50% perlita) e altos (HP= 95%). Os resultados são destacados na Figura 4.11.

Desta pesquisa, dois dados importantes e que possibilitaram o desenvolvimento de novos processos de corte foram extraídos: 1º a diferença entre o cinzento e o vermicular é mais marcante em altas velocidades; 2º o metal-duro revestido alcança apenas 50% da vida obtida, quando comparado com a usinagem do cinzento. Este resultado é obtido justamente utilizando velocidades de corte mais baixas.

Reuter et al (1999c), estudando os mecanismos de desgastes nas ferramentas, concluíram que o CGI é 33% mais abrasivo e 15% mais adesivo que o ferro fundido

cinzento. A combinação do aumento da abrasividade e da resistência à fricção ajuda a explicar por que as vidas das ferramentas utilizadas na usinagem do CGI alcançam apenas 50% do tempo de vida de um ferro fundido cinzento.

Apesar disso, esses 50% são considerados um bom resultado, pois o CGI possui o dobro da resistência mecânica do cinzento. Porém, o uso da tecnologia de corte convencional pode não atingir a produtividade necessária em uma linha de produção, significando maiores investimentos em máquinas, espaço físico e mão-de-obra.

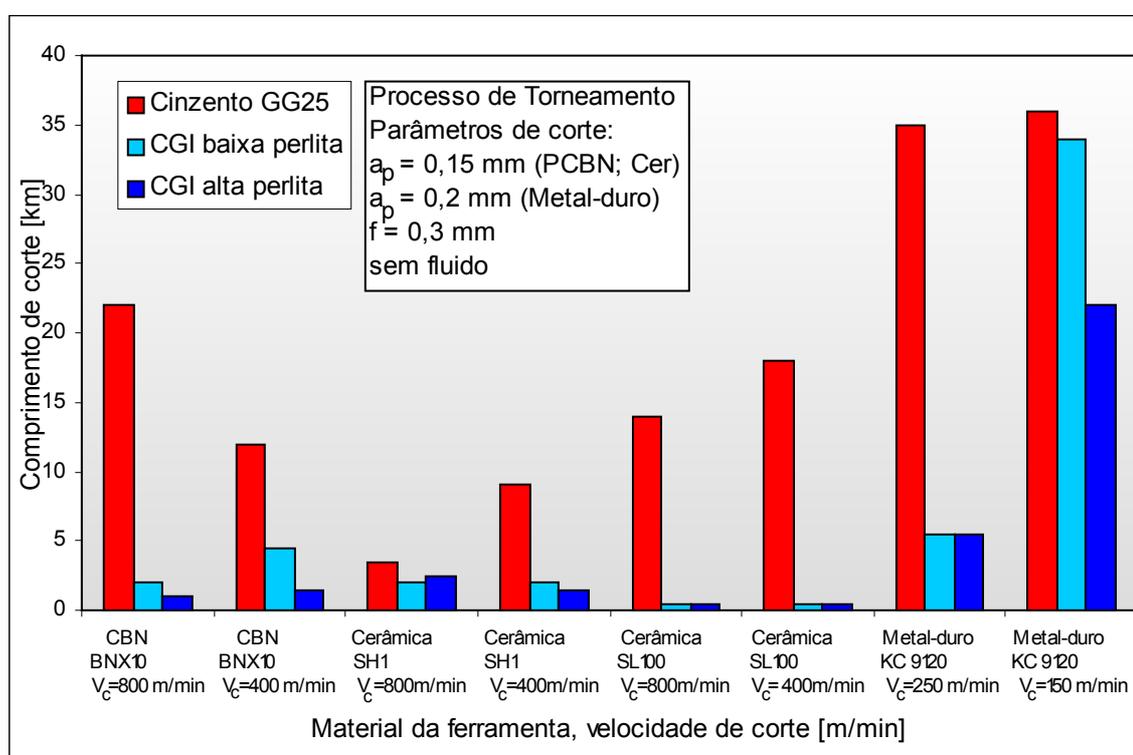


Figura 4.11: Teste de torneamento em vermicular (alta e baixa proporção de perlita) comparado com cinzento (Reuter et al., 2000; Gastel et al., 2000)

Seguindo esta mesma linha de pesquisa, várias empresas fabricantes de ferramentas também desenvolveram suas próprias pesquisas, buscando possíveis soluções para a usinagem do ferro fundido vermicular.

4.2.1 Usinagem com ferramenta de metal-duro

Diante dos resultados já apresentados, constata-se que o metal-duro tem um

papel muito importante no processo de superação das dificuldades na usinagem do ferro fundido vermicular. Dos três materiais testados e citados na literatura - CBN, metal-duro e cerâmica - o metal-duro tem proporcionado os melhores resultados, principalmente quando utilizado com velocidades de corte baixas – 120 a 150 m/min (Reuter, 1999; Leuze, 2000; Borrmann, 2000).

Estudos realizados por Reuter (2000b), utilizando ferramentas de metal-duro designadas por KC9120 e comparando duas velocidades de corte - uma alta $v_c = 250$ m/min e uma baixa $v_c = 150$ m/min - mostram um aumento significativo na vida da ferramenta quando usando uma velocidade de corte mais baixa. Os resultados são apresentados na Figura 4.12.

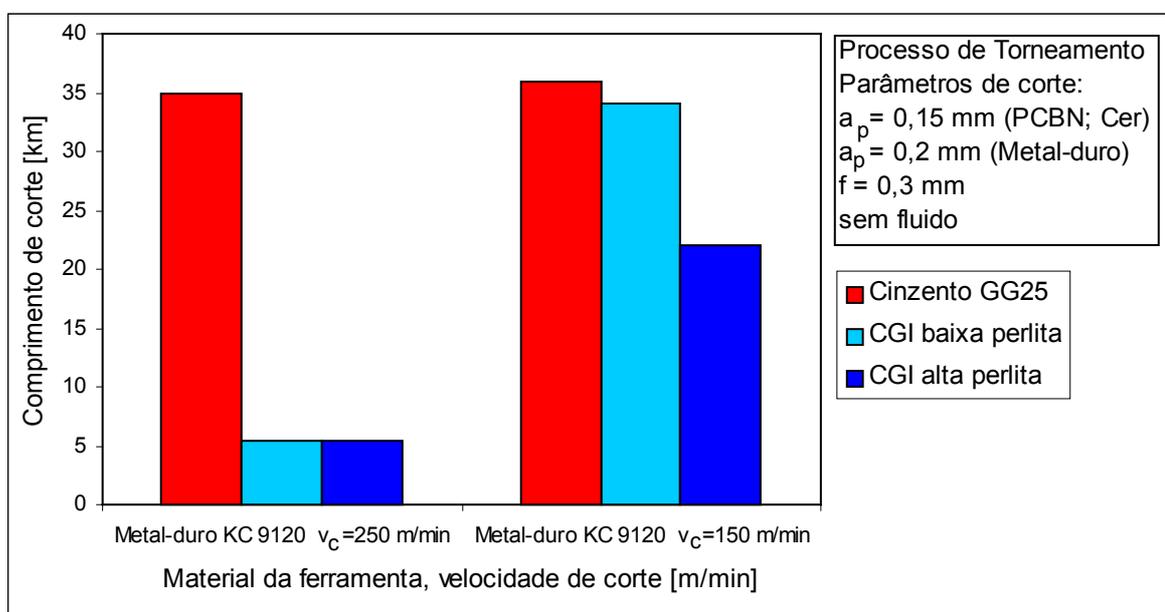


Figura 4.12: Comparação dos tipos de ferramentas em velocidades diferentes usando diferentes ligas de ferro fundido (Reuter, et al., 2000).

Os resultados da Figura 4.12 que expressa a vida da ferramenta em [km], quando transformados para minutos, seriam o equivalente a 153 minutos.

Quanto ao estado atual da pesquisa em usinagem no setor privado, pode-se citar ainda alguns dados dispersos, apresentados em “*Workshop’s*” realizados nos últimos três anos, que mostram a vida obtida pela ferramenta em função do número de cilindros de blocos de motores usinados. Todavia, a avaliação destes resultados é difícil devido às diferenças no comprimento e diâmetro dos cilindros; à falta de informação sobre a liga usinada; e à falta de padronização na apresentação dos

resultados obtidos.

A Komet GmbH realizou testes de torneamento, usinando uma liga de CGI com 0,018% Ti, sem refrigeração, utilizando uma série de ferramentas de metal-duro com velocidade de corte na ordem de 120 m/min, alcançando uma vida de aproximadamente 43 km de comprimento de corte, que equivale a aproximadamente 5 horas e 58 minutos (Leuze, 2000). Os resultados podem ser visualizados na Figura 4.13.

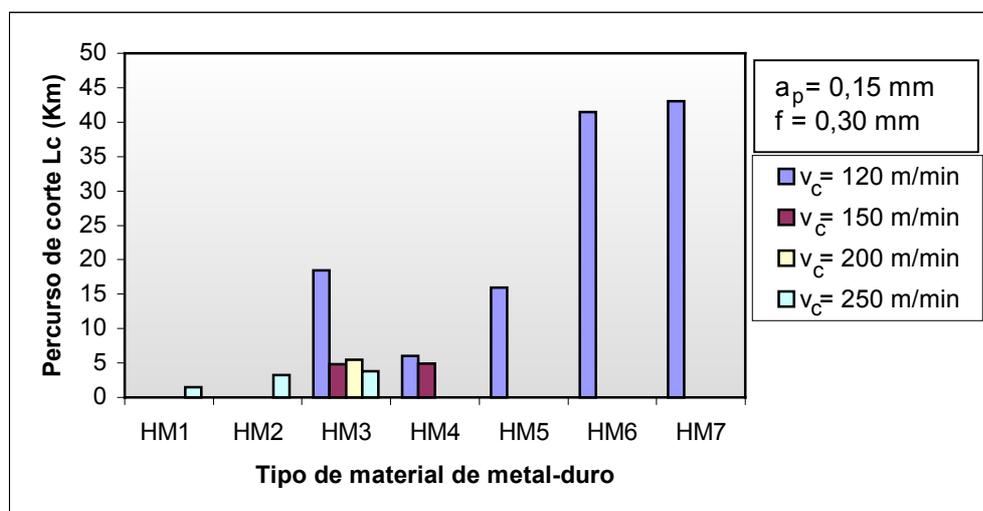


Figura 4.13: Percurso de corte em quilômetros obtidos com diferentes tipos de metal-duro variando a velocidade de corte (Leuze, 2000).

Os fatores que proporcionaram o excelente desempenho da ferramenta não estão explicados na literatura consultada.

Já outro trabalho, publicado no mesmo ano, e realizado pela empresa Kennametal Hertel (Bormmann, 2000), mostra os resultados obtidos pela usinagem de uma liga de CGI com menos de 0,025% de titânio e com mais de 75% de perlita na matriz da liga. Os experimentos foram realizados com tipos característicos de metal-duro, revestidos através do processo de PVD multi-camadas, com camadas de TiC, Al₂O₃ e TiN, que não foram identificadas no trabalho. Como parâmetros de entrada da usinagem, foram utilizados: velocidades de corte de 180 m/min, avanço de 0,2 mm e 2 mm de profundidade de corte (Figura 4.14). Como critério de fim da vida, foi determinado um desgaste de quina da ferramenta igual a 0,3 mm.

A ferramenta especificada como KC9315 apresentou uma vida de aproximadamente 17 min, até atingir a marca especificada de desgaste de flanco.

As mesmas ferramentas foram testadas com velocidade de corte igual a 120 m/min e mantendo os mesmos valores de avanço e profundidade de corte. Os resultados podem ser visualizados na Figura 4.15.

Nestas condições, fica clara a influência do aumento da velocidade de corte no desgaste da ferramenta. É possível observar que, com velocidades baixas, as ferramentas atingem uma vida maior, tendo também um desgaste de quina mais estável do que o observado com velocidades de corte maiores. Isso é mostrado na Figura 4.14.

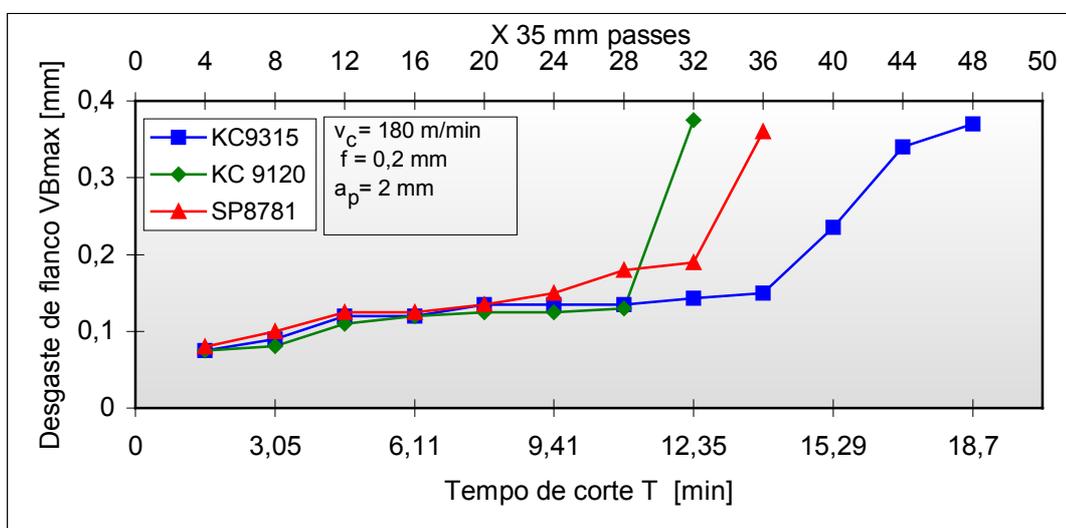


Figura 4.14: Desgaste de quina para diferentes tipos de metal-duro revestidos na operação de torneamento (Bormmann, 2000)

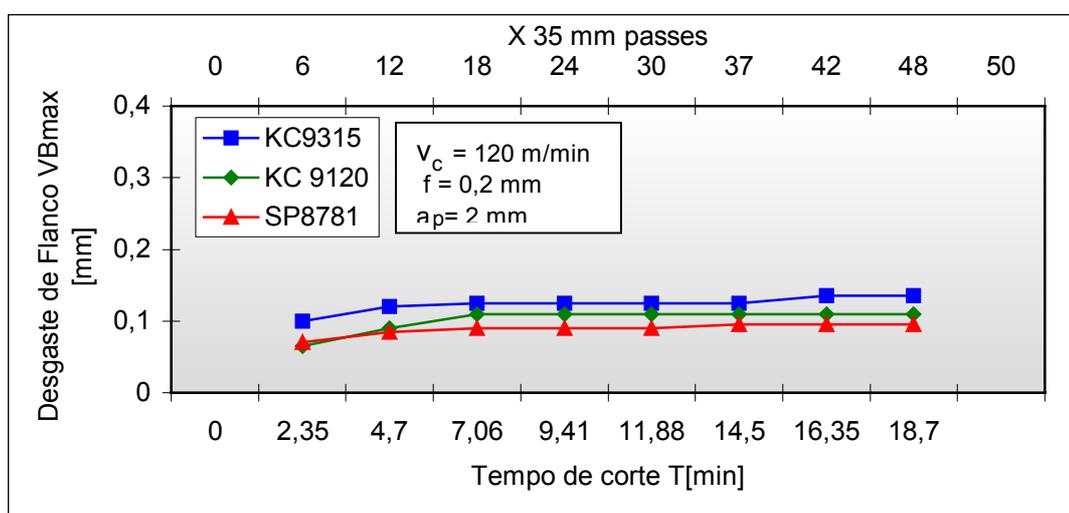


Figura 4.15: Desgaste de quina para diferentes tipos de metal-duro revestidos na operação de torneamento com velocidade de corte baixa (Bormmann, 2000).

Outra confirmação obtida por Bormmann foi que, aumentando a porcentagem de titânio na liga, tem-se um decréscimo na vida das ferramentas de metal-duro. Isto se deve, como explicado anteriormente, ao fato de o titânio reagir com o carbono e o nitrogênio formando carbonitretos de titânio. O carbonitreto apresenta elevada dureza, agindo na usinagem como elemento abrasivo. Isso, somado ao efeito do aumento da velocidade de corte, reduz significativamente a vida da ferramenta (Figura 4.16).

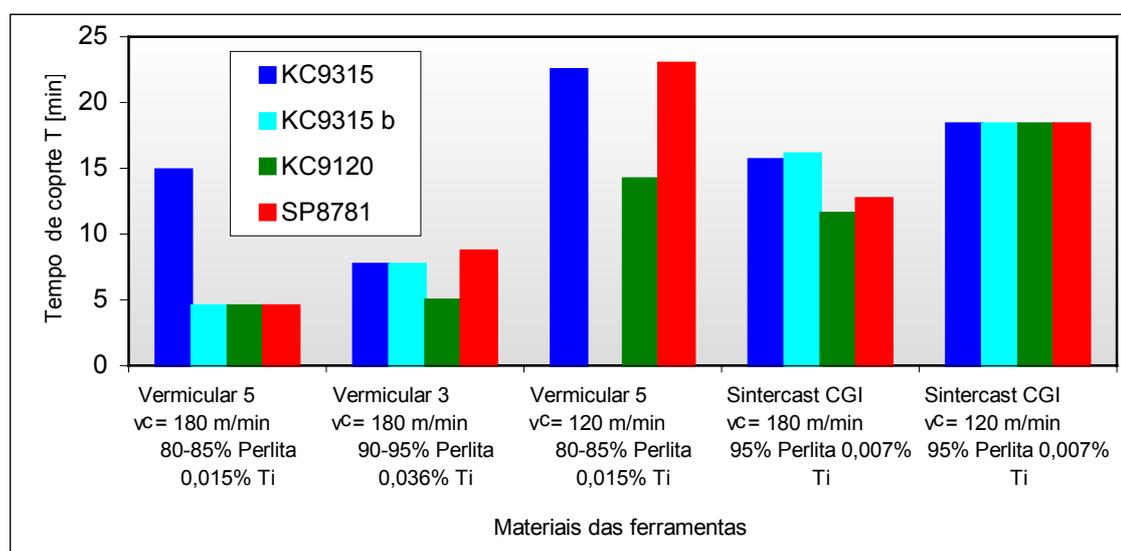


Figura 4.16: Tempo de vida para diferentes tipos de ferramentas de metal-duro variando a velocidade de corte e o percentual de titânio (Bormmann, 2000).

Neste trabalho também não consta nenhuma explicação quanto aos mecanismos de desgaste atuantes ou possíveis soluções para a redução do desgaste das ferramentas.

Werthein (2002), em trabalho realizado pela Iscar Hardmetal Ind., apresentou alguns resultados satisfatórios com o uso de insertos de metal-duro com grão submicrométrico. Estes grãos, quando comparados com os metais-duros da classe K1C, mostram maior dureza, melhor resistência ao impacto, a cortes interrompidos, a trincas e lascas na usinagem a seco ou de materiais duros.

Como revestimento, foram usados TiN, Al₂O₃, TiCN e TiC, obtendo, assim, as vantagens que cada composição confere à camada, conforme descrito no item 3.4.1.

Para a realização dos testes quatro tipos de metais-duros foram utilizados. Estes são mencionados na Tabela 4.2.

Todas as ferramentas foram testadas sob as mesmas condições de corte:

- $v_c = 150$ m/min
- $a_p = 0,2$ mm
- $f = 0,3$ mm
- sem fluido de corte.

Os corpos de prova apresentavam a mesma composição com uma porcentagem de perlita entre 90-95%. A composição pode ser vista na Tabela 4.3.

Tabela 4.2: Especificação do substrato do metal-duro, geometria, tipo de revestimento, espessura do revestimento e chanfro/raio da ferramenta.

Metal-duro	Geometria	Substrato	Revestimento (μm)	Chanfro/raio
IC 9007	SNU 432 T	Submicron	9 TiN/TiCN+3 Al_2O_3 +1 TiN	0,209x15
IC 9007	SNU 432	Submicron	9 TiN/TiCN+3 Al_2O_3 +1 TiN	R-0,809
IC 907	SNU 432 T	Submicron	9 TiN/TiCN+3 Al_2O_3 +1 TiN	0,175x15
concorrente	SNMA 432	Médio	7 TiN/TiCN+3 Al_2O_3 +1 TiN	R -0,062

Obs: O T significa o uso de chanfro no gume da ferramenta.

Tabela 4.3: Composição dos corpos de prova em %.

C	Si	Mn	S	Cr	Mg	Cu	Sn	Ti
3,67	2,2	0,41	0,014	0,03	0,009	0,89	0,084	0,013

Nos testes realizados, utilizou-se como critério de fim de vida a marca de desgaste de flanco $VB = 0,3$ mm e a rugosidade $R_z = 25$ μm . Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 4.17 e 4.18, respectivamente.

Na figura 4.17, é possível notar que utilizando o inserto IC 9007 SNU 432, com afiação micro-geométrica, obtém-se uma vida muito maior do que utilizando os insertos contendo chanfros de $0,2 \times 15^\circ$, que foram representados nos ensaios pelas ferramentas SNU 432T, onde a diferença dos valores obtidos é de aproximadamente 150%.

O resultado satisfatório, segundo o autor, foi devido ao tamanho do grão e pela combinação dos efeitos do TiCN, TiAlN e Al_2O_3 . A afiação do gume de forma especial propiciou também menor força, gerando menos calor, com conseqüente redução da influência térmica. Dos mecanismos de desgaste presentes durante a

usinagem, o autor cita como desgaste predominante a abrasão.

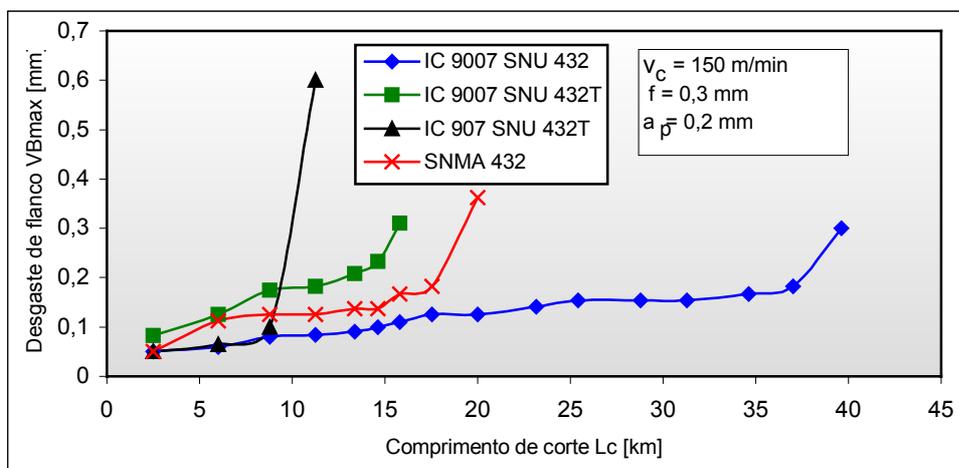


Figura 4.17: Comparação da média de desgaste de flanco VB (Werthein, 2002).

Quanto ao resultado da rugosidade R_z , observa-se que quase todas as ferramentas, ao final do tempo de vida, também alcançaram o critério limite de R_z igual $25 \mu\text{m}$, menos a IC 9007 SNU 432T.

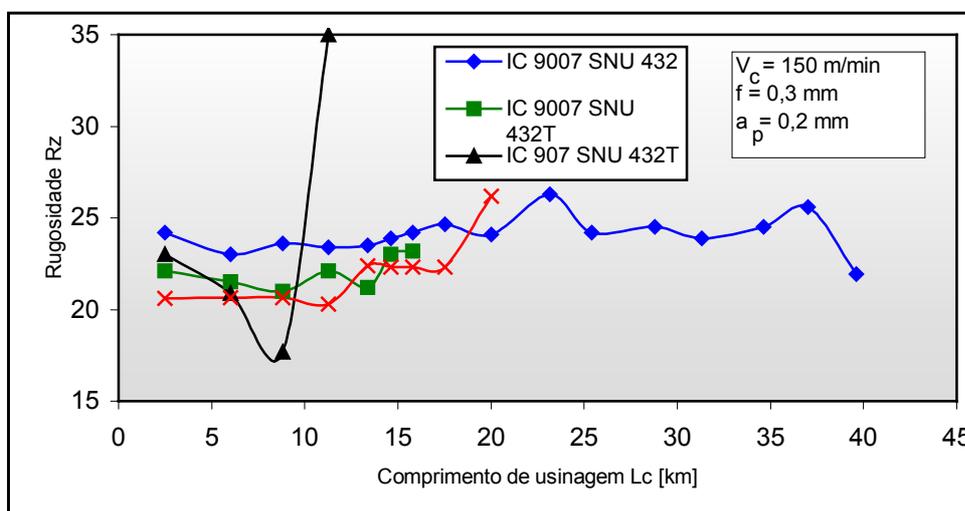


Figura 4.18: Comparação da média dos valores de rugosidade R_z .

4.2.2 Usinagem com ferramentas de CBN

Com o objetivo de aumentar a produtividade das linhas “transfer”, ensaios foram realizados utilizando altas velocidades de corte com PCBN (Sahm et al., 2002). Os primeiros estudos indicaram que o PCBN, usinando o CGI, levou a um tempo de

vida da ferramenta de apenas 10% do tempo alcançado quando da usinagem do ferro fundido cinzento, em operações de corte contínuo.

Devido aos problemas, foram feitas pesquisas sobre os mecanismos de desgaste que atuam na usinagem do ferro fundido vermicular com o PCBN.

Um dos estudos mais completos neste contexto foi o trabalho realizado por Gastel (2000) e Reuter (2000b), no qual dois diferentes tipos de CGI, um contendo 95% e outro 50% aproximadamente de perlita, foram comparados com dois tipos de ferro fundido cinzento, também com alto e baixo teor de perlita.

Como ferramentas, foram usados diferentes tipos de CBN provenientes das empresas De Beers e Sumitomo. Estas ferramentas foram submetidas a ensaios de oxidação, difusão e análises químicas.

Os ensaios de oxidação realizados mostraram que este mecanismo de desgaste está presente na usinagem do CGI com CBN e contribui significativamente para a degradação das ferramentas durante o corte. Nos ensaios de oxidação, os dois tipos de ferramentas apresentaram ganhos de massa, onde o primeiro tipo de CBN apresentou a formação de cristais frágeis de óxidos de titânio (TiO_2), cristais estes que são facilmente removidos pelo desgaste abrasivo; e o outro CBN apresentou a formação de alumina, o que caracteriza sua instabilidade. O efeito da oxidação pode ser visualizado na Figura 4.19.

Quanto ao ensaio de difusão, observou-se a difusão de elementos constituintes da ferramenta de CBN para a superfície usinada do CGI e do ferro fundido cinzento, fazendo com que ambos os corpos de prova mostrassem um enriquecimento do B, Ti e W nos primeiros 20 μm na superfície externa usinada.

Na análise realizada na ferramenta de CBN, também foi encontrado o enriquecimento nos primeiros 5 μm da superfície, porém, contendo Fe e Si. Este efeito, conforme o autor, não depende do tipo de CGI ou ferro fundido cinzento usado.

Assim, dado que a oxidação e a difusão na ferramenta estão presentes na usinagem das duas ligas usinadas com CBN e que não existe diferença significativa que poderia explicar esta drástica diferença de usinabilidade entre o CGI e o cinzento, uma análise sobre as ferramentas foi realizada.

Nessa análise, a ferramenta que usinou o CGI apresentou uma aderência de material composta basicamente por Fe, C e também oxigênio (O). No caso da ferramenta utilizada na usinagem do ferro fundido cinzento, observou-se uma fina

camada, contendo principalmente Mn e S (junto com Fe e C) nas ferramentas que usinaram com velocidades de corte altas ($V_c = 400$ m/min e 800 m/min). Desta maneira, concluiu-se que a camada de MnS formada sobre a ferramenta é gerada somente em velocidades de corte altas na usinagem do ferro fundido cinzento e devido à presença adequada desses elementos na liga. A Figura 4.20 ilustra as ferramentas utilizadas nos ensaios, com a camada de MnS sobre a ferramenta que usinou o ferro fundido cinzento e sem a camada na que usinou o CGI.

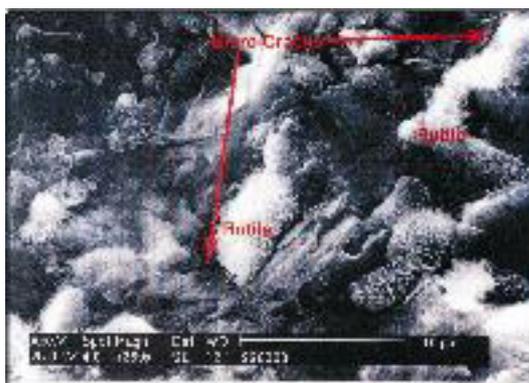
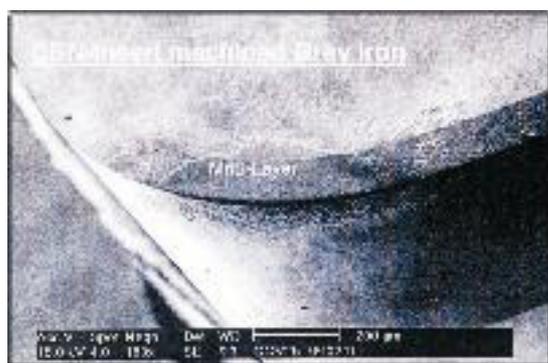
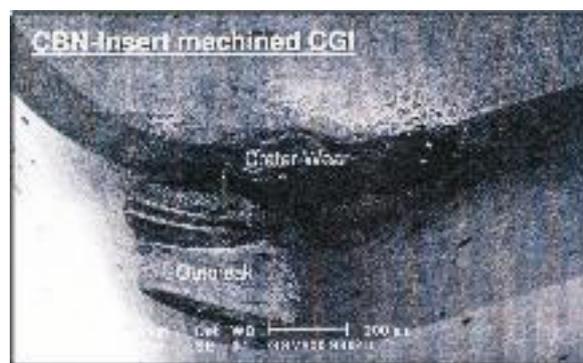


Figura 4.19: Formação do TiO_2 por oxidação (Reuter et al., 2000).

Deste modo, conclui-se que o ferro fundido cinzento possui melhor usinabilidade que o CGI usando ferramentas de CBN. A camada de MnS formada sobre a ferramenta age como um lubrificante, diminuindo a difusão e oxidação sobre a superfície do CBN, fato que explica a dificuldade em usinar o CGI.



(a)



(b)

Figura 4.20: (a) Formação da camada protetora de MnS sobre inserto de PCBN na usinagem do ferro fundido cinzento; (b) ausência da camada protetora na usinagem do ferro fundido vermicular (Reuter et al., 2000).

4.2.3 Usinagem com ferramentas de cerâmica

A utilização de cerâmica, em função dos resultados pouco positivos na usinagem do CGI, não tem recebido a mesma atenção que o metal-duro e o CBN, sendo encontrados na literatura apenas alguns trabalhos que confirmam seu rendimento inferior quando comparado com os resultados obtidos com as outras ferramentas.

Leuze (2000) realizou experimentos com ferramentas de cerâmicas em ensaios de torneamento. Na oportunidade, foram utilizadas ferramentas de corte da empresa Komet, usando uma liga de CGI contendo 0,018% de titânio.

As ferramentas foram designadas por 'Ker' variando o sufixo que as acompanhavam (ex. Ker1). Todas as ferramentas analisadas apresentavam a geometria: $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = -4^\circ$ e $\chi = 75^\circ$. Quanto aos parâmetros de entrada da usinagem, foi utilizado avanço igual a 0,3 mm e profundidade de corte 0,15 mm. As velocidades de corte empregadas foram de 250, 400 e 800 m/min (Figura 4.21).

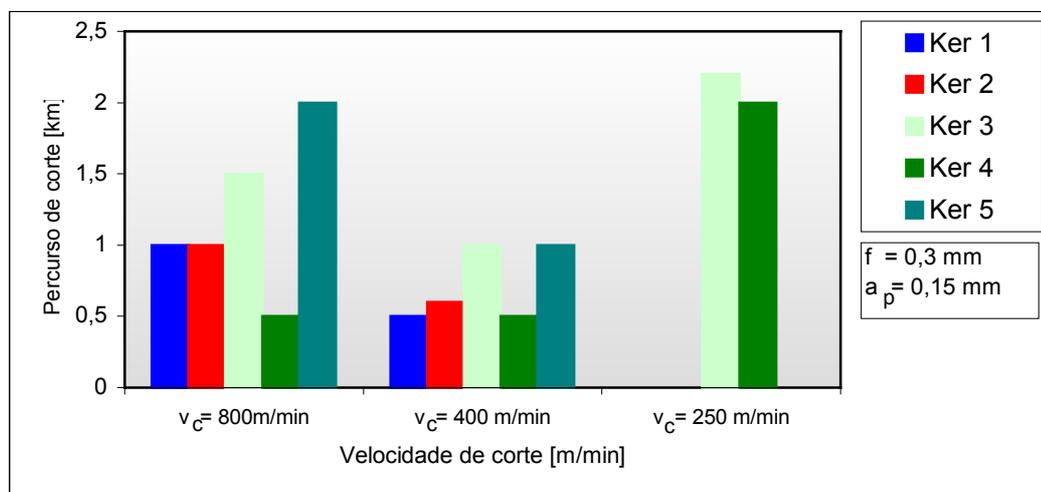


Figura 4.21: Percurso de corte obtido no torneamento de CGI utilizando diferentes tipos de cerâmicas com diferentes velocidades de corte (Leuze,2000).

Os resultados exibidos por Leuze (2000) apenas atribuem à ferramenta 'Ker 5' o melhor desempenho, não divulgando mais informações sobre a realização dos ensaios ou possíveis causas para explicar tal comportamento das ferramentas.

Em outros experimentos feitos por Reuter (2000b), testou-se a viabilidade das cerâmicas à base de Si_3N_4 (nitreto de silício) no corte contínuo. Os experimentos indicam um baixo desempenho destas ferramentas na usinagem do ferro fundido

vermicular quando comparado com os resultados obtidos por elas na usinagem do cinzento, como mostra a Figura 4.22 (Reuter, 2000b).

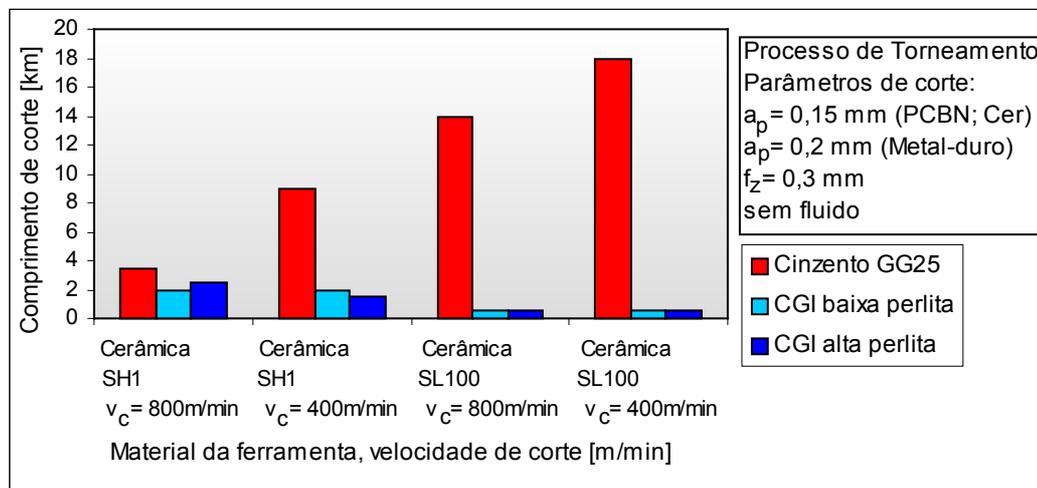


Figura 4.22: Comprimento de corte para ferramentas cerâmicas no torneamento do CGI (Reuter et al., 2000).

Por outro lado, no processo de fresamento, em testes realizados no PTW, fresando CGI, com baixa e alta proporção de perlita e comparando também com o ferro fundido cinzento, o corte interrompido não apresentou uma diferença tão significativa quanto a verificada no corte contínuo, destacado anteriormente. A Figura 4.23 ilustra o corte interrompido com cerâmicas à base de Si_3N_4 (Reuter, 2000b).

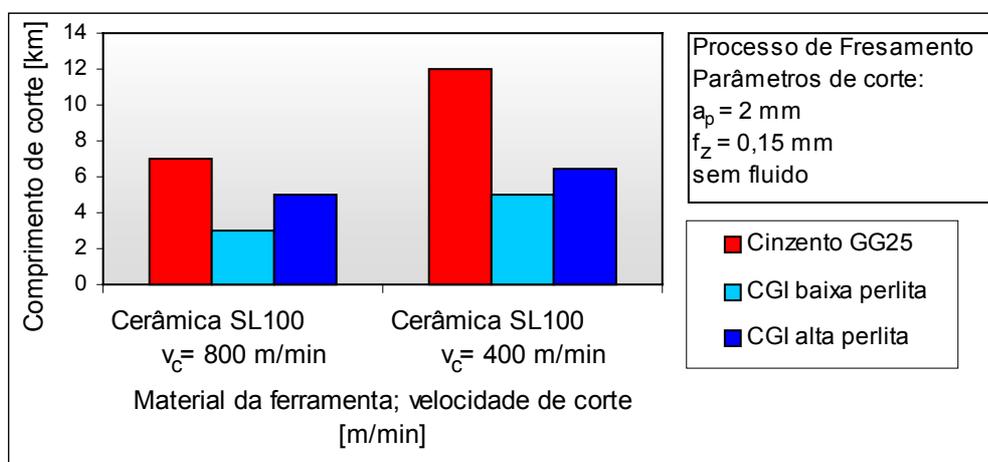


Figura 4.23: Comprimento de corte para ferramentas cerâmicas no fresamento do CGI (Reuter et al., 2000).

Os resultados mostram que no fresamento ocorre uma redução da vida da ferramenta no CGI para aproximadamente 50% em relação ao cinzento. Se estes resultados forem comparados com os mostrados na Figura 4.22, nestas mesmas condições de usinagem no processo de torneamento, a vida é equivalente a 5%.

Destes resultados apresentados, conclui-se que o fresamento, devido a sua característica de corte intermitente, faz com que a ferramenta não fique o tempo todo em contato, o que diminui a tendência de oxidação e difusão. Essa seria a provável causa que explica a diferença de vida tão grande entre os mesmos tipos de cerâmicas usinando CGI em processos de corte diferentes.

4.3 Melhoria das técnicas de usinagem

Em trabalhos realizados por outros autores como Kress (2000) e Leuze (2000), novamente o metal-duro apresentou desempenho superior aos outros materiais, quando condicionado a velocidades de corte baixas. Como esta condição compromete o tempo de fabricação, houve a necessidade de desenvolver novos conceitos de corte a fim de diminuir o tempo de fabricação.

Utilizando dados das pesquisas anteriores, algumas técnicas foram desenvolvidas:

- insertos múltiplos;
- insertos rotativos; e
- freso-mandrilamento.

4.3.1 Usinagem com insertos múltiplos

Pesquisas feitas por Kress (2000), na empresa Mapal, levaram a resultados similares aos até aqui discutidos, em que o metal-duro revelou um pequeno desgaste de flanco na operação de mandrilamento quando comparado com o CBN e cerâmica, como é mostrado na Figura 4.24. A ferramenta utilizada para mandrilar os cilindros possuía apenas um inserto de corte.

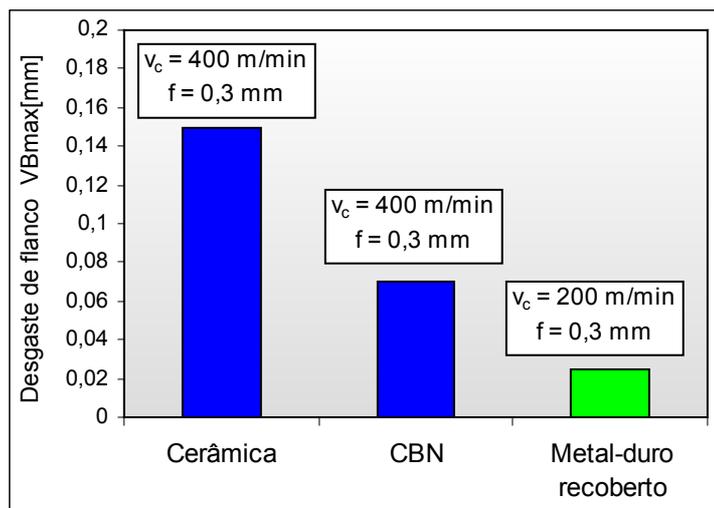


Figura 4.24: Desgaste de flanco após 64 cilindros usinados por ferramenta com um inserto (Kress, 2000).

O inconveniente do uso do metal-duro deve-se ao fato de que a sua velocidade de corte empregada é por volta de 50% menor que a velocidade usada com outros tipos de materiais de ferramentas, aumentando sensivelmente o tempo de usinagem.

Como contrapartida, para superar esta desvantagem, buscou-se aumentar o número de insertos de metal-duro, visando utilizar uma maior velocidade de avanço durante a usinagem e permitindo, assim, aumentar a produtividade. A Figura 4.25 ilustra o resultado alcançado com uma ferramenta de duas pastilhas de metal-duro, conforme mostrado por Kress (2000).

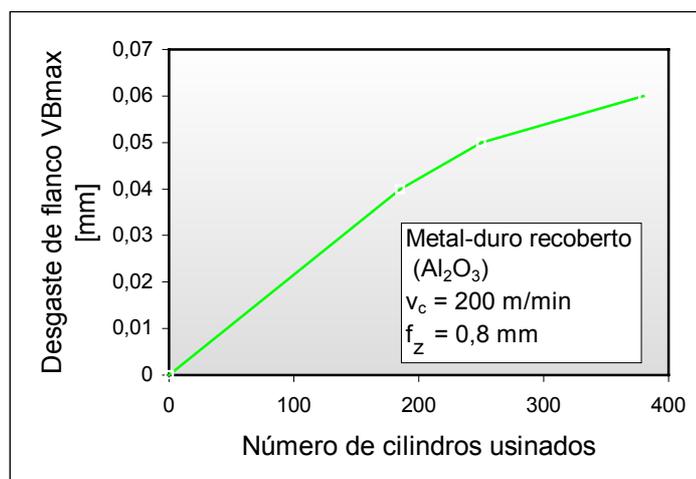


Figura 4.25: Desgaste de flanco no mandrilamento com duas pastilhas de metal-duro (Kress, 2000).

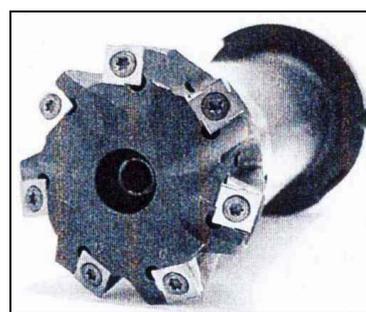
O conceito de corte desenvolvido consiste de um arranjo de múltiplos inserts escalonados, em que alguns inserts cortam relativamente com maior profundidade e outros inserts fazem um corte mais raso no segundo corte. Este arranjo protege o inserto final e permite à ferramenta manter os seus requisitos de cilindricidade e geometria no cilindro.

Várias outras pesquisas sobre o conceito de inserts múltiplos de corte foram desenvolvidas por outras empresas como a Kennametal, Komet-Dihart e Ingersoll (Figura 4.26). Com este aperfeiçoamento, as ferramentas trabalham com velocidades de corte entre 80 e 160 m/min, chegando a alcançar taxas de avanço na ordem de 700 mm/min (Reuter et al., 1999; Scheidtweiler, 2000; Borrmann, 2000).

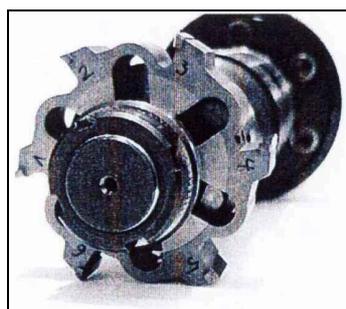
Como fator negativo ao uso desta técnica, está a necessidade de máquinas que possuam elevado torque para a realização das tarefas (Kruzynski, 2002).



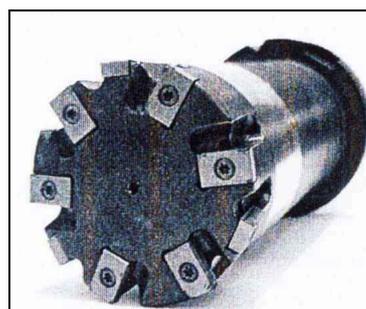
Mapal



Kennametal



Komet-Dihart



Ingersoll

Figura 4.26: Ferramentas de mandrilamento com inserts múltiplos de diferentes fabricantes.

4.3.2 Usinagem com Inserts Rotativos

O conceito e uso de inserto rotativo têm sido estudados nos últimos 50 anos e, recentemente, foram aperfeiçoados pela empresa Rotary Technologies Corp.

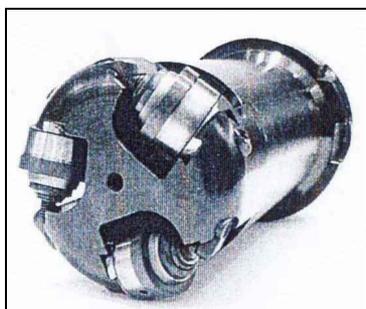
(Georgiou, 2002a).

Esta ferramenta possui algumas características especiais como: insertos de corte circulares e liberdade dos insertos rotacionarem em seus próprios eixos (Figura 4.27). Assim, eles são montados sobre um mancal com rolamento axial e radial, que, durante o processo de corte, devido às forças de usinagem tangencial ao inserto, ou por uma força externa independente, permitem que rotacionem livremente sobre o mancal (Amarego, 1993; Georgiou, 2002; Reuter, 2000b).

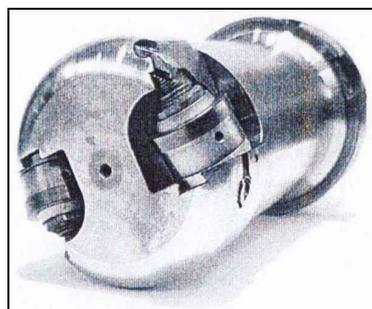
Esse conceito facilita a ação de corte e tem como grande vantagem a mudança contínua do gume, onde o corte aparentemente contínuo, passa a ser intermitente com uma sucessiva refrigeração na zona de corte, fazendo também com que a maioria do calor seja transmitido para o cavaco (Amarego, 1993).

Os ganhos obtidos por este processo são (Georgiou, 2002):

- menor temperatura;
- aumento da vida da ferramenta de corte (o desgaste abrasivo ocorre em toda a circunferência do inserto);
- menor força de corte e potência; e
- melhor acabamento das superfícies.



(a)



(b)

Figura 4.27: Ferramenta com insertos rotativos Rotary Technologies: (a) Desbaste (b) Acabamento (Reuter et al., 2000).

O uso destas ferramentas em operações de mandrilamento de cilindros possibilita a utilização de velocidades de corte entre 600 e 800 m/min e velocidade de avanço entre 2500 e 1700 m/min, para desbaste e acabamento, respectivamente.

Os resultados obtidos mostraram uma redução eficaz do desgaste das ferramentas e tempos de produção, tendo como contrapartida negativa a redução do diâmetro do cilindro apresentada ao longo do desgaste da ferramenta, o que torna

necessário o aprimoramento da tecnologia.

4.3.3 Usinagem com o processo freso-mandrilamento

Esta tecnologia de corte tem sido desenvolvida pela empresa Sandvik-Coromant e é caracterizada pela substituição do processo de corte contínuo pelo processo interrompido, em que a usinagem é realizada através de um fresamento helicoidal.

A ferramenta com um diâmetro menor que o do cilindro usinado – para poder realizar o movimento helicoidal - é constituída de seis insertos de metal-duro revestido. Os ensaios até aqui realizados com esta tecnologia utilizaram velocidades de corte entre 150 e 200 m/min e velocidades de avanço entre 1500 e 3000 mm/min (Thordenberg, 2000).

Até o momento, as ferramentas usadas no mandrilamento dos cilindros têm alcançado uma produtividade de 800 cilindros por gume, alcançando o pré-requisito para serem utilizadas nas atuais linhas de produção. Entretanto, essas ferramentas têm sido utilizadas para operações de desbaste, pois os valores das tolerâncias dimensionais alcançados ainda são inferiores aos obtidos com o uso de ferramentas com um único inserto.

4.4 Considerações finais

As recentes pesquisas têm demonstrado um significativo avanço relacionado aos resultados obtidos na usinagem do ferro fundido vermicular, especialmente no que se refere ao entendimento dos fatores que o diferenciam da usinabilidade do ferro fundido cinzento, bem como dos mecanismos de desgaste das ferramentas.

Assim, para explicar o pior desempenho das ferramentas usinando CGI quando comparadas com o ferro fundido cinzento, algumas causas são apresentadas como contribuintes fundamentais para este desempenho (Dawson, 1993; Reuter, 1999a; Dawson, 1999; Gastel, 2000; Guessier, 2001; Wertheim, 2002; Mocellin, 2002a):

- forma da grafita;
- o CGI é 30% mais abrasivo e 15% mais aderente que o ferro fundido cinzento;
- sua menor condutividade térmica leva a um maior aumento da temperatura no gume da ferramenta.

- ocorre o endurecimento da superfície usinada durante o resfriamento;
- na usinagem do CGI, não ocorre a formação da camada protetora de MnS sobre a ferramenta;
- a presença de inclusões duras reduz significativamente a usinabilidade da liga, como a ocasionada pelo Ti;
- o tipo da matriz da liga ferrítica ou perlítica, no caso a perlítica, causa um maior consumo de ferramentas; e
- o tipo do constituinte da perlita, se é uma cementita fina ou grossa, também afeta significativamente o desempenho das ferramentas.

A usinagem do ferro fundido vermicular é, portanto, uma solução de compromisso, englobando uma análise da composição da liga e do tipo de ferramenta de corte, considerando o cumprimento das especificações da peça em serviço.

5 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

5.1 Método utilizado

Os experimentos de torneamento realizados nesta pesquisa para analisar as características técnicas da usinagem do ferro fundido foram de longa duração. Esta escolha foi feita porque este tipo de ensaio representa as condições praticadas na indústria, e é nestas condições que a liga analisada possui a sua maior dificuldade em ser usinada. Nesses ensaios, três tipos de materiais de ferramentas de corte foram usados: metal-duro; cerâmica e CBN.

Para a execução dos ensaios, foi utilizado um torno CNC da marca Okuma, modelo Crown L14, com rotação máxima de 2800 rpm e potência disponível de 22 kW.

Antes da realização dos testes, foram realizados ensaios de caracterização da liga, com análises das propriedades mecânicas, químicas e microestruturais.

Outro procedimento importante utilizado para realização dos ensaios foi a pré-usinagem dos corpos de prova. A camada removida foi de aproximadamente 3 mm, garantindo que os efeitos devido a solidificação da liga não influenciassem nos resultados da vida das ferramentas.

Os parâmetros de corte empregados nos ensaios, assim como os critérios de fim de vida das ferramentas, foram definidos com base na literatura, nos fornecedores de ferramentas e experiências dos profissionais da empresa parceira na pesquisa.

A realização dos ensaios na empresa Tupy Fundições Ltda ocorreu devido às máquinas disponíveis no laboratório do USICON-UFSC estarem reservadas para o desenvolvimento de experimentos de um Doutorando em Engenharia Mecânica e também por não possuir máquinas para ensaios de torneamento com velocidades de corte elevadas.

Assim, para a medição do desgaste da quina da ferramenta, foi usado uma Lupa óptica com resolução de 0,01 mm, disponível na Tupy Fundições Ltda.

5.2 Caracterização do material usinado

5.2.1 Geometria dos corpos de prova

A definição da geometria utilizada na fabricação dos corpos de prova foi função dos seguintes requisitos:

- semelhança microestrutural e de propriedades mecânicas com o material utilizado na fabricação dos blocos de motores diesel.
- facilidade do cumprimento das especificações dimensionais com o maior aproveitamento do material a usinar, evitando, desta maneira, sucessivas interrupções nos ensaios e longos tempos de preparação;
- qualidade na fixação das peças; e
- redução das vibrações durante a usinagem.

Para garantir o primeiro requisito, optou-se por uma espessura da parede máxima de 30 mm, uma vez que esta é uma das maiores espessuras de paredes encontradas nos blocos de motor, e o uso de espessuras maiores também dificultaria a obtenção de uma microestrutura homogênea ao longo da secção transversal, devido ao gradiente de resfriamento a que o material estaria sujeito.

Quanto ao segundo item, optou-se por um comprimento do corpo de prova de 400 mm para evitar as excessivas interrupções no ensaio e longos tempos de preparação.

Para garantir qualidade na fixação das peças e atenuar vibrações, optou-se por uma geometria cilíndrica, que permite fixação fácil e rápida nas castanhas do torno, além de respeitar a relação de $(L/D \leq 10)$ para evitar vibrações e flexão do corpo de prova. A geometria dos corpos de prova é mostrada na Figura 5.1

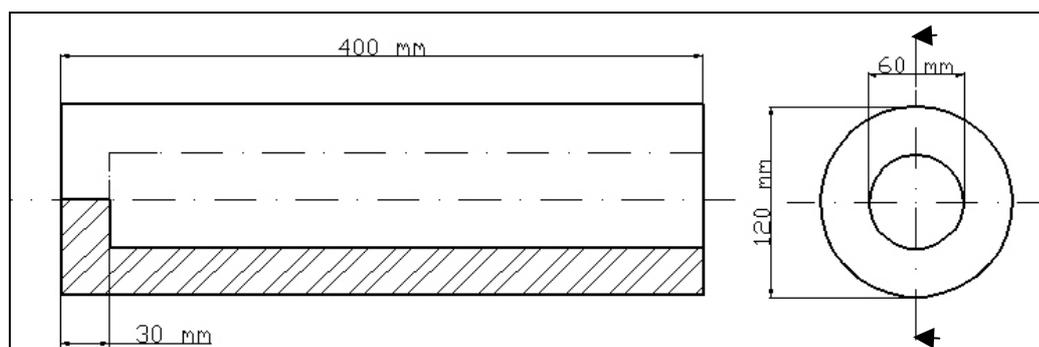


Figura 5.1: Geometria dos corpos de prova utilizados.

5.2.2 Composição química

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

A análise química dos materiais foi fornecida pelo fabricante dos blocos de motores em CGI, a empresa Tupy Fundições Ltda, sediada em Joinville/SC. Os dados são apresentados na Tabela. 5.1.

Tabela 5.1: Composição química do ferro fundido vermicular.

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Sn [%]	Ti [%]
Vermicular	3,64	2,57	0,373	0,038	0,017	0,064	0,007

5.2.3 Análise microestrutural

Para a realização da análise microestrutural, foram retiradas amostras semicirculares dos corpos de prova, analisando a microestrutura da superfície cortada.

As amostras foram submetidas a um polimento e, através de fotos, foram avaliados os tipos de grafita e a percentagem de grafita nodular e vermicular. Estas mesmas amostras foram submetidas a ataque de nital 2% para a quantificação da percentagem de perlita e grafita.

As fotos foram obtidas com uma câmara digital acoplada a um microscópio óptico modelo Optiphot, marca Nikon, com aumento máximo de 1.000x (Figura 5.2). As imagens adquiridas foram analisadas com o software Image-pro Plus versão 5.1, produzido pela empresa Media Cybernetics. Os resultados das análises de imagens são apresentados na Tabela 5.2.



Figura 5.2: Microscópio e microcomputador utilizados para a análise microestrutural do CGI.

Tabela 5.2: Caracterização do material através da análise de imagens.

Material	Propriedades				
	% vermicular	% nodular	Forma da grafita	% perlita	% ferrita
Vermicular	92 %	8%	Forma III e VI	92	8

As imagens utilizadas para a caracterização dos materiais foram obtidas pelo microscópio óptico, com aumento de 100x, sendo que os valores das quantidades contidas na análise da Tabela 5.2 representam a média de várias regiões da amostra do material.

As Figuras 5.3 (a) e (b) mostram as micrografias do ferro fundido vermicular sem e com ataque de nital 2%.

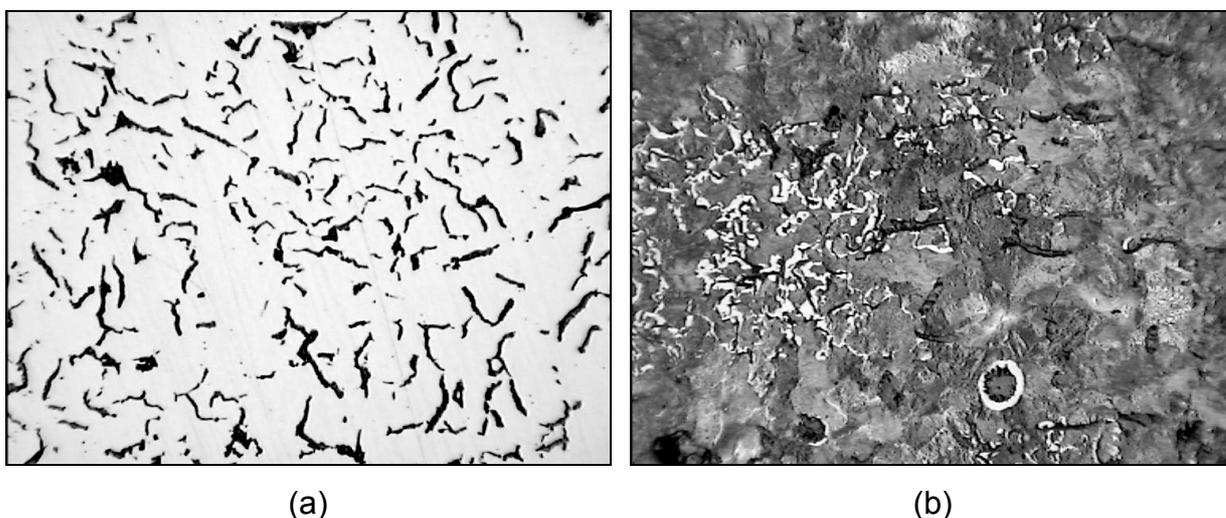


Figura 5.3: Micrografia do ferro fundido vermicular: a) sem ataque de nital 2% 100x e b) Micrografia do ferro fundido vermicular com ataque de nital 2% 100x.

A caracterização da perlita se deve ao fato que a quantidade de cementita (Fe_3C) na perlita influencia significativamente a usinabilidade do material. Perlitas com maiores quantidades de cementita, ou seja, lamelas mais unidas e espessas, tendem a ter pior usinabilidade (Dawson et al., 1999).

Para caracterização das perlitas utilizou-se a imagem adquirida do microscópio eletrônico de varredura, em regiões aleatórias no corpo de prova.

O aspecto desta caracterização é qualitativo, pois a medição da espessura, espaçamento das lamelas de perlita não foi possível realizar devido a dificuldades encontradas como profundidade de foco, profundidade do ataque químico e ajuste de contraste entre as fotos.

As Figuras 5.4 (a) e (b) mostram as micrografias do vermicular onde é possível observar uma considerável quantidade de perlitas (lamelas espessas).

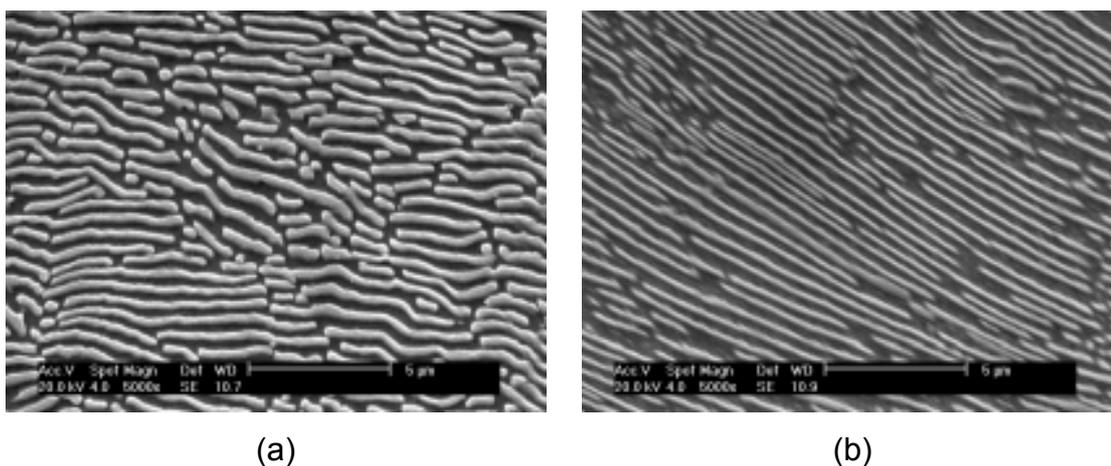


Figura 5.4: Perlita do ferro fundido vermicular. MEV 5.000x. Nital 2%.

5.2.4 Determinação da dureza

Outro ensaio utilizado para a caracterização do material usinado foi a medição da dureza Brinell, por meio do durômetro da marca Wolpert, modelo LVPA/BK 300, com carga máxima de 4.000 kgf. As indentações foram realizadas com esfera de 5 mm de diâmetro, carga de 7.355 N e medidas através de lupa, com uma divisão de escala de 0,05 mm. Os valores obtidos estão contidos na Tabela. 5.3.

Tabela 5.3: Dureza Brinell média dos corpos de prova.

	Vermicular
Dureza média	236 HB
Desvio-padrão	7,43

5.2.5 Determinação da resistência mecânica

Para a realização deste ensaio, foi usada uma máquina de tração universal, com capacidade de 500 kN, marca KRATOS. Os corpos de prova foram preparados em conformidade com a norma NBR 6916, com rosca M16 nas extremidades e diâmetro da parte útil de 10 mm. Os resultados estão descritos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Resistência mecânica do material usinado.

Propriedade	Vermicular
σ_e [MPa]	386
σ_r [MPa]	506

5.3 Caracterização das ferramentas de corte

Neste trabalho, três tipos de ferramentas, provenientes de dois fabricantes diferentes, foram utilizadas: metal-duro, cerâmica e CBN. Os fabricantes foram designados de A e B, enquanto que, para a identificação das ferramentas, utilizou-se: MD para metal-duro, CR para cerâmica e CB para o CBN, tendo acrescido ao final o sufixo A ou B para identificar o fabricante da ferramenta, conforme ilustra a Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Esquema de codificação de ferramentas.

Fabricante	A	B
Ferramenta de metal-duro	MD-A	MD-B
Ferramenta de cerâmica	CR-A	CR-B
Ferramenta de CBN	CB-A	CB-B

Para um melhor entendimento, as descrições das ferramentas foram divididas em

metal-duro, cerâmica e CBN e são mostradas nos item a seguir.

5.3.1 Ferramentas de metal-duro

As ferramentas de metal-duro foram fabricadas do mesmo substrato, apresentando uma geometria CNMG 120408 de acordo com o código ISO 1832-1985. A diferença entre elas está no tipo de revestimento e quina. A ferramenta MD-A exibe uma quina alisadora que combina os chanfros e raio, diferentemente da MD-B, que não apresenta esta combinação (Figura 5.5).

Quanto ao revestimento, a ferramenta proveniente do fabricante A é composta por um substrato tipo K10, com revestimento de CVD com 3 camadas. A camada externa é de TiN, que tem como característica baixo coeficiente de atrito e fornece a cor amarela, de fácil identificação. Uma camada intermediária é de Al_2O_3 , que funciona como uma proteção térmica, devido a sua baixa condutividade. A outra camada é de Ti(C,N), que fornece resistência ao desgaste de flanco e é responsável pela alta dureza.

A ferramenta MD-B apresenta o mesmo substrato, o K10, mas possui apenas duas camadas de revestimento (Al_2O_3 e TiCN), o que proporciona proteção térmica e resistência ao desgaste de flanco, além é claro da diferença encontrada no raio da ferramenta. A disposição e a espessura de cada camada de revestimento das ferramentas podem ser vistas na Figura 5.6.

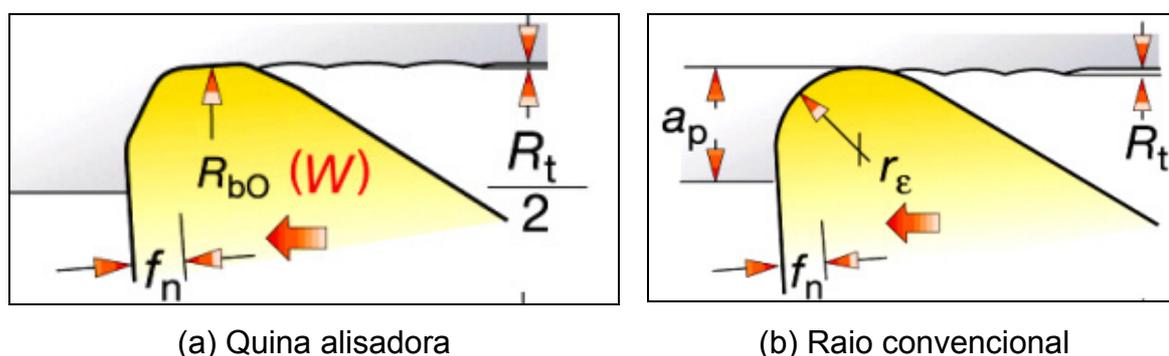


Figura 5.5: Esquema dos raios das ferramentas: a) Ferramenta MD-A com quina alisadora; b) Ferramenta MD-B com raio convencional.

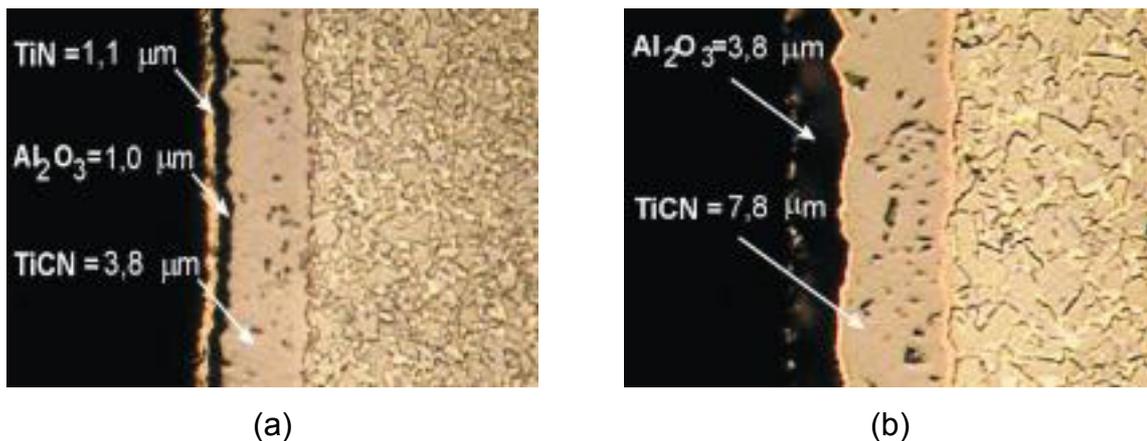


Figura 5.6: Esquema do revestimento aplicado na ferramenta de metal-duro.

a) Ferramenta MD-A; b) Ferramenta MD-B.

As ferramentas de metal-duro utilizadas são mostradas na Figura 5.7.

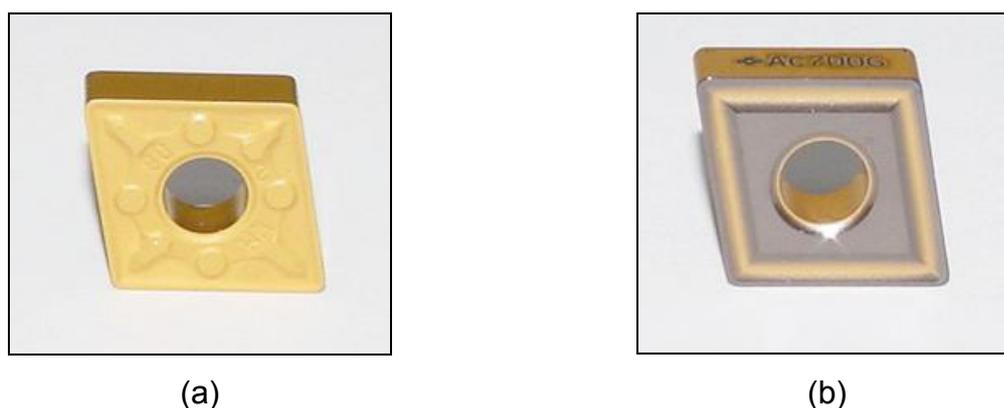


Figura 5.7: Insertos de metal-duro utilizados na usinagem do ferro fundido vermicular: Ferramenta MD-A (a) e Ferramenta MD-B (b).

5.3.2 Ferramentas de Cerâmica

As ferramentas de cerâmica apresentam as mesmas geometrias, código ISO CNGA 120408, possuem o mesmo substrato Si₃N₄, e como as ferramentas de metal-duro, diferem quanto à quina. No que se refere ao uso de revestimento, a ferramenta CR-A não possui nenhum tipo de revestimento.

A visualização da ferramenta CR-A não foi possível por problemas de disponibilidade das ferramentas. Já a CR-B (Figura 5.8) possui duas camadas de revestimento, uma com Al₂O₃ (óxido de alumínio) e outra com carboneto de titânio, o que, segundo os dados fornecidos pelo fabricante, resulta em um aumento da

dureza e resistência ao desgaste.



Figura 5.8: Ferramenta cerâmica

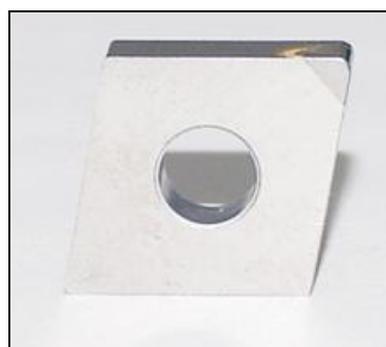
5.3.3 Ferramentas de CBN

A respeito das ferramentas de CBN, todas apresentam as mesmas geometrias diferindo apenas quanto a quina alisadora.

A ferramenta CB-A, comercialmente, pertence à classe 7050, e a ferramenta CB-B pertence à classe BNX10 (Figura 5.9). Essas ferramentas são aplicadas na usinagem de aços duros, ligas de níquel e ferros fundidos cinzentos perlíticos. Outras informações referentes às propriedades das pastilhas não foram fornecidas pelos fabricantes, resumindo-se apenas ao campo de aplicação.



(a)



(b)

Figura 5.9: Ferramentas de CBN: Ferramenta CB-A (a); Ferramenta CB-B (b)

5.4 Critério de fim de vida das ferramentas

Como um dos objetivos do trabalho é simular a operação de acabamento, dois

critérios de fim de vida foram utilizados: o desgaste de flanco e a qualidade da textura da superfície gerada na peça.

O desgaste de flanco teve como valor máximo 0,3 mm, conforme é ilustrado na Figura 5.10.



Figura 5.10: Critério de fim de vida: Marca de desgaste no flanco da ferramenta.

Quanto ao parâmetro utilizado para caracterizar a qualidade da textura de superfície, foi utilizado o R_z com um valor máximo de 25 μm . Este valor é a profundidade média da rugosidade e foi determinado com base nos dados da literatura e necessidades da empresa.

5.5 Ensaios de Usinagem

Para a realização dos ensaios, foi elaborada uma programação de acordo com a disponibilidade das máquinas e ferramentas. Em função do elevado custo das ferramentas, estas foram fornecidas em quantidades reduzidas, tornando necessário otimizar os testes.

Assim, os testes foram realizados na seguinte ordem: (1º) ensaios com metal-duro; (2º) realização dos ensaios com as ferramentas cerâmicas; e, por último, ensaios com as ferramentas de CBN. Na Figura 5.11, é mostrado o esquema dos ensaios.

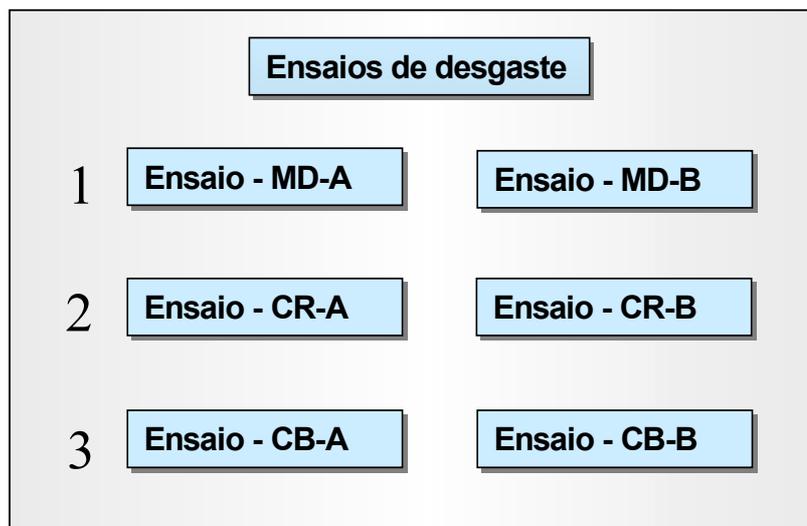


Figura 5.11: Ensaio de desgaste realizados.

5.5.1 Parâmetros de corte utilizados

Para a realização dos ensaios de desgaste e vida da ferramenta, os parâmetros de corte adotados foram iguais para as ferramentas do mesmo material, possibilitando, assim, um padrão para comparar as vidas das ferramentas e a qualidade da superfície gerada na usinagem do CGI em condições de acabamento.

Os valores dos parâmetros de corte foram determinados com base: na literatura, em catálogos de ferramentas e em sugestões dos técnicos das empresas parceiras na pesquisa.

Com relação à escolha dos valores de V_c , buscou-se um escalonamento entre as velocidades com uma razão constante, visando obter um espaçamento adequado na curva de vida da ferramenta para os pontos analisados. Para isso, utilizou-se a série geométrica de números R20 normalizados pela norma ISO 3685.

A combinação dos parâmetros de usinagem utilizada para cada tipo de material de ferramenta é descrita na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

Material	V_c [m/min]	f [mm]	a_p [mm]
Metal-duro	200	0,2	0,5
	180	0,2	0,5
	160	0,2	0,5
Cerâmica	500	0,2	0,5
	350	0,2	0,5
	200	0,2	0,5
CBN	700	0,2	0,2
	550	0,2	0,2

5.5.2 Fixação da peça

Os corpos de prova, com forma cilíndrica, foram fixados em uma placa de três castanhas e em um contra-ponto. Esta fixação, além de ser padrão, buscou garantir estabilidade e rigidez, para poder manter a segurança e precisão na realização dos ensaios (Figura 5.12).



Figura 5.12: Sistema de fixação dos corpos de prova.

5.5.3 Fixação da ferramenta

Para a fixação das pastilhas de corte na máquina-ferramenta, foi utilizado um suporte de ferramenta código DCLNR 2525M12, fornecido pela empresa Sandvik (Figura 5.13)

Durante os ensaios, apenas a pastilha foi removida para a medição do desgaste. O suporte foi mantido sempre na mesma posição no magazine revólver do torno, de modo a evitar possíveis variações nos resultados, em razão de colisões ou variação

na profundidade de corte.

Após a medição do desgaste, o assento do inserto era limpo para garantir o posicionamento adequado.



Figura 5.13: Ferramenta montada no suporte e fixada no torno.

5.5.4 Máquina-ferramenta

Os ensaios de torneamento foram realizados em um torno horizontal CNC, da marca OKUMA, modelo CROWN L1420, instalado em uma das células de manufatura de peças da empresa Tupy Fundições Ltda, de Joinville-SC. (Figura 5.14)



Figura 5.14: Torno Okuma utilizado na realização dos ensaios de torneamento.

5.5.5 Medição do desgaste das ferramentas

As medições dos desgastes foram feitas com uma lupa de ferramentaria de posse da empresa Tupy Fundições Ltda, marca Peak, com aumento de 30x, dotada de uma escala com divisão centesimal (Figura 5.15).

Como ponto de referência para medir o desgaste, utilizou-se o gume principal da

ferramenta, como indicado anteriormente na Figura 5.9.



Figura 5.15: Lupa de ferramentaria para a medição do desgaste VB_{max} .

5.5.6 Aquisição de fotos

Para assegurar a precisão da medição da lupa, foram registradas fotos do gume principal, secundário e da quina das ferramentas usadas após a realização dos ensaios. Estas fotos foram adquiridas no Laboratório de Materiais da UFSC – LABMAT, através do uso de um estereoscópio modelo SZ60-CTV, marca Olympus, com uma câmera digital DP11, marca Olympus (Figura 5.16).



Figura 5.16: Sistema utilizado para a aquisição de imagens das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de torneamento.

5.5.7 Medição da rugosidade

Para a medição da textura da superfície dos corpos de prova, foi utilizado um rugosímetro portátil, marca Mahr, modelo MR2, com sonda tipo seguidor mecânico e raio de ponta do apalpador igual a $2 \mu\text{m}$ (Figura 5.17). Visando assegurar a

qualidade da medição, esse foi devidamente calibrado pelo Departamento de Metrologia da Tupy Fundições Ltda.



Figura 5.17: Rugosímetro utilizado para a aquisição dos valores de rugosidade R_z .

A mensuração do parâmetro de rugosidade R_z foi feita na direção axial ao cilindro, pois peças torneadas possuem raias circulares perpendiculares às geratrizes do cilindro.

5.5.8 Microscópio Eletrônico de Varredura

Para possibilitar uma maior profundidade focal na análise dos gumes das ferramentas de corte e uma melhor identificação dos tipos de desgastes destas, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo XL, série 30, marca Phillips, do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSC (Figura 5.18).

O uso deste equipamento possibilitou, também, a identificação de elementos difusos nos materiais. Isto se deu pela análise química dos materiais depositados sobre as superfícies das ferramentas, utilizando a micro-sonda EDX acoplada ao MEV.



Figura 5.18: Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão exibidos os resultados obtidos pela medição do desgaste na quina da ferramenta e da rugosidade gerada na superfície da peça, durante a realização dos ensaios de torneamento.

A apresentação dos dados se dará na forma de gráficos, mostrando, também, documentação fotográfica e espectros das análises químicas das ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido vermicular.

Como critério para a determinação do fim da vida da ferramenta, foi utilizado um desgaste de flanco VB_{max} de 0,30 mm.

Para a sintetização dos resultados obtidos, o tempo de vida e os valores das rugosidades alcançadas por cada grupo de ferramenta, foram comparados para cada fabricante de ferramenta.

Para a verificação da validação dos resultados obtidos, os dados foram submetidos à análise estatística, utilizando para o ajustamento das curvas em cada grupo de ferramenta, o teste coeficiente de correlação (Makridakius, 1998) e a análise de variância para a comparação entre os diferentes fabricantes de ferramentas (Montgomery, 1997).

Como parte final do trabalho, foi realizada uma análise econômica para as ferramentas.

6.1 Ferramenta de metal-duro

6.1.1 Ferramenta MD-A

A Figura 6.1 descreve o comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, utilizando velocidade de corte igual a 160 m/min, profundidade de corte de 0,5 mm e avanço de 0,2 mm, o que corresponde à condição 1 do planejamento experimental (item 5.5).

As curvas foram submetidas a uma análise da correlação com a curva média delas. O teste revelou que as curvas apresentam grande correlação (R^2 tende a 1) com a curva média, pois $R^2 = 0,97$.

Para essa velocidade de corte, a ferramenta mostrou um tempo de vida de aproximadamente 43 minutos e apresentou a abrasão como mecanismo

preponderante de desgaste. Este tempo de vida de 43 minutos da ferramenta MD-A é 3 vezes superior ao obtido por Borrmann (2000), que na sua pesquisa utilizou um inserto denominado de KC9315, com velocidade de corte de 120 m/min, profundidade de corte 0,5 mm e avanço de 0,2 mm.

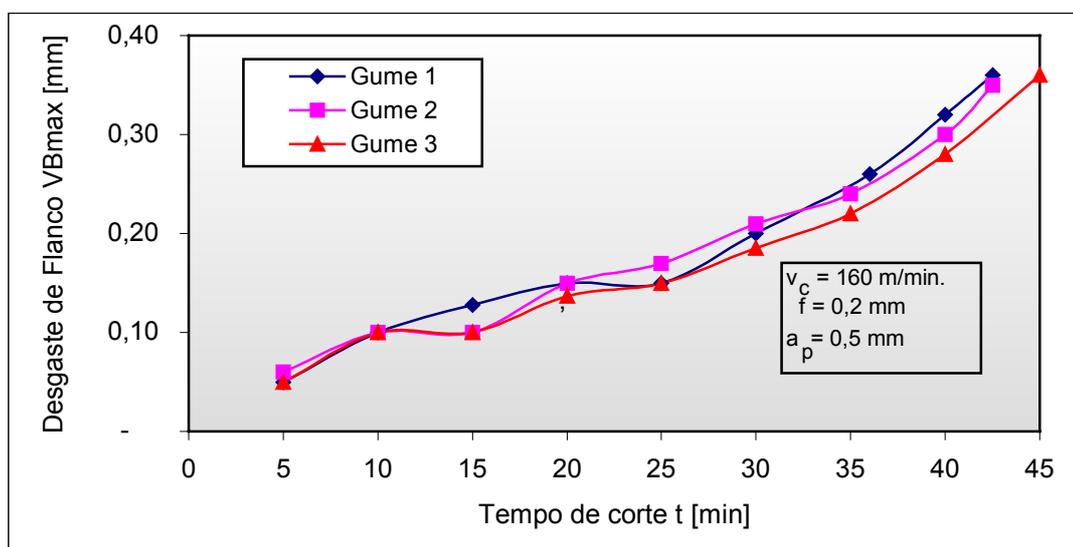


Figura 6.1: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, com velocidade de corte de 160 m/min.

Por outro lado, Leuze (2000) e Werthein (2002) obtiveram resultados superiores ao da MD-A.

Leuze (2000) trabalhou com um metal-duro designado de HM7, com v_c de 120 m/min, a_p de 0,15 mm e f de 0,3 mm, obtendo um tempo de 5 horas e 58 minutos.

Por sua vez, Werthein (2002), que utilizou ferramenta com grão micrométrico, revestida por multi-camadas de TiN, TiCN, Al_2O_3 e TiN, denominada de IC9007 SNU 432, com v_c de 150 m/min, f de 0,3 mm e a_p de 0,2 mm, alcançou um tempo de vida de 4 horas e 26 minutos.

Estes dois resultados citados anteriormente apresentam tempos de vida elevados quando comparados os resultados de Borrmann (2002), Phillips (197-) e os obtidos pela própria empresa parceira na pesquisa, carecendo de uma análise mais detalhada quanto às características das ferramentas utilizadas.

Ainda analisando a Figura 6.1, é possível observar o aumento do desgaste da ferramenta com o passar do tempo, e que, acima dos 35 minutos, ocorre uma intensificação da taxa de desgaste, com conseqüente enfraquecimento e

comprometimento da ferramenta, além do aumento do consumo de energia para o corte.

Para realizar a caracterização do desgaste da ferramenta, foi realizada uma análise no MEV (Figura 6.2), em que se pode verificar como causa predominante de desgaste a abrasão.



Figura 6.2: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-A na condição 1.

A ação do desgaste por abrasão se dá porque, com o passar do tempo, o material aderido, juntamente com o atrito na interface peça/ferramenta, vai removendo a camada de revestimento, intensificando o desgaste sobre o substrato, face e no flanco, tornando-a mais vulnerável à ação da abrasão e a solicitações térmicas. Além disso, ocorre o aumento do consumo de energia para o corte e piora da qualidade da superfície usinada. O desgaste acima descrito é semelhante ao detectado por Werthein (2002) em sua pesquisa.

Na condição 2, a velocidade de corte passou para 180 m/min e os demais parâmetros de entrada da usinagem, como profundidade de corte e avanço, não foram modificados. Nesta condição, a ferramenta alcançou um tempo de vida de cerca de 28 minutos (Figura 6.3). Este resultado está muito próximo do encontrado por Borrmann (2000). O autor, em sua pesquisa, obteve um tempo de vida de 27 minutos com ferramentas KC9120. Entretanto, ao utilizar a ferramenta KC9315, este mesmo pesquisador obteve uma vida de 83 minutos.

Analisando o comportamento do desgaste, percebe-se um aumento da taxa na velocidade de 180 m/min.

As curvas, quando submetidas ao teste do coeficiente de correlação

apresentaram um bom índice $R^2 = 0,98$ o que significa que são semelhantes (R^2 tende a 1).

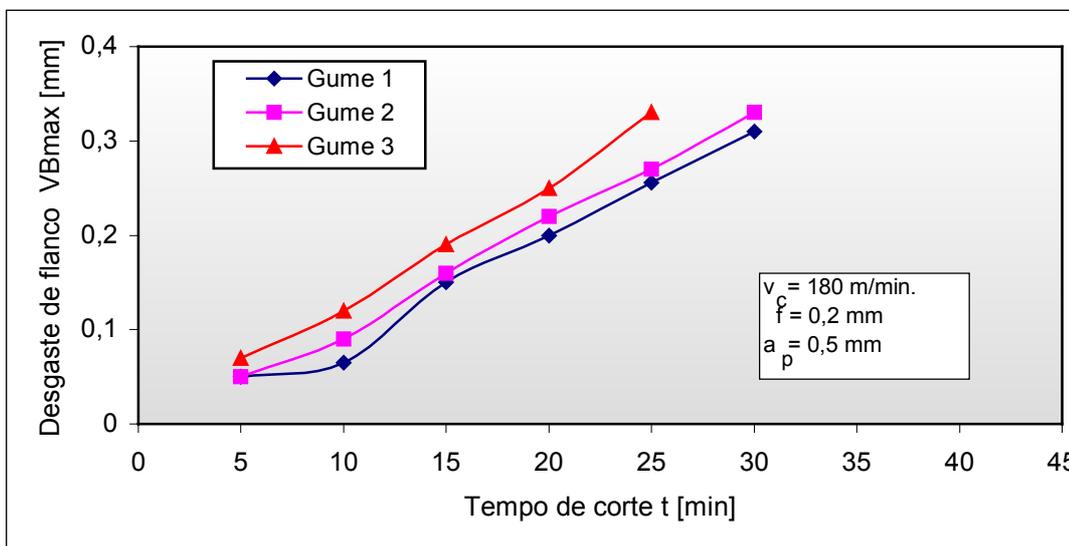


Figura 6.3: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, com velocidade de corte de 180 m/min.

Na análise realizada no MEV, foi possível observar, na ferramenta submetida aos testes na condição 2, o mesmo mecanismo de desgaste ocorrido na condição 1, porém com sua ampliação de intensidade e área afetada na ferramenta (Figura 6.4).

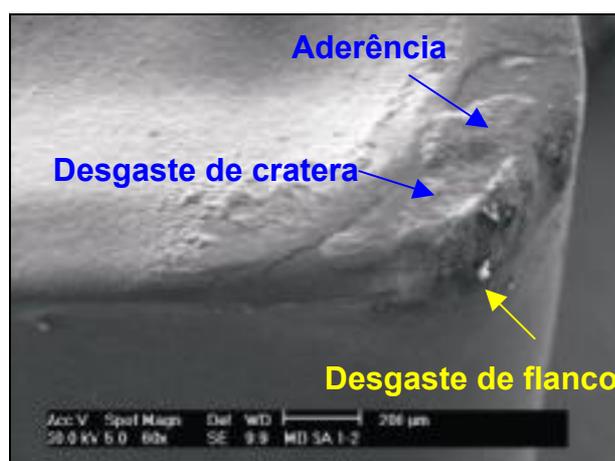


Figura 6.4: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-A na condição 2.

Na terceira série de experimentos com a ferramenta MD-A, foi utilizada velocidade de corte de 200 m/min, mantendo-se as mesmas condições de avanço e

profundidade de corte utilizadas nas condições 1 e 2.

O resultado que se encontra na Figura 6.5 mostra um substancial aumento na taxa de desgaste, devido ao aumento da velocidade de corte, o que reflete em uma redução significativa da vida da ferramenta, obtendo um tempo em torno de 18 minutos.

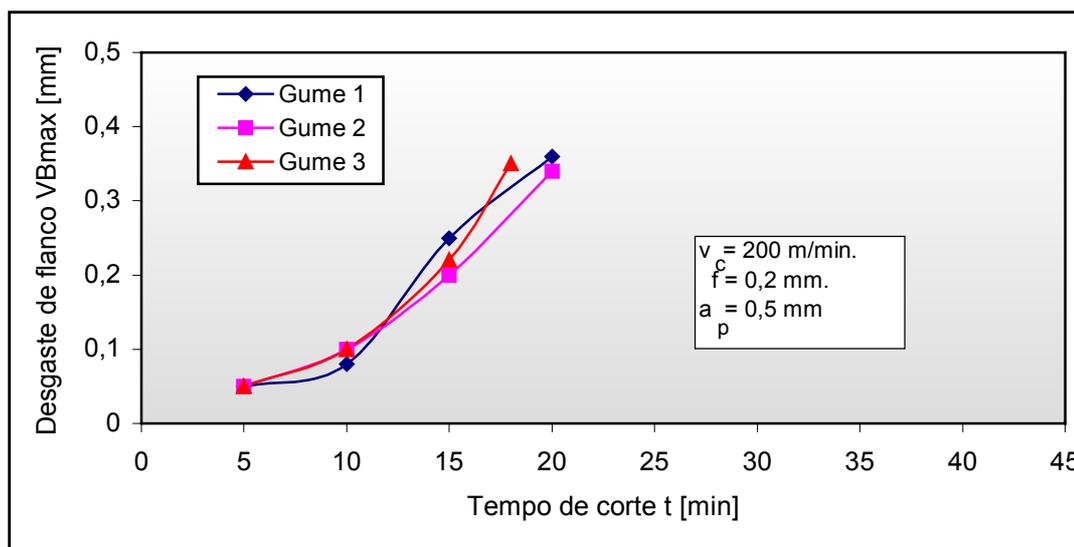


Figura 6.5: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, com velocidade de corte de 200 m/min.

Como nos dois casos anteriores, os resultados desta terceira série de experimentos também foram submetidos a uma análise de correlação entre as curvas. Neste teste, novamente obteve-se um bom índice de correlação, $R^2 = 1$.

Na pesquisa bibliográfica, foram encontrados trabalhos que utilizaram velocidade de corte de 200 m/min, (Phillips,197-). No seu trabalho realizado em parceria com a Ford Motor Company, este pesquisador usou ferramenta de metal-duro de WC com geometria de SNG-422, com avanço de 0,27 mm e profundidade de corte de 1,52 mm, obtendo um tempo de vida inferior a 10 minutos.

Na análise realizada no MEV, constatou-se o mesmo mecanismo de desgaste já descrito para os dois casos anteriores.

A Figura 6.6 mostra a ferramenta com desgaste de flanco e material aderido sobre a face da ferramenta.

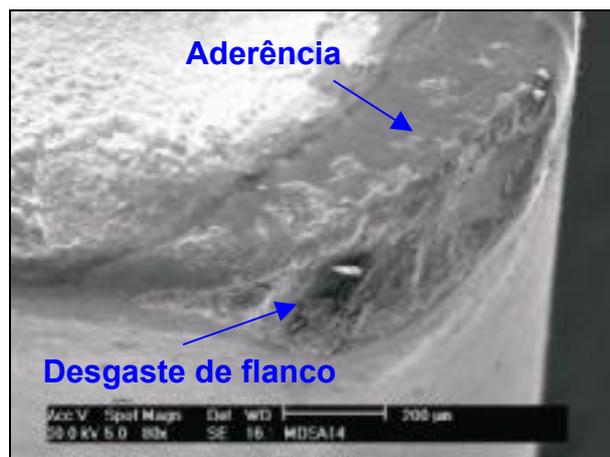


Figura 6.6: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-A na condição 3.

Como todas as curvas exibiram um bom índice de correlação dos resultados dentro de cada uma das três séries de experimentos, foi calculada a curva média para cada velocidade de corte, o que proporcionou os resultados contidos na Figura 6.7.

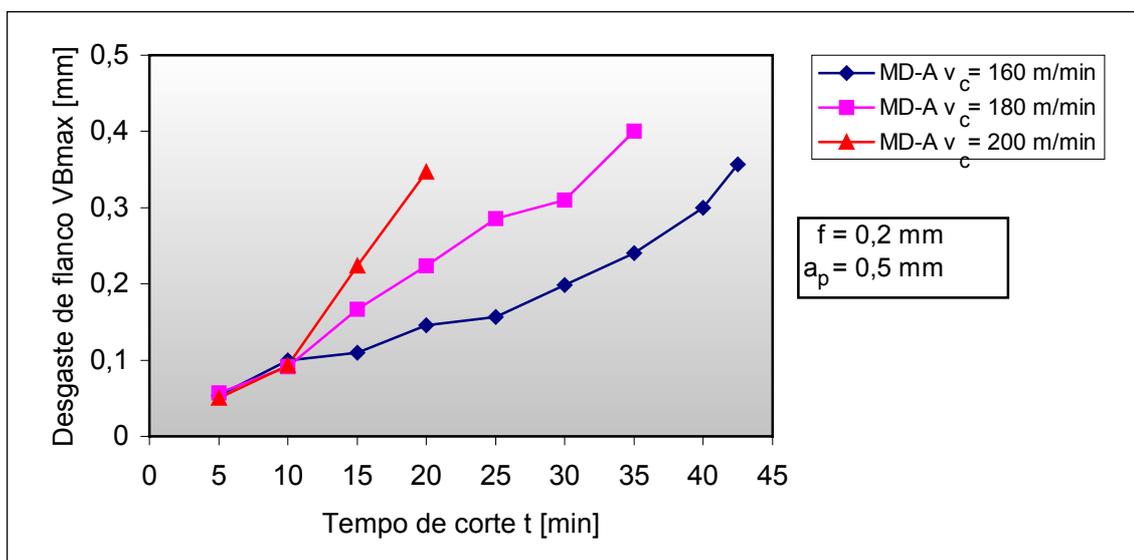


Figura 6.7: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-A, para as velocidades de corte de 160; 180 e 200 m/min.

Para analisar se a velocidade de corte influencia no tempo de vida da ferramenta e se realmente as curvas são diferentes estatisticamente, foi feita a análise de variância. Para a referida análise, foi utilizado um índice de confiabilidade de 95%, e todas as curvas analisadas apresentaram diferenças significativas entre si

($F_{\text{calc}} = 39,43 > F_{\text{cr}} = 4,26$).

Depois da confirmação estatística, o que assegura a qualidade dos dados, verifica-se que o aumento da velocidade de corte proporciona um aumento da taxa de desgaste, tendo como resultado uma grande redução na vida ferramenta.

Isto é explicado porque, com o aumento da velocidade de corte, eleva-se a temperatura na ferramenta e, por sua vez, facilita a remoção do revestimento, deixando o substrato da ferramenta mais suscetível aos efeitos da temperatura e da abrasão, aumentando a taxa de desgaste.

Os resultados da pesquisa mostram-se coerentes com os obtidos por Dawson (1999), Phillips (197-), Reuter (2000a), Reuter (2000b), Leuze (2000) e Borrmann (2000). Estes autores também obtiveram um decréscimo no tempo de vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte.

6.1.2 Ferramenta MD-B

A pastilha de metal-duro MD-B foi testada sob as mesmas condições utilizadas nos ensaios da ferramenta MD-A. Os resultados obtidos são descritos a seguir.

Para a condição 1, com velocidade de corte igual a 160 m/min, avanço de 0,2 mm e profundidade de corte igual a 0,5 mm, o tempo médio de vida foi de 33 minutos, como pode ser visualizado na Figura 6.8.

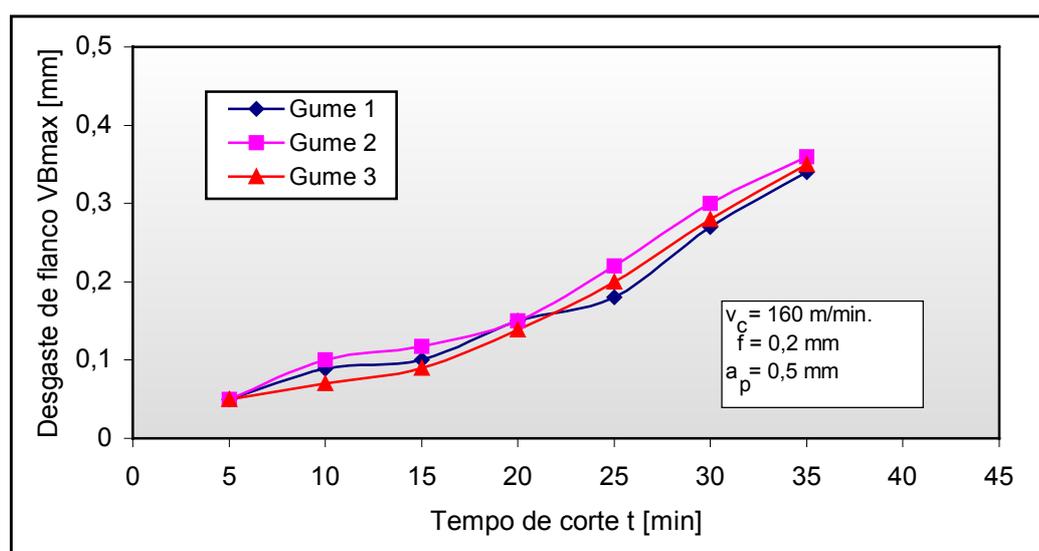


Figura 6.8: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-B, com velocidade de corte de 160 m/min.

O tempo de vida obtido pela ferramenta, quando comparado com os resultados de outros autores como Borrmann (2000), apresenta-se superior, da mesma maneira que ocorreu com a ferramenta MD-A na condição 1.

Conforme já detalhado anteriormente com a ferramenta MD-A, o resultado, quando comparado com os obtidos por outros autores como Leuze (2000) e Werthein (2002), é inferior.

Quanto à análise do coeficiente de correlação, as curvas mostraram um bom índice $R^2 = 0,97$.

Na caracterização do desgaste, a Figura 6.9, obtida no MEV, indica a presença de desgaste de cratera, desgaste de flanco, e uma pequena fratura, oriunda, provavelmente, do desgaste excessivo do flanco que enfraqueceu a ferramenta.

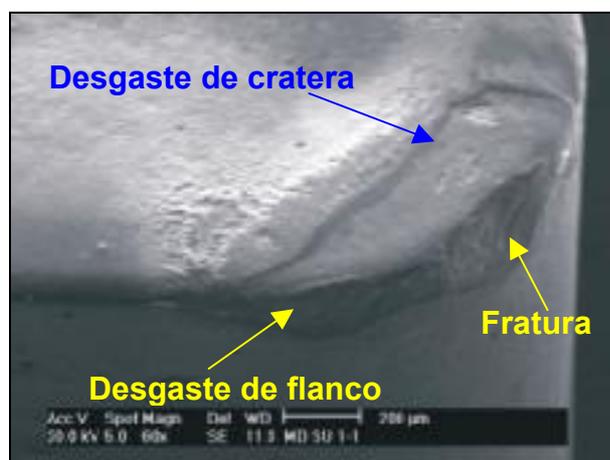


Figura 6.9: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-B na velocidade de corte de 160 m/min.

Para a condição 2, a velocidade de corte utilizada foi de 180 m/min e mantiveram-se os mesmos parâmetros de avanço e profundidade de corte da condição 1. Nesta condição, o tempo de vida médio da ferramenta foi de 22 minutos, conforme pode ser visto na Figura 6.10.

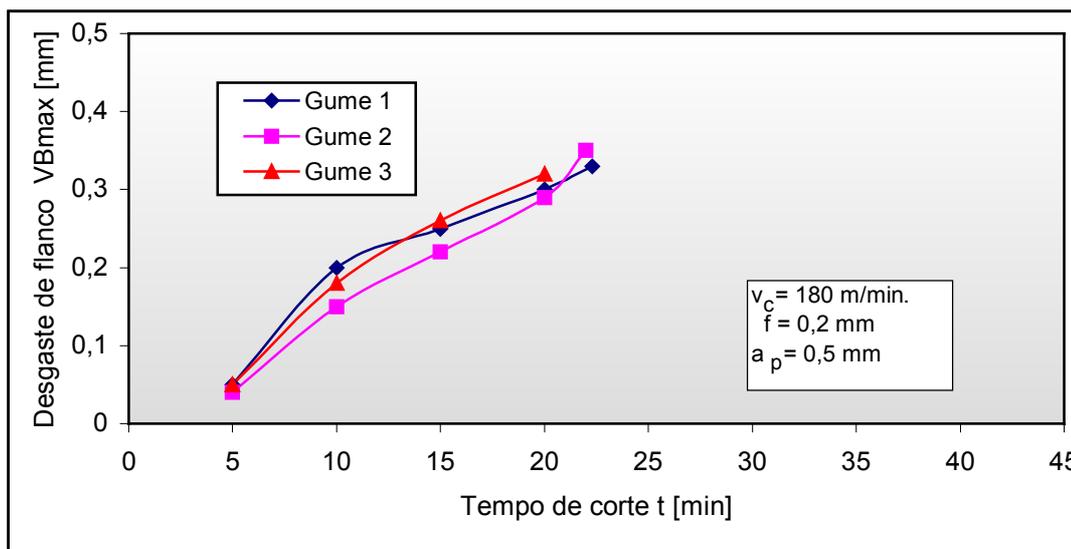


Figura 6.10: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-B, com velocidade de corte de 180 m/min.

O resultado mostra-se inferior quando comparado com Borrmann (2000). Este autor obteve um tempo de vida de 27 minutos com ferramentas de KC9120, usando velocidade de corte de 180 m/min. A explicação para esta diferença pode ser o tipo de substrato utilizado e/ou o tipo de revestimento aplicado sobre a ferramenta.

A análise do índice de correlação indicou que as curvas podem ser consideradas iguais $R^2 = 0,9$.

Na análise realizada no MEV (Figura 6.11), foi observada, na ferramenta MD-B ensaiada na condição 2, uma pequena quantidade de material aderido sobre o gume da ferramenta e um desgaste excessivo do flanco.



Figura 6.11: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-B na velocidade de corte de 180 m/min.

Na última série de usinagem com a ferramenta MD-B, condição 3, a velocidade de corte foi de 200 m/min. Nesta condição, a ferramenta apresentou um tempo de vida de aproximadamente 16 minutos, como é mostrado na Figura 6.12.

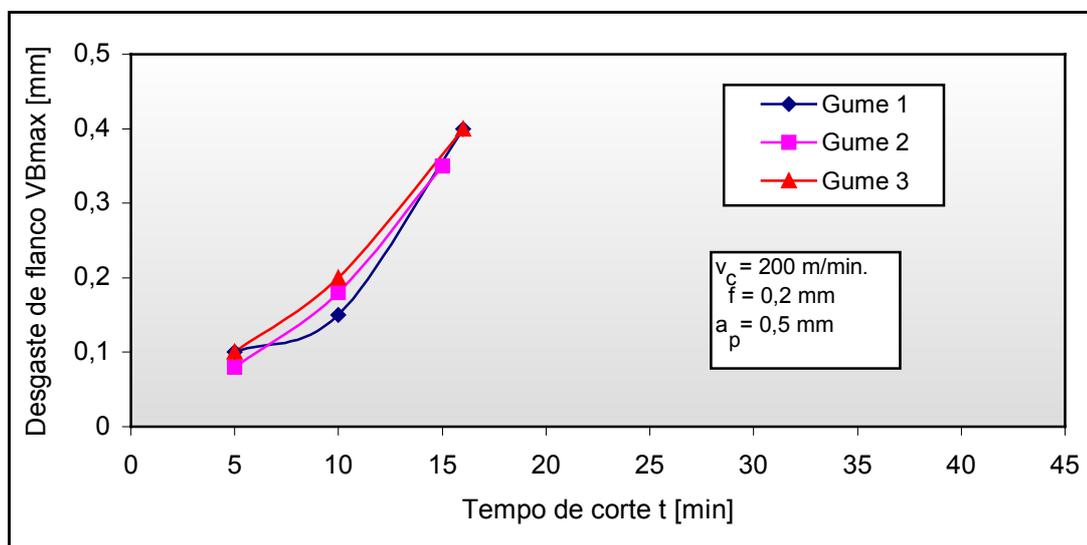


Figura 6.12: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-B, com velocidade de corte de 200 m/min.

Nesta condição, comparando o resultado de 16 minutos da ferramenta MD-B com o obtido em condições similares por Phillips (197-), a ferramenta MD-B obteve um tempo superior em 5 minutos ao deste pesquisador.

Como ocorreu nas condições 1 e 2, as curvas da condição 3 apresentaram um bom índice de correlação entre si $R^2 = 0,91$.

Na análise realizada no MEV, identificou-se o mesmo mecanismo de desgaste observados nas outras duas condições, como pode ser visto na Figura 6.13.

A Figura 6.13 mostra a ferramenta com desgaste por abrasão, no flanco e na face, e aderência na face da ferramenta. A superposição dos efeitos causados pelo aumento do desgaste no flanco (maior força para cortar o material, maior geração de calor) facilitou o desgaste excessivo da ferramenta.

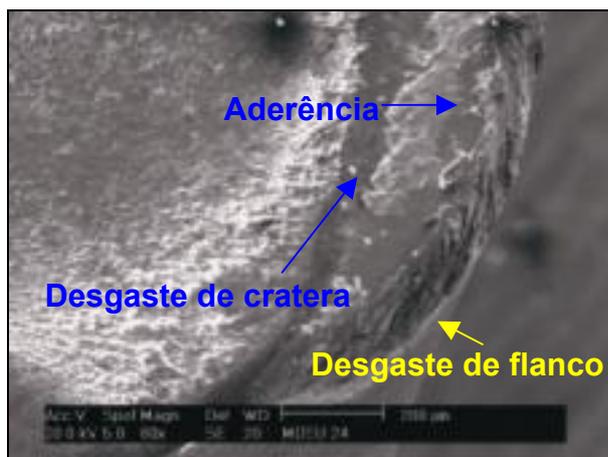


Figura 6.13: Caracterização do desgaste da ferramenta MD-B na velocidade de corte de 200 m/min.

Como nos casos anteriores, foi calculada a média das curvas de desgaste para a ferramenta MD-B. O resultado foi apresentado em uma única figura, como exibe a Figura 6.14.

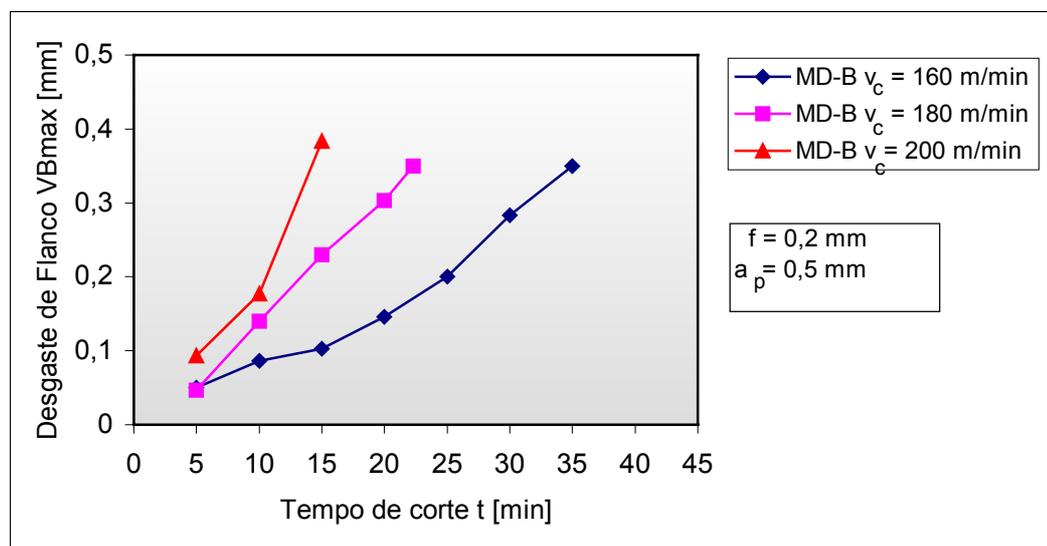


Figura 6.14: Comportamento do desgaste da ferramenta MD-B, para as velocidades de corte de 160; 180 e 200 m/min.

Para assegurar a validação das análises da comparação das curvas, estas foram submetidas à análise de variância com confiabilidade de 95%. O teste revelou que existem diferenças significativas entre as curvas ($F_{calc} = 90 > F_{cr} = 4,26$).

A análise das curvas da ferramenta MD-B possibilita concluir que o aumento da

velocidade de corte reduz o tempo de vida da ferramenta, conforme já descrito anteriormente na análise das curvas MD-A. A explicação para isto é que, com o passar do tempo, a abrasão vai removendo a camada de revestimento, deixando a ferramenta mais vulnerável a ações térmicas e mecânicas durante a usinagem. O resultado disto é o aumento da taxa desgaste, que, por sua vez, aumenta o consumo de energia para a realização do corte, piora a qualidade da superfície usinada e gera uma excessiva troca de ferramentas, o que não é desejável.

Resultados semelhantes ao deste trabalho foram obtidos por Dawson (1999), Phillips (197-), Reuter (2000a), Reuter (2000b), Leuze (2000) e Borrmann (2000).

6.1.3 Comparação entre as ferramentas MD-A e MD-B

Na realização do trabalho, buscou-se também estabelecer uma comparação entre as ferramentas dos fabricantes A e B, de modo a selecionar a que melhor se adequa à usinagem do ferro fundido vermicular.

Em todas as comparações realizadas, a ferramenta MD-A apresentou um tempo de vida médio 20% superior ao da ferramenta MD-B, resultado que é mostrado na Figura 6.15.

Para assegurar estatisticamente se as médias são diferentes, foi feito um teste de análise de variância comparando as ferramentas MD-A e MD-B para cada condição ensaiada. O teste indicou que os tempos de vida das ferramentas MD-A diferem dos da MD-B ($F_{cr} < F_{calc}$) ($F_{cr} = 7,71$; $F_{calc160} = 64$, $F_{calc180} = 8,28$ e $F_{calc200} = 9,75$).

O melhor desempenho da ferramenta MD-A deve-se ao tipo de revestimento utilizado. Esta ferramenta possui três camadas de revestimento. A camada externa é de TiN e tem como característica baixo coeficiente de atrito, fornecendo a cor amarela da ferramenta, a camada intermediária é de Al_2O_3 , que funciona como uma proteção térmica, devido a sua baixa condutividade. A última camada é de Ti(C,N) que fornece resistência ao desgaste de flanco e é responsável pela alta dureza da ferramenta.

Durante a usinagem, a sobreposição destes revestimentos protege a ferramenta por mais tempo dos efeitos abrasivo e térmico a que ela está sujeita no decorrer da usinagem.

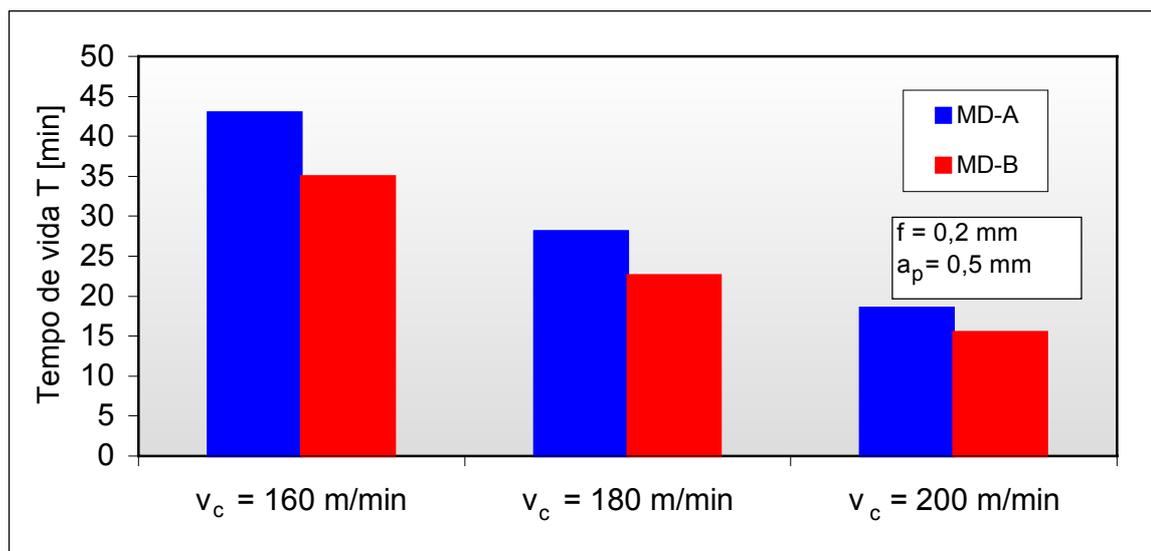


Figura 6.15: Comparação dos tempos de vida de MD-A e MD-B.

Já a ferramenta MD-B possui duas camadas de revestimento, uma de Al_2O_3 que fornece a proteção térmica, e outra, de $Ti(CN)$, que lhe dá a característica de resistência a desgaste no flanco.

Como o CGI é mais abrasivo e tem um cavaco com comportamento do mais adesivo sobre a face da ferramenta, a ausência de TiN faz diferença, pois não ocorre a diminuição do atrito peça/ferramenta, aumentando a ação da abrasão, com conseqüente aumento da temperatura, deixando a ferramenta mais vulnerável a ações térmicas e mecânicas, o que diminui a sua vida.

Quanto ao efeito do aumento da velocidade de corte sobre o desgaste das ferramentas, ambas apresentaram resultados coerentes com Dawson (1999), Phillips (197-), Reuter (2000a), Reuter (2000b), Leuze (2000) e Borrmann (2000), em que à medida que se aumenta a velocidade de corte, aumenta-se também o desgaste da ferramenta, fato este ligado ao aumento das solicitações térmicas. A Figura 6.16 ilustra a curva de vida para as ferramentas MD-A e MD-B.

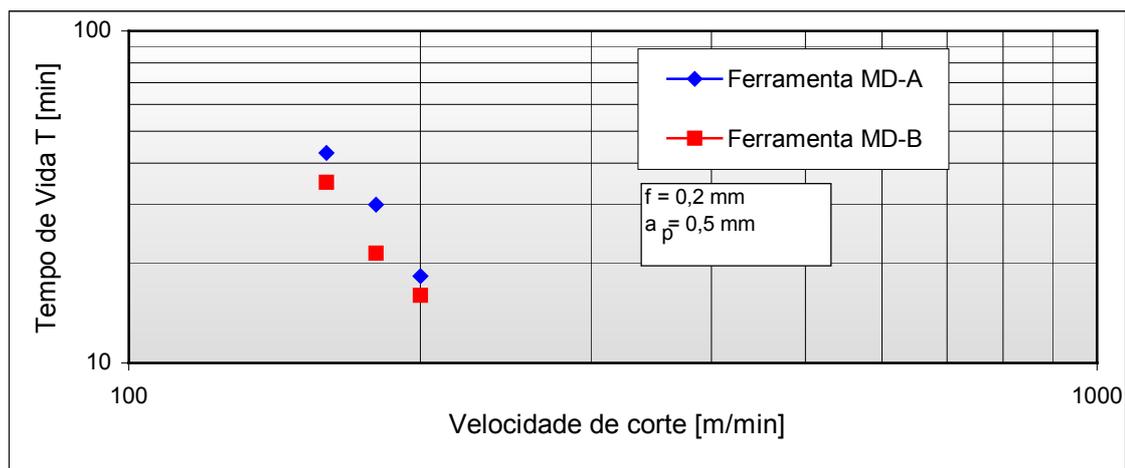


Figura 6.16: Curva de vida para as ferramentas MD-A e MD-B.

De posse da curva de vida da ferramenta, é possível extrair as constantes da equação de Taylor:

$$T = v_c^k \times C_V, \quad 6.1$$

onde:

T = vida da ferramenta;

C_V = constante que representa a vida T para uma v_c = 1 m/min;

k = inclinação da reta.

Modificações dessa equação para a variável v_c também são empregadas na prática:

$$v_c = T^{1/k} \times C_T \text{ ou } v_c \times T^{-1/k} = C_T \quad 6.2$$

Onde:

$$C_T = C_V^{-1/k} \quad 6.3$$

Os dados utilizados para calcular as constantes, bem como os respectivos resultados, estão contidos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Cálculo das constantes da equação de Taylor.

Ferramenta	v _{c1} [m/min]	T ₁ [min]	v _{c2} [m/min]	T ₂ [min]	k	C _V [min]	C _T [m/min]
MD-A	160	43	200	18,3	-3,83	1,19x10 ¹⁰	427,25
MD-B	160	35	200	16	-3,51	0,191x10 ¹⁰	440,07

6.1.4 Qualidade da superfície gerada

As medições de rugosidade foram realizadas em todas as condições testadas com as ferramentas MD-A e MD-B. Estas foram efetuadas nos intervalos de medição do desgaste das ferramentas, obtendo-se assim três curvas para cada condição testada por ferramenta.

Para evitar a repetição de informações, as curvas de rugosidade obtidas das ferramentas MD-A e MD-B, para cada condição, foram plotadas em um mesmo gráfico, realizando a comparação dos resultados obtidos.

Para a comparação das rugosidades geradas pela diferentes ferramentas, MD-A x MD-B, as três condições foram analisadas estatisticamente pelo método de análise de variância. Os resultados das análises, utilizando confiabilidade de 95%, apresentaram diferença significativa entre as rugosidades geradas pelas ferramentas MD-A e MD-B ($F_{cr} = 7,71$; $F_{calc160} = 446$, $F_{calc180} = 570$ e $F_{calc200} = 273$).

As Figuras 6.17, 6.18 e 6.19 mostram os valores obtidos para cada combinação de velocidade de corte utilizada nos ensaios.

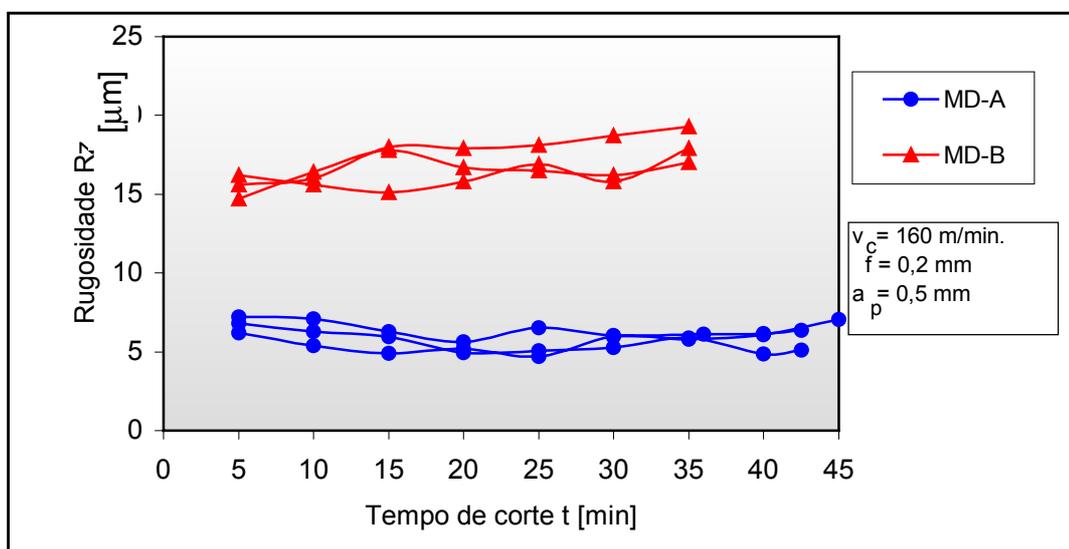


Figura 6.17: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas MD-A e MD-B, na velocidade de corte de 160 m/min.

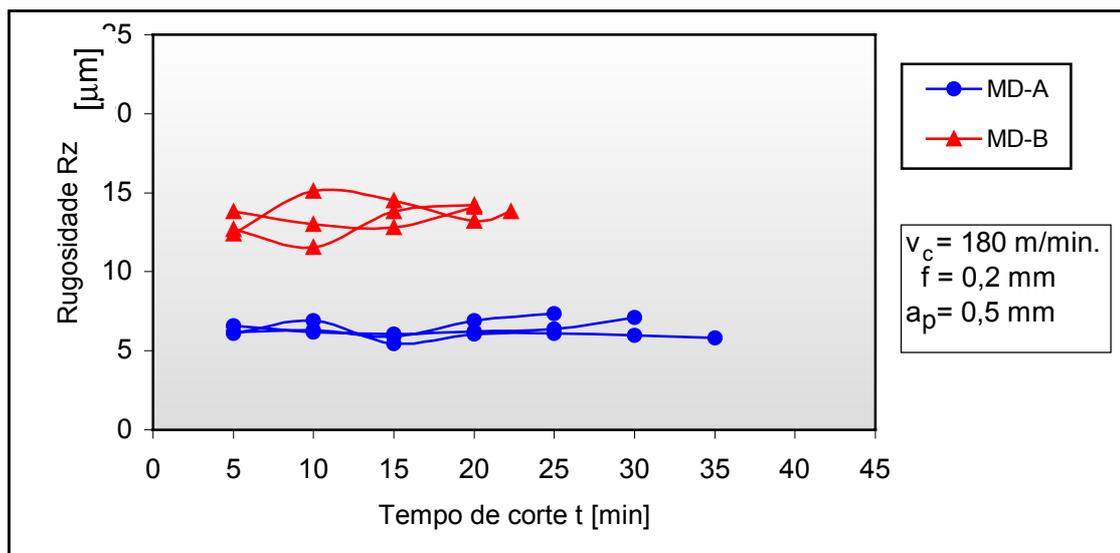


Figura 6.18: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas MD-A e MD-B, na velocidade de corte de 180 m/min.

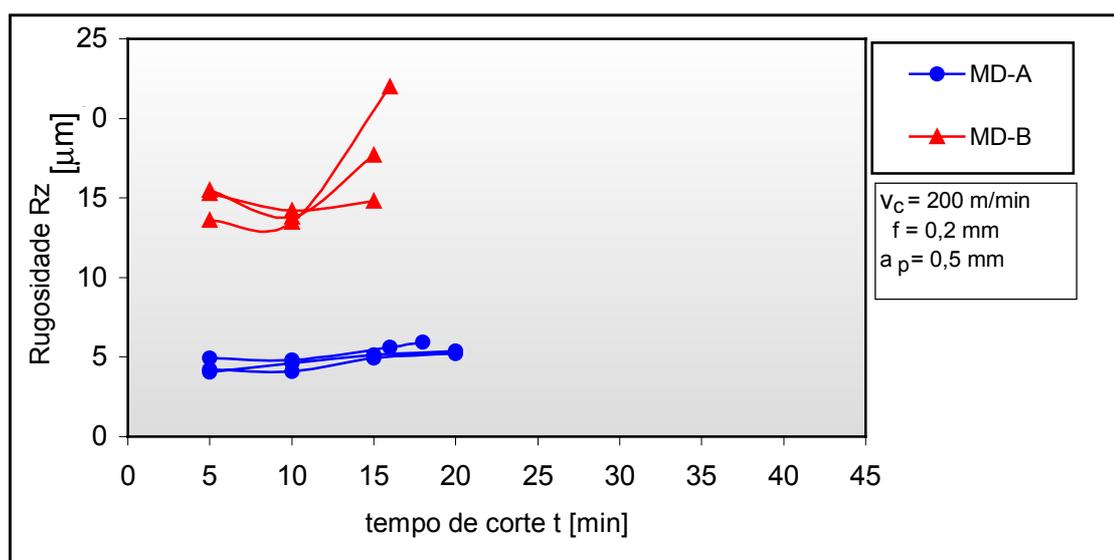


Figura 6.19: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas MD-A e MD-B, na velocidade de corte de 200 m/min.

Os resultados nas figuras anteriores não deixam dúvida quanto à superioridade da ferramenta MD-A, pois proporciona uma rugosidade aproximadamente 50% menor do que a ferramenta MD-B.

Como causa principal para essa significativa diferença nos valores de rugosidade R_z entre as ferramentas MD-A e MD-B, é apontada a diferença encontrada na forma das quinas. A ferramenta MD-A apresenta uma quina alisadora que combina chanfro

e raio, como é descrito no Capítulo 5, item 5.3.1, enquanto que a MD-B possui apenas um raio que une os gumes principal e secundário. Assim, o resultado em questão representa um importante benefício para a textura da peça, no entanto, é importante investigar se a ferramenta MD-A não compromete a integridade da peça, uma vez que uma maior deformação plástica pode ocorrer logo abaixo da sua camada limite externa. Esta investigação não faz parte do escopo deste trabalho.

6.2 Ferramentas cerâmicas

6.2.1 Ferramenta CR-A

Em função dos custos envolvidos, os ensaios utilizando as cerâmicas CR-A foram restritos a 4 gumes, não existindo, desta forma, a possibilidade de repetição dos experimentos para todas as velocidades em questão.

Para a condição 1, foi utilizada uma velocidade de corte de 500 m/min, com profundidade de corte 0,5 mm e avanço de 0,2 mm.

Nesta condição, a ferramenta CR-A durou apenas 5 minutos, apresentando um desgaste prematuro. A curva de desgaste da ferramenta CR-A é mostrada na Figura 6.20.

Os resultados obtidos pela ferramenta CR-A se mostram coerentes com os obtidos por Leuze (2000), quando este usou ferramentas de cerâmicas denominadas por “Ker” com velocidade de corte de 400 m/min, avanço igual 0,3 mm e profundidade de corte de 0,15 mm, obteve um tempo de 2,5 minutos.

Em outro estudo realizado por Reuter (2000b), utilizando ferramentas cerâmicas à base de Si_3N_4 , o referido autor obteve um resultado um pouco superior, pois alcançou um tempo de vida de aproximadamente 15 minutos. Os dados de entrada da usinagem utilizados por ele foram: v_c de 400 m/min, a_p de 2 mm e f de 0,15 mm.

Com o objetivo de identificar e entender melhor as causas que levaram a ferramenta cerâmica a apresentar um baixo desempenho durante a usinagem do CGI, foram feitas análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV). O resultado da análise pode ser visualizado na Figura 6.21.

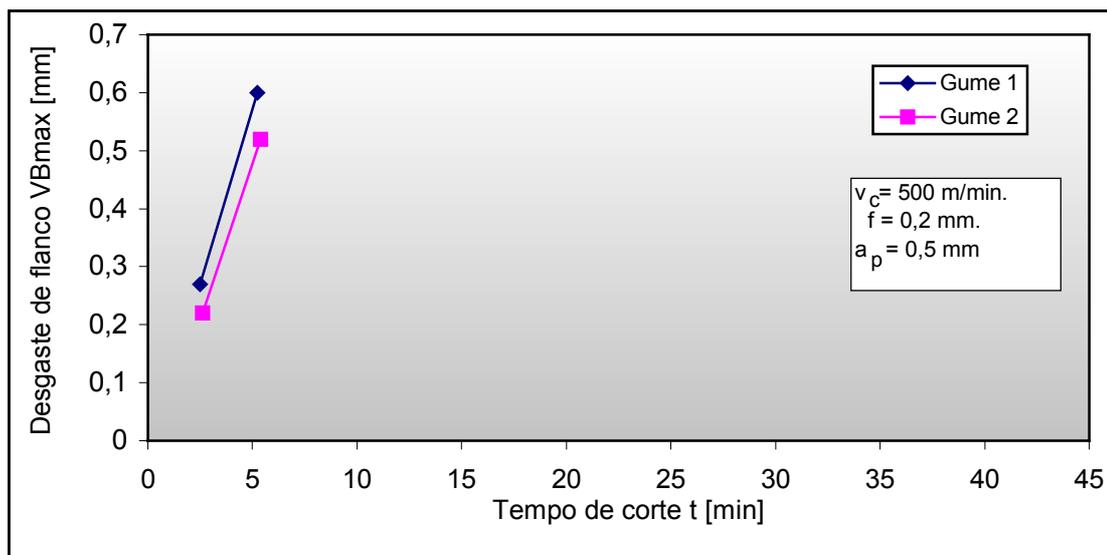


Figura 6.20: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-A, com velocidade de corte de 500 m/min.

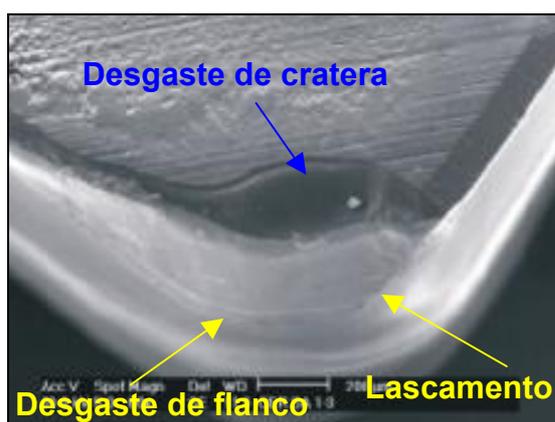


Figura 6.21: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-A na condição 1.

Analisando a figura anterior, é possível identificar desgaste de cratera na face, desgaste abrasivo no flanco e um severo lascamento durante a usinagem, ocorridos, provavelmente, por problemas relacionados à máquina-ferramenta ou a inclusões nos materiais usinados.

Para a realização dos ensaios da condição 2, foi usada uma velocidade de corte igual a 350 m/min, mantendo as mesmas condições de avanço e profundidade de corte utilizadas na condição 1.

Neste ensaio, a ferramenta CR-A também exibiu um desgaste prematuro, alcançando rapidamente o fim da vida da ferramenta, como revela a Figura 6.22.

Nesta condição apresentada, nenhum autor realizou testes, ficando os resultados

obtidos por Leuze (2000), citado anteriormente, como a condição mais próxima. O resultado obtido por Leuze apresentou um desempenho superior ao da ferramenta CR-A.

Na realização deste trabalho, a falta de dados na literatura sobre a usinagem do ferro fundido vermicular por ferramentas cerâmicas foi um dos problemas identificados.

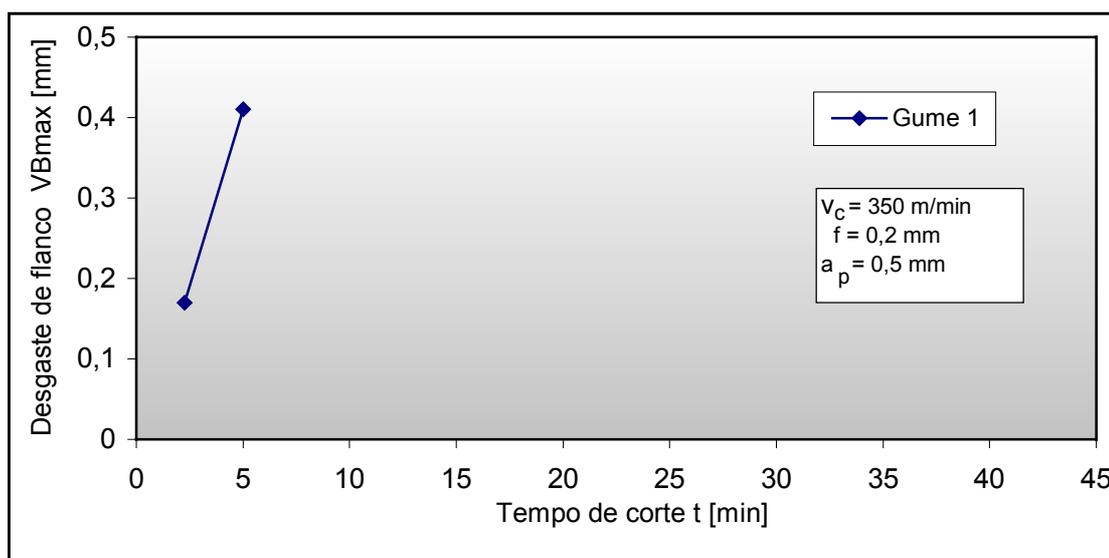


Figura 6.22: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-A, com velocidade de corte de 350 m/min.

Realizando a análise da ferramenta no MEV, pôde-se identificar o mesmo tipo de desgaste ocorrido na ferramenta utilizada na condição 1, desgaste de cratera na face, desgaste abrasivo no gume e lascamento (Figura 6.23).

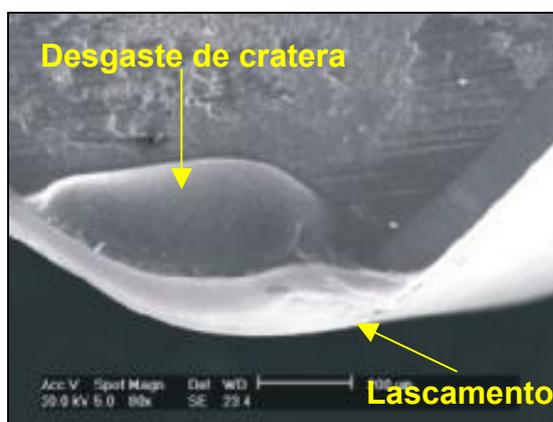


Figura 6.23: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-A na condição 2.

O ensaio utilizando a condição de corte 3, com velocidade de corte de 200 m/min, não foi realizado devido a falta de ferramentas.

Para finalizar a análise das ferramentas CR-A, foi feita uma comparação entre as condições utilizadas durante os ensaios (Figura 6.24).

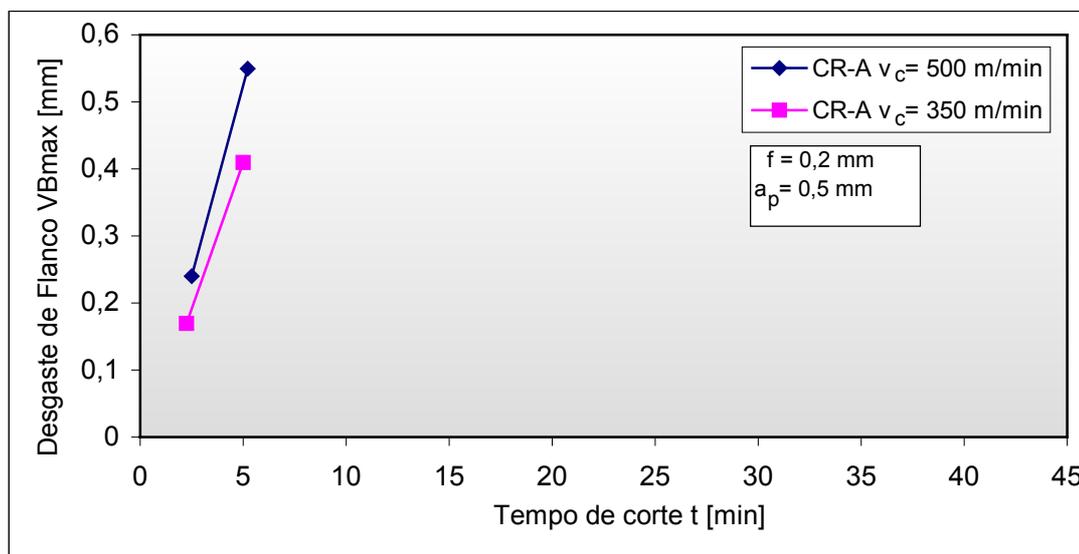


Figura 6.24: Comparação entre as curvas de desgaste da ferramenta CR-A.

Na figura acima, identifica-se uma sutil contribuição da velocidade de corte para o excessivo desgaste das ferramentas. À medida que aumenta a velocidade de corte, o desgaste é mais intenso, resultado igualmente encontrado por Reuter (2000b) e Leuze (2000).

Porém, o aumento da velocidade não pode ser aceito como única explicação para o menor tempo de vida das ferramentas cerâmicas, podendo este estar diretamente ligado a afinidades químicas entre a peça e a ferramenta e também às características dinâmicas da máquina-ferramenta utilizada.

6.2.2 Ferramenta CR-B

Na realização dos testes com as ferramentas CR-B, não houve nenhum problema quanto à quantidade de gumes disponíveis, sendo possível realizar os testes com as três condições.

Na condição 1, usando velocidade de corte de 500 m/min, profundidade de corte de 0,5 mm e avanço de 0,2 mm, a ferramenta CR-A apresentou um tempo de vida

médio de aproximadamente 4 minutos.

A Figura 6.25 ilustra o comportamento da curva de desgaste da ferramenta CR-A, na condição 1.

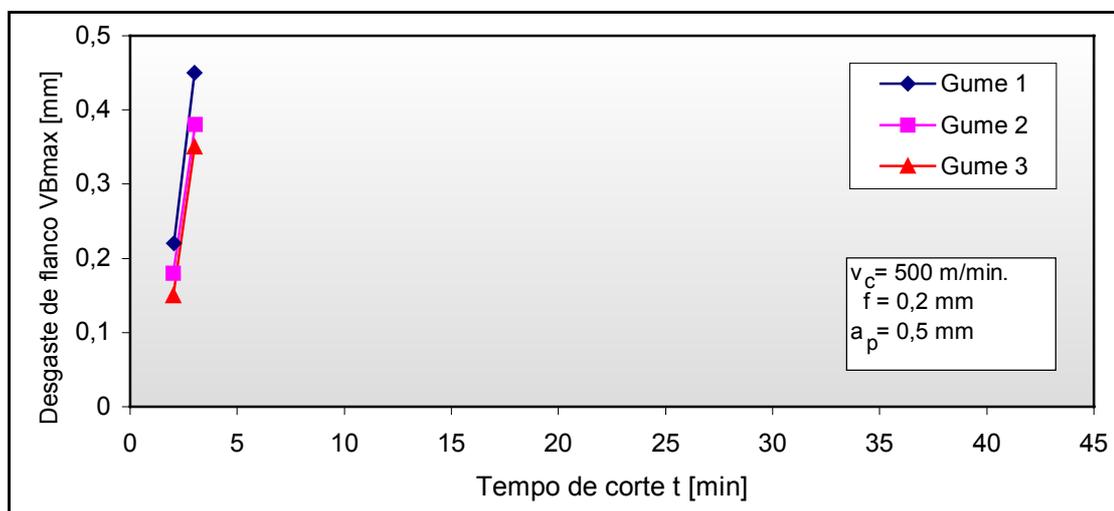


Figura 6.25: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-B, com velocidade de corte de 500 m/min.

Da mesma forma que ocorreu com a ferramenta CR-A, quando comparado o seu resultado com o obtido por autores como Reuter (2000b) e Leuze (2000), a ferramenta CR-B apresentou um tempo de vida inferior.

A ferramenta utilizada alcançou rapidamente o valor máximo especificado para desgaste de flanco, mostrando que, usando a ferramenta CR-B nestas condições de corte, os resultados não são satisfatórios para a usinagem do ferro fundido vermicular, pois se tem um desgaste excessivo da ferramenta, o que aumenta o consumo de energia para a realização do corte e piora a qualidade da superfície gerada.

A Figura 6.26, que caracteriza o desgaste da ferramenta, chama a atenção pela presença de uma cratera larga e profunda, que faz com que o gume fique enfraquecido, estando sujeito a entrar em colapso e acarretar sérios prejuízos à peça, à ferramenta, ao porta-ferramenta e, em últimos casos à máquina-ferramenta.

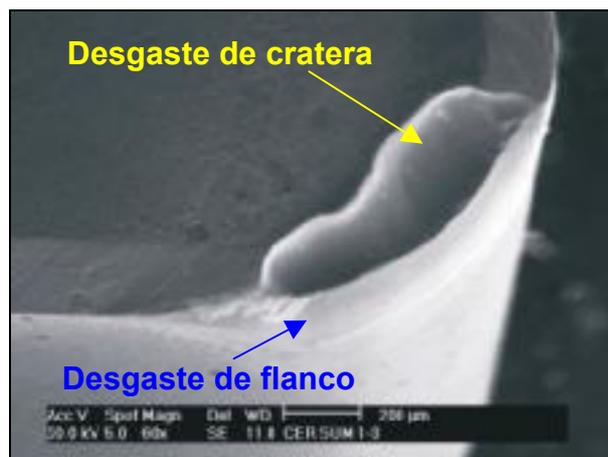


Figura 6.26: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-B na condição 1.

Na segunda parte dos testes da ferramenta CR-B, foram realizados os ensaios especificados na condição 2. Os resultados obtidos indicam que a ferramenta teve uma vida de aproximadamente 5 minutos, mostrando um comportamento de desgaste parecido com o obtido na condição 1 (Figura 6.27).

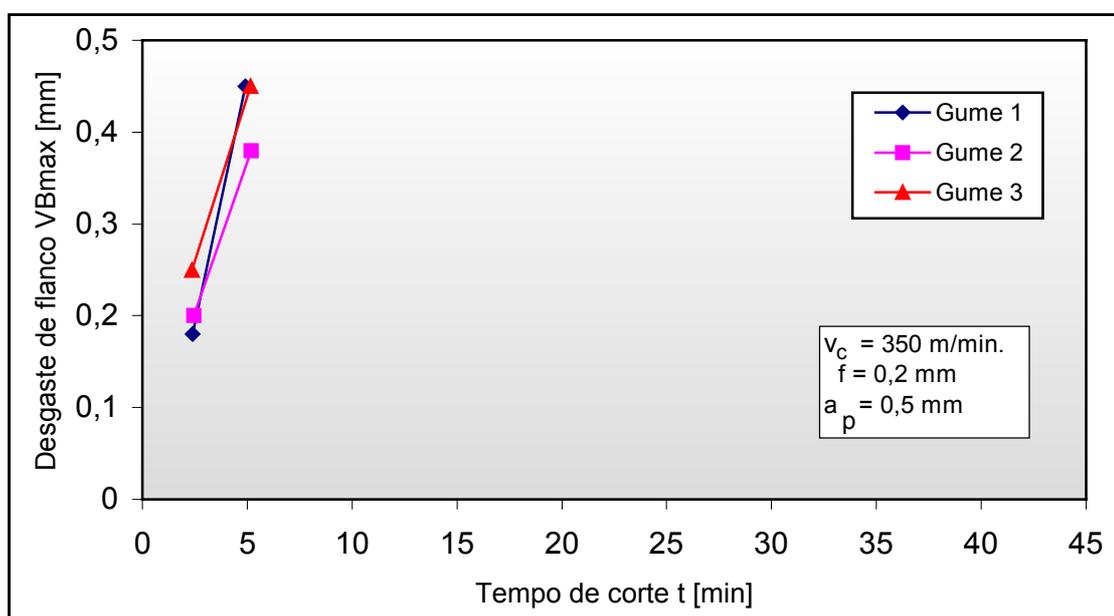


Figura 6.27: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-B, com velocidade de corte de 350 m/min.

O resultado obtido com a ferramenta, nesta condição, não pode ser comparado com o resultado de outros autores, já que na literatura não foram encontrados dados nesta condição. As condições mais próximas para uma possível comparação foram

as utilizadas por Reuter (2000b) e Leuze (2000).

Comparando os resultados com os obtidos por Reuter (2000b), a ferramenta alcançou apenas 33% do tempo total por ele alcançado, enquanto que, comparando com Leuze (2000), a ferramenta CR-B alcançou o mesmo tempo que a ferramenta por ele denominada de “Ker05”.

Na análise da ferramenta realizada no MEV, essa, como era de se esperar, apresentou as mesmas características de desgaste na condição 1. Ou seja, uma cratera larga e profunda, como aponta a Figura 6.28.

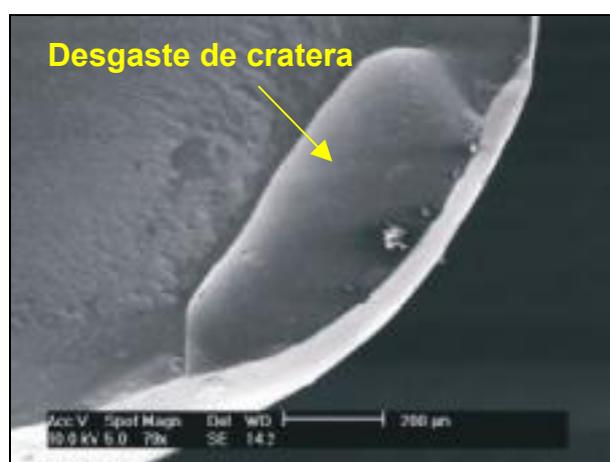


Figura 6.28: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-B na condição 2.

No último ensaio utilizando ferramentas cerâmicas, condição 3, a velocidade de corte foi reduzida para 200 m/min, mantendo os demais parâmetros como profundidade de corte e avanço inalterados, como é descrito na Figura 6.29.

Nestas condições, a ferramenta alcançou um tempo de vida em torno de 10 minutos, superior ao resultado obtido por Leuze (2000), que utilizou uma ferramenta cerâmica denominada por “Ker” e velocidade de corte de 250 m/min, sua vida foi de 8 minutos.

Reuter (2000b), utilizando ferramentas de Si_3N_4 com velocidade de corte de 400 m/min, profundidade de corte de 2 mm e avanço de 0,15 mm, obteve um tempo de vida de 12,5 minutos, tempo este 2,5 minutos superior ao alcançado com a ferramenta CR-B na condição 3. Em geral, na usinagem com cerâmicas, a velocidade de corte de 200 m/min é considerada baixa para usinar o ferro fundido.

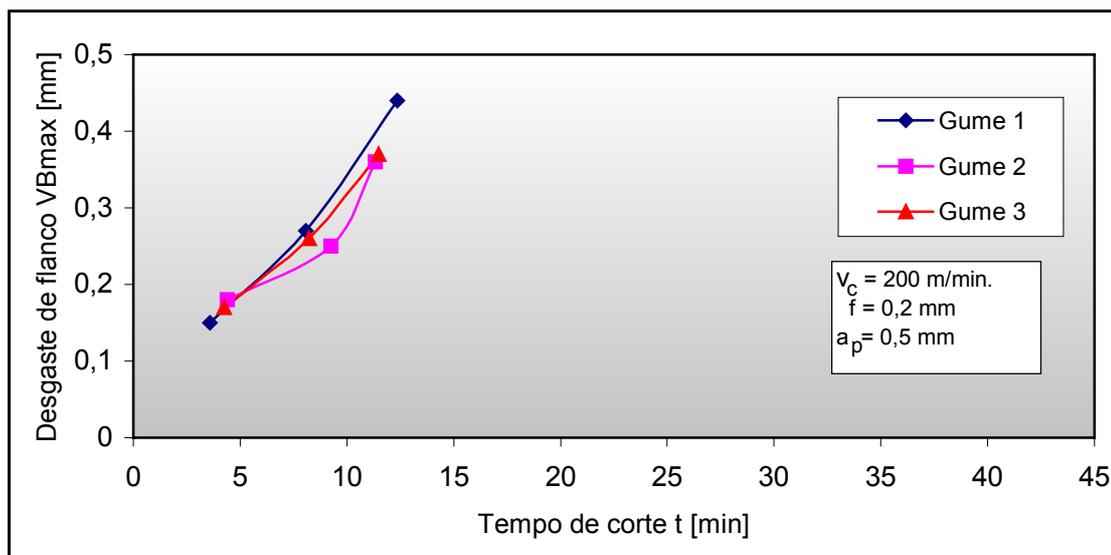


Figura 6.29: Comportamento do desgaste da ferramenta CR-B, com velocidade de corte de 200 m/min.

Ainda como parte da análise da ferramenta CR-B, utilizada na condição 3, foi feita uma análise no MEV, na qual se identificou um desgaste menos intenso do que os observados nas condições 1 e 2 (Figura 6.30).



Figura 6.30: Caracterização do desgaste da ferramenta CR-B na condição 3.

Para finalizar a análise da ferramenta CR-B, foi realizada a comparação das três condições de corte utilizadas durante os ensaios. Nesta análise, verifica-se que uma das causas que explica o baixo desempenho das ferramentas de cerâmicas pode ser creditada ao aumento da velocidade de corte, porém, esta não é a única. Os baixos tempos de vida obtidos mostram que podem existir outras causas, como a

difusão, que influenciam significativamente o desgaste das ferramentas (Figura 6.31).

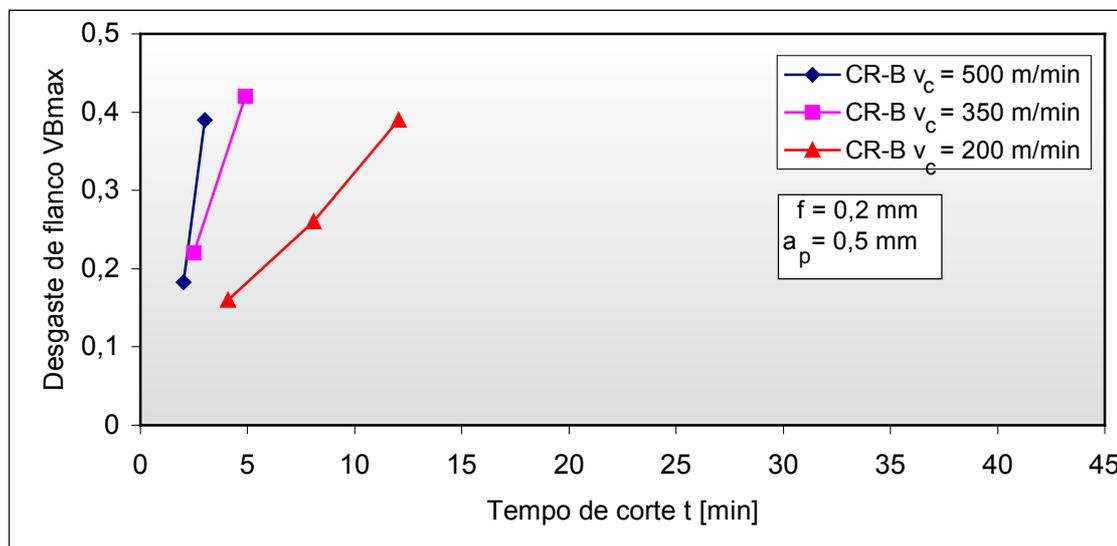


Figura 6.31: Comparação entre as curvas de desgaste da ferramenta CR-B.

As cerâmicas CR-B não apresentaram resultados satisfatórios durante a usinagem do CGI, o melhor resultado obtido foi com a velocidade de corte igual a 200 m/min, condição 3.

Ainda analisando a Figura 6.31, é possível identificar relação entre o aumento da velocidade de corte com o excessivo desgaste das ferramentas. À medida que aumenta a velocidade de corte, o desgaste é mais intenso, resultado igualmente encontrado por Reuter (2000b) e Leuze (2000).

6.2.3 Comparação entre as ferramentas CR-A e CR-B

A comparação destas ferramentas foi feita somente sob duas condições, a condição 1 ($v_c = 500$ m/min) e a condição 2 ($v_c = 350$ m/min), em função do número limitado de gumes fornecido pelo fabricante A.

A Figura 6.32 mostra a comparação entre as ferramentas CR-A e CR-B. Nela, se observa que as diferenças entre os tempos de vida são muito tênues.

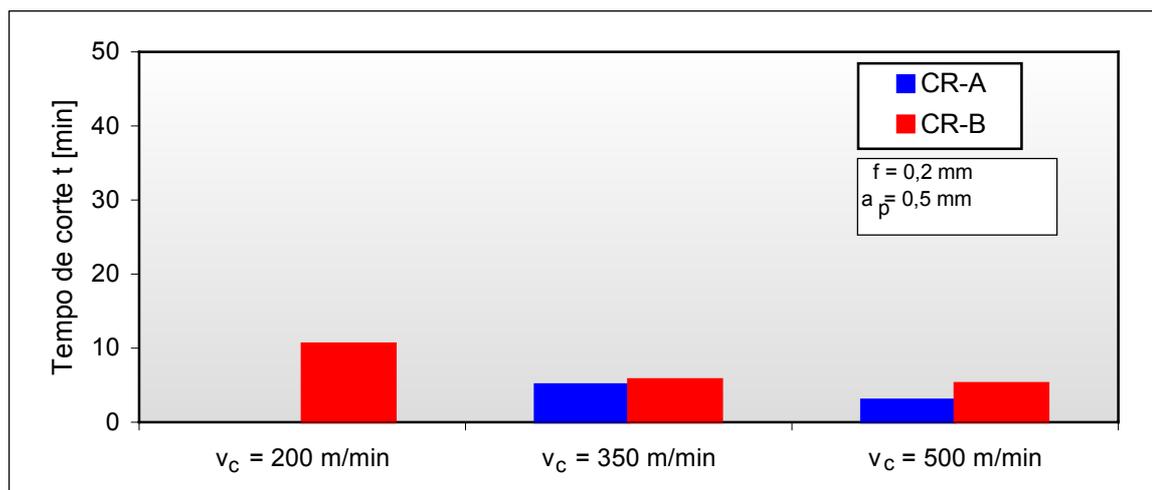


Figura 6.32: Comparação dos tempos de vida obtidos entre as ferramentas CR-A e CR-B.

Na comparação entre as ferramentas, utilizando velocidade de corte de 500 m/min, a ferramenta B apresenta uma pequena vantagem sobre a concorrente. Se essa diferença não fosse tão pequena, pode ser atribuída à presença de revestimento da ferramenta B. Todavia, devido ao seu tamanho, esta pode ter sido causada por fatores externos, como vibração durante a usinagem.

Para a verificação do efeito do aumento da velocidade, foi desenhada a curva de vida da ferramenta, como pode ser visto na Figura 6.33.

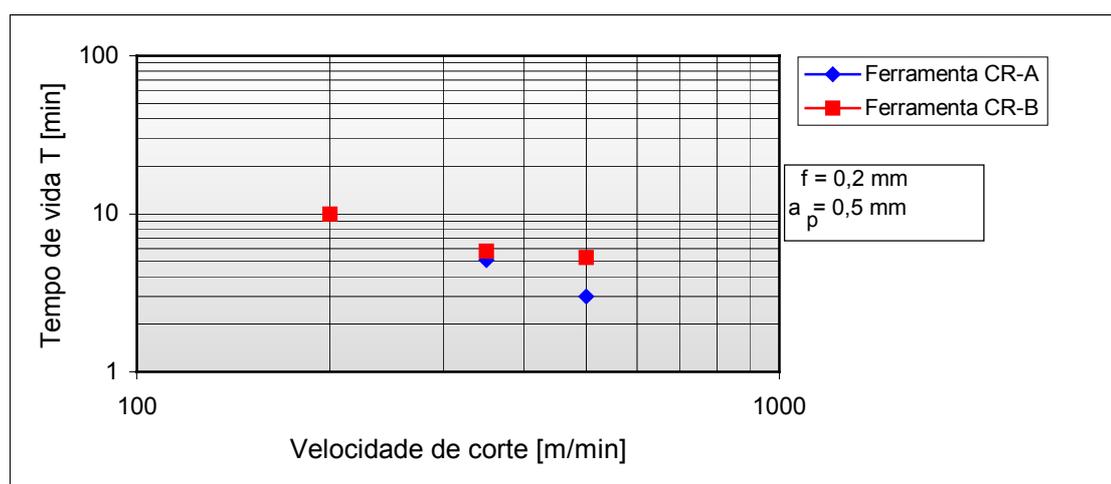


Figura 6.33: Curva de vida para as ferramentas CR-A e CR-B.

Analisando a Figura 6.33, observa-se que, na reta gerada pela ferramenta CR-B, aparece um ponto disperso que se aproxima da reta da CR-A. Esta aproximação

pode ter sido causada por erros de medição e problemas de vibração durante a usinagem. De uma maneira geral, verifica-se que, com o aumento da velocidade de corte, tem-se um aumento da taxa de desgaste da ferramenta, resultado coerente com os destacados por Phillips (197-), Reuter (2000a), Reuter (2000b) e Leuze (2000).

Durante a usinagem do CGI, ambas as ferramentas cerâmicas mostraram baixo desempenho.

Da mesma forma como realizado com as ferramentas de metal-duro, foram calculados os coeficientes para a equação de Taylor, utilizando as mesmas equações descritas anteriormente (6.1; 6.2 e 6.3).

Os resultados são mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Cálculo das constantes da equação de Taylor para as ferramentas cerâmicas.

Ferramenta	V_{c1} [m/min]	T_1 [min]	V_{c2} [m/min]	T_2 [min]	k	C_V [min]	C_T [m/min]
CR-A	350	5,1	500	3	-1,49	31520	1045
CR-B	200	10,6	500	5,3	-0,76	594,41	4468

Os baixos valores de k (-0,76) e C_V (594,6) podem ser atribuídos à presença de inclusões no material ou devido a choques durante a usinagem.

6.2.4 Análise química das ferramentas cerâmicas

Em função dos resultados obtidos e do desgaste de cratera ocorrido com as ferramentas cerâmicas na usinagem do ferro fundido vermicular, foram realizadas análises químicas com uma ferramenta CR-A e outra CR-B, ambas utilizadas na condição 1.

O objetivo da análise era investigar a presença de elementos sobre a superfície das ferramentas, que pudessem, depois de analisados, ser um indicativo de uma possível ocorrência de difusão.

Os resultados das análises podem ser visualizados na Figura 6.34 (a) e (b).

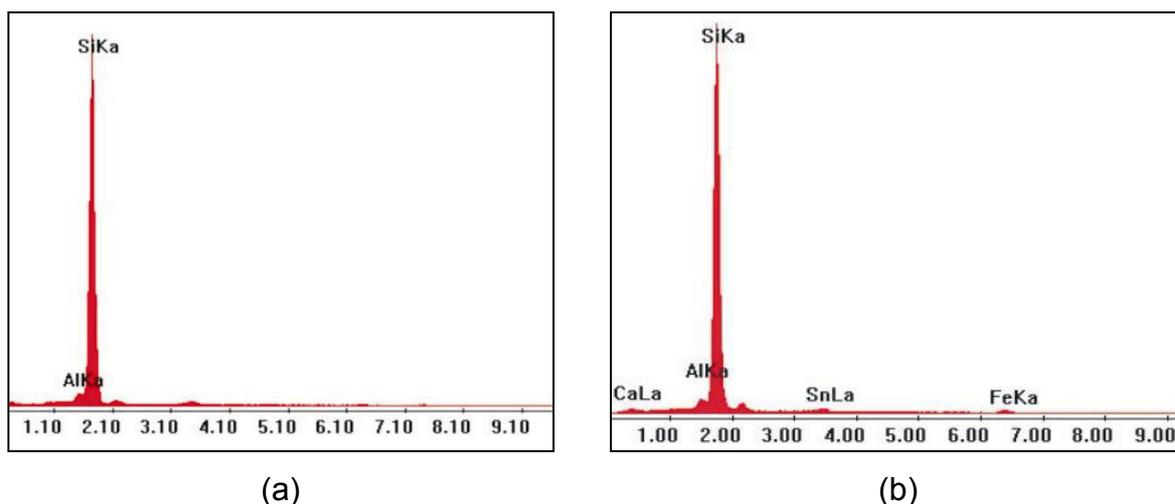


Figura 6.34: Espectro da análise química: a) Ferramenta CR-A na condição 1; b) Ferramenta CR-B na condição 1.

Os resultados obtidos em ambas as ferramentas mostram-se parecidos, tendo um pico elevado de Si na camada $K\alpha$. A ferramenta CR-A, além do Si, apresentou ainda traços de alumínio, enquanto que a ferramenta CR-B apresentou cálcio, estanho, ferro e alumínio.

A pequena presença de ferro na superfície da ferramenta CR-B pode ser um indicativo da ocorrência de difusão durante a usinagem. Porém, para uma conclusão específica sobre a possibilidade da ocorrência de difusão durante a usinagem, é necessária uma investigação mais detalhada sobre um número maior de amostras.

Na literatura pesquisada, não foi encontrado nenhum trabalho referente a estudos de difusão entre ferramentas de nitreto de silício e o ferro fundido vermicular.

6.2.5 Qualidade da superfície gerada

Devido aos ensaios de torneamento com cerâmicas terem somente dois pontos de medição de rugosidade, foi difícil fazer uma análise dos resultados obtidos.

As medições realizadas indicaram que, em todas as condições medidas, a ferramenta CR-A possuiu uma rugosidade R_z 50% menor que a gerada pela ferramenta CR-B, como pode ser visto nas Figuras 6.35 e 6.36.

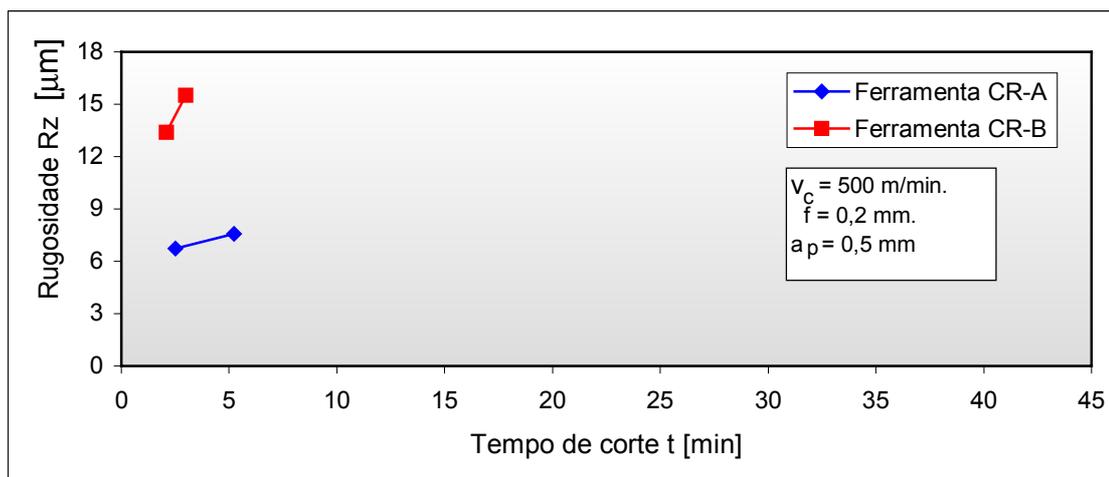


Figura 6.35: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas CR-A e CR-B, na velocidade de corte de 500 m/min.

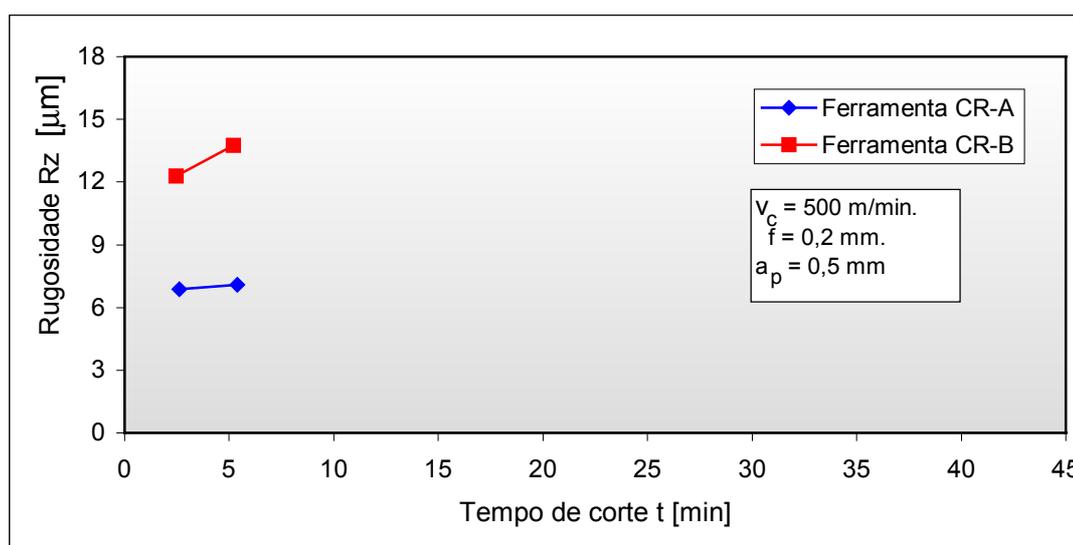


Figura 6.36: Curvas de rugosidade R_z para as ferramentas CR-A e CR-B, na velocidade de corte de 350 m/min.

A diferença encontrada de 50% nos valores medidos é atribuída à geometria das ferramentas, pois a ferramenta CR-A apresenta uma quina alisadora, fato explicado anteriormente no item 6.1.4.

Outra observação feita é a tendência de piora da qualidade da superfície com o passar do tempo, já que a ferramenta, no decorrer do tempo, vai tendo seu desgaste de flanco aumentado, o que dificulta o corte e, por conseqüência, piora a qualidade da superfície.

6.3 Ferramentas de CBN

6.3.1 Ferramenta CB-A

Em função do elevado custo das ferramentas fabricadas de CBN, foram fornecidos 4 gumes de corte. Novamente, os ensaios não puderam ser repetidos em função do número limitado de gumes disponíveis.

Como condição 1, foram testados dois gumes da ferramenta CB-A, com velocidade de corte igual a 700 m/min, avanço de 0,2 mm e profundidade de corte de 0,2 mm.

Neste ensaio, a ferramenta obteve uma vida em torno de 4,5 minutos, o que configura um desgaste prematuro. A Figura 6.37 mostra a curva de desgaste obtida pela ferramenta de CB-A.

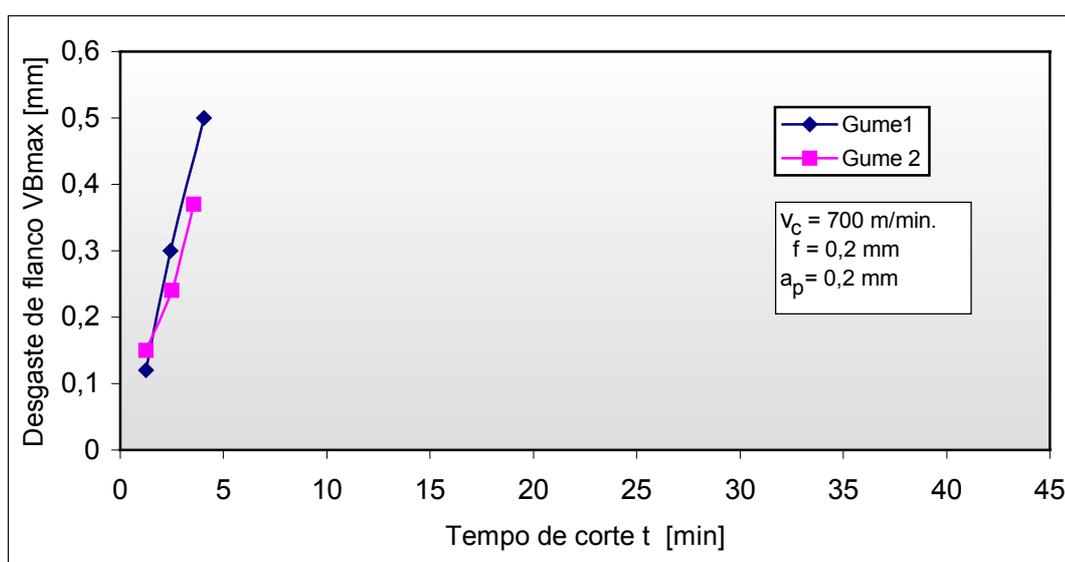


Figura 6.37: Comportamento do desgaste da ferramenta CB-A, com velocidade de corte de 700 m/min.

O tempo de vida obtido nos ensaios coincide com o tempo obtido por Dawson (1999), quando no seu experimento alcançou uma vida de aproximadamente 5 minutos.

As ferramentas por ele utilizadas não foram descritas no trabalho, contendo apenas os resultados gerais da pesquisa.

Para esta condição, a ferramenta foi submetida à análise no MEV para a

caracterização da forma de desgaste atuante. A análise revelou um desgaste de cratera excessivo sobre a face da ferramenta, a tal ponto que se encontrou com o desgaste de flanco e destruiu a quina da ferramenta. Esta forma de desgaste foi o mesmo identificado por Gastel (2000) e Reuter et al. (2000), como enfatizado anteriormente no capítulo 4 (Figura 4.20). A Figura 6.38 exhibe a caracterização do desgaste da ferramenta.



Figura 6.38: Caracterização do desgaste da ferramenta CB-A na condição 1.

Como última parte do teste de usinagem com a ferramenta CB-A, realizou-se o ensaio com a condição 2, com: velocidade de corte de 550 m/min, avanço de 0,2 mm e profundidade de corte de 0,2 mm.

O resultado obtido nesta condição não difere muito do apresentado na condição 1, obtendo também um desgaste prematuro durante a usinagem (Figura 6.39).

Na análise do MEV, a ferramenta apresentou a mesma característica de desgaste quando utilizada na condição 1 e, sendo assim, ela também mostra as mesmas características apresentadas por Gastel (2000) e Reuter et al. (2000), como pode ser visto na Figura 6.40.

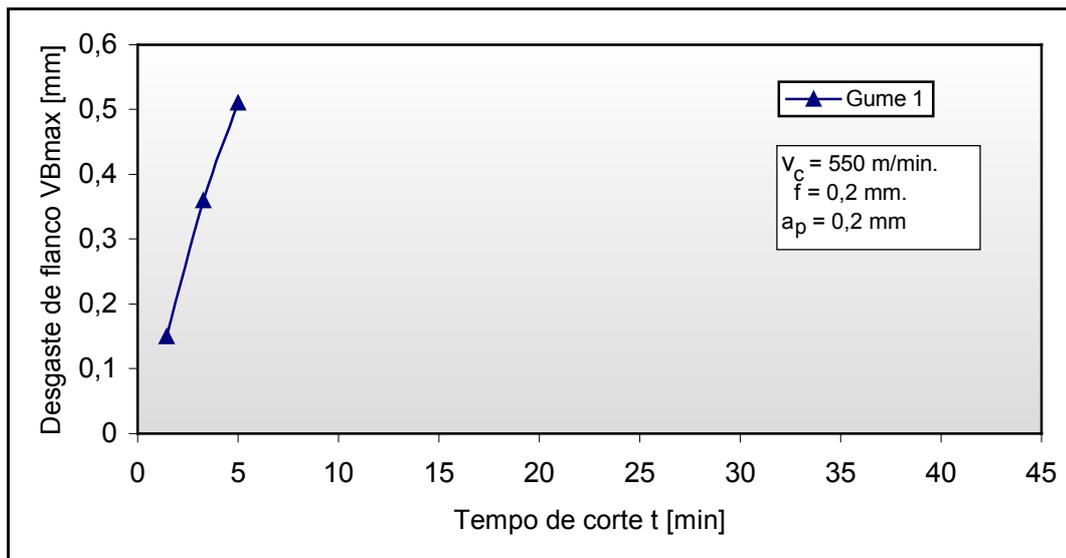


Figura 6.39: Comportamento do desgaste da ferramenta CB-A, com velocidade de corte de 550 m/min.

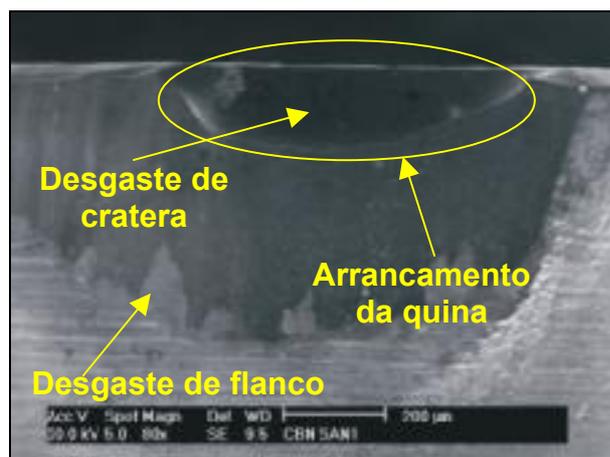


Figura 6.40: Caracterização do desgaste da ferramenta CB-A na condição 2.

O tempo de vida obtido pelas ferramentas foi plotado em uma única figura. O objetivo foi facilitar a análise do efeito do aumento da velocidade de corte na vida das ferramentas (Figura 6.41).

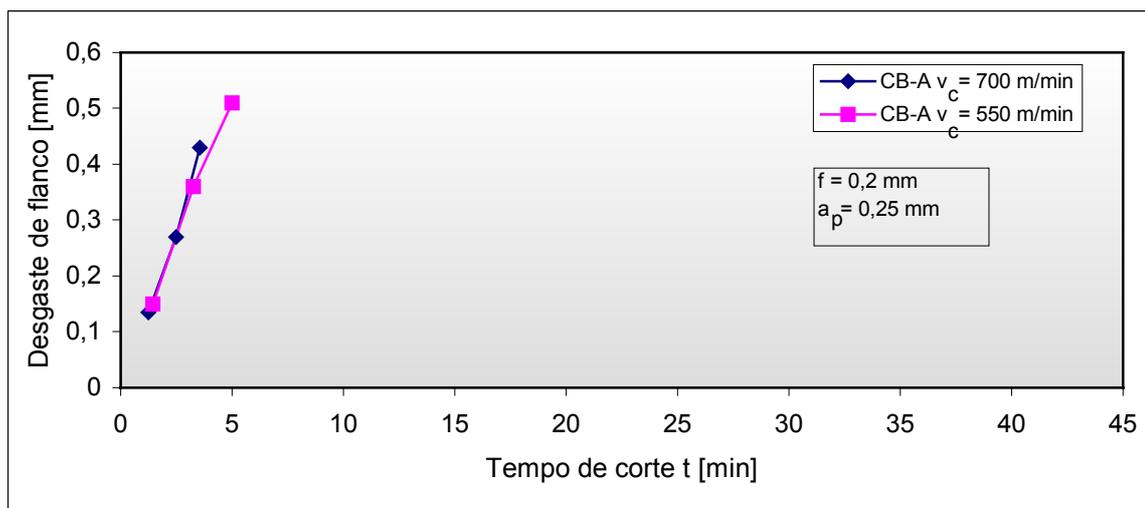


Figura 6.41: Comparação entre as curvas de desgaste da ferramenta CB-A.

A análise da Figura 6.41 não indica diferença significativa nos tempo de vida utilizando velocidades de corte diferentes. O motivo que faz com que não seja possível a identificação de diferenças entre as curvas pode ser a incapacidade da ferramenta CB-A em usinar o ferro fundido vermicular devido a sua afinidade química com o material. Também não se podem descartar fatores externos que influenciam no processo, como rigidez da máquina e possíveis vibrações.

6.3.2 Ferramenta CB-B

Em decorrência do seu elevado custo, o número de gumes disponíveis na ferramenta CB-B para a realização dos ensaios não proporcionou a repetição dos experimentos nas condições de corte utilizadas.

Como condição 1, utilizou-se: velocidade de corte de 700 m/min, avanço de 0,2 mm e profundidade de corte de 0,2 mm. A Figura 6.42 indica a curva de desgaste obtida na realização do ensaio.

Os resultados obtidos se mostram coerentes com aqueles obtidos por Gastel (2000) e Reuter et al. (2000) quando utilizaram ferramentas de CBN e obtiveram o mesmo tempo de vida da ferramenta.

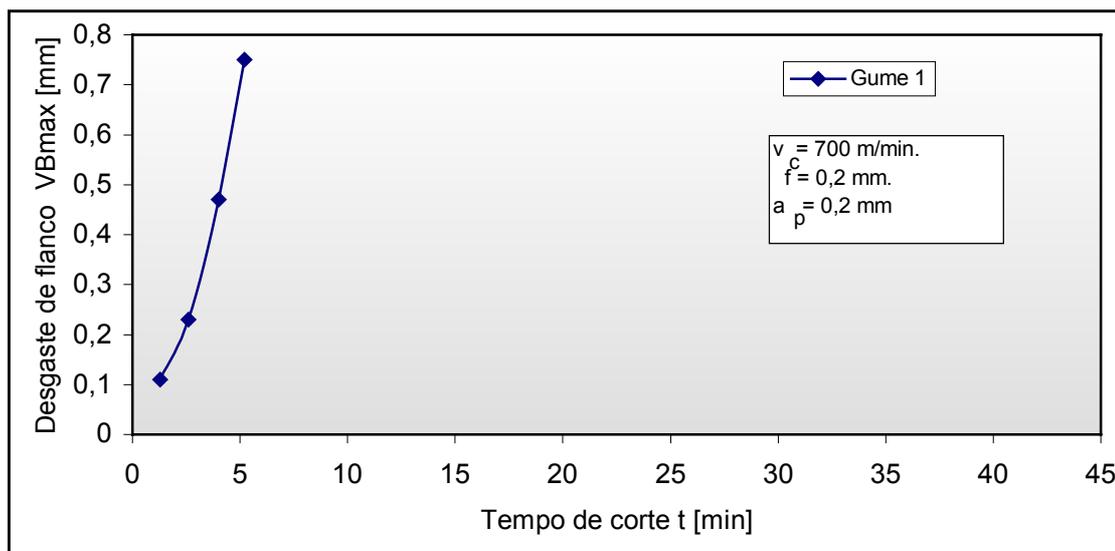


Figura 6.42: Comportamento do desgaste da ferramenta CB-B, com velocidade de corte de 700 m/min.

A análise no MEV da ferramenta CB-B, na condição 1, possibilitou identificar a presença do desgaste na face e nos flancos, tendo com uma das possíveis causas a abrasão e a difusão (Figura 6.43). Estes mesmos tipos de mecanismos de desgaste também foram detectados por Gastel (2000) e Reuter et al. (2000) nas ferramentas de CBN, quando utilizadas na usinagem do ferro fundido vermicular.

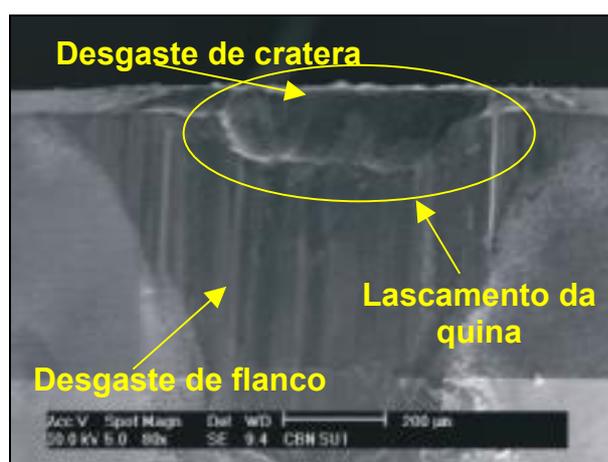


Figura 6.43: Caracterização do desgaste da ferramenta CB-B na condição 1.

Na análise da Figura 6.43, é possível observar também que a marca de desgaste no flanco alcançou o material base sobre o qual está ancorado o CBN. Isto ocorreu, porque se procurou verificar se, com o aumento progressivo do desgaste da

ferramenta, haveria um prejuízo para o acabamento da superfície usinada, o qual será apresentado mais adiante.

O último ensaio de usinagem para a presente pesquisa foi realizado com a ferramenta CB-B na condição 2. Neste ensaio, foi utilizada a velocidade de corte de 550 m/min, avanço de 0,2 mm e profundidade de corte de 0,2 mm.

O resultado apresentado na Figura 6.44 indica que a ferramenta CB-B, nesta condição, também possui um baixo rendimento na usinagem do ferro fundido vermicular, apresentando um tempo de vida de cerca de 5 minutos.

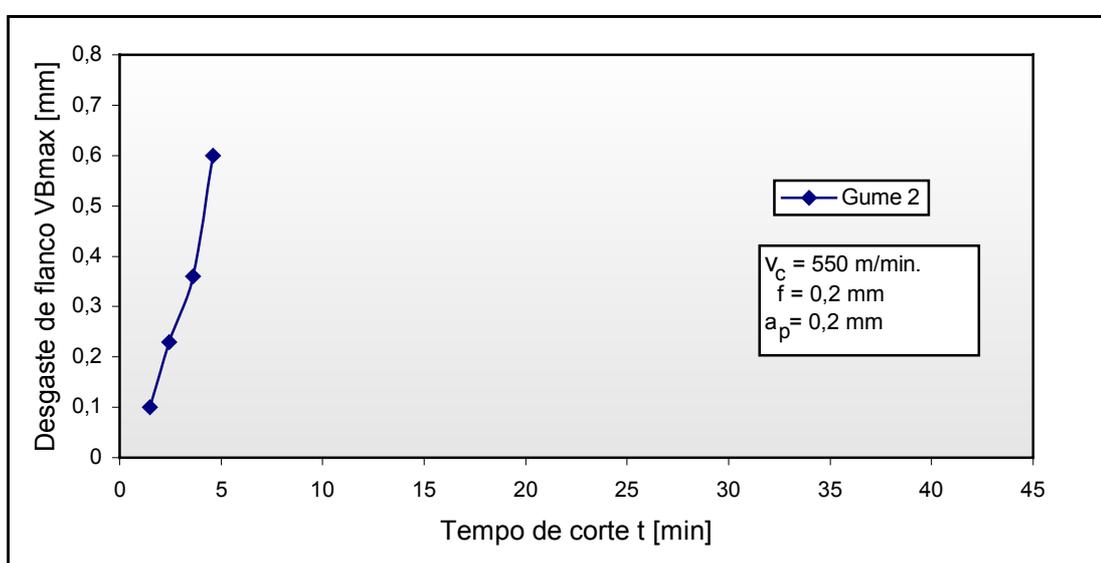


Figura 6.44: Comportamento do desgaste da ferramenta CB-B, com velocidade de corte de 550 m/min.

Para a caracterização do desgaste, a ferramenta foi submetida a uma análise no MEV, onde se observou a presença do desgaste de cratera na face e uma pequena quantidade de material aderido ao flanco da ferramenta. Outro dano identificado foi uma fratura no gume da ferramenta, causada pelo aumento excessivo do desgaste de cratera que se encontrou com o desgaste de flanco e enfraqueceu a quina. Não se pode descartar como causa também a presença de impurezas no material por aderência e desprendimento de material da peça sobre a ferramenta ou por vibrações oriundas da falta de rigidez da máquina ou da ferramenta (Figura 6.45).

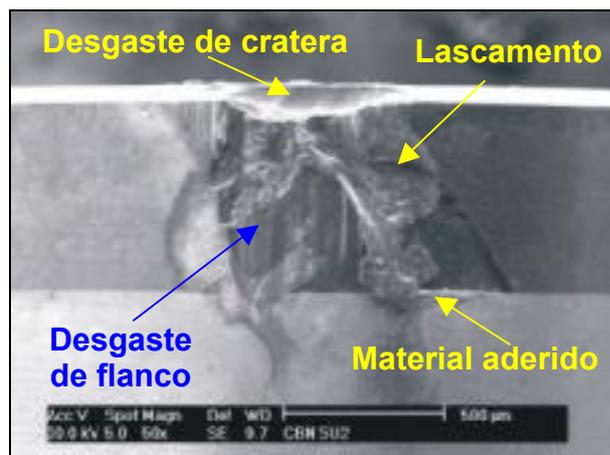


Figura 6.45: Caracterização do desgaste da ferramenta CB-B na condição 2.

Na comparação entre as ferramentas CB-B mostradas na Figura 6.46, não foi possível identificar uma diferença no comportamento dos seus desgastes.

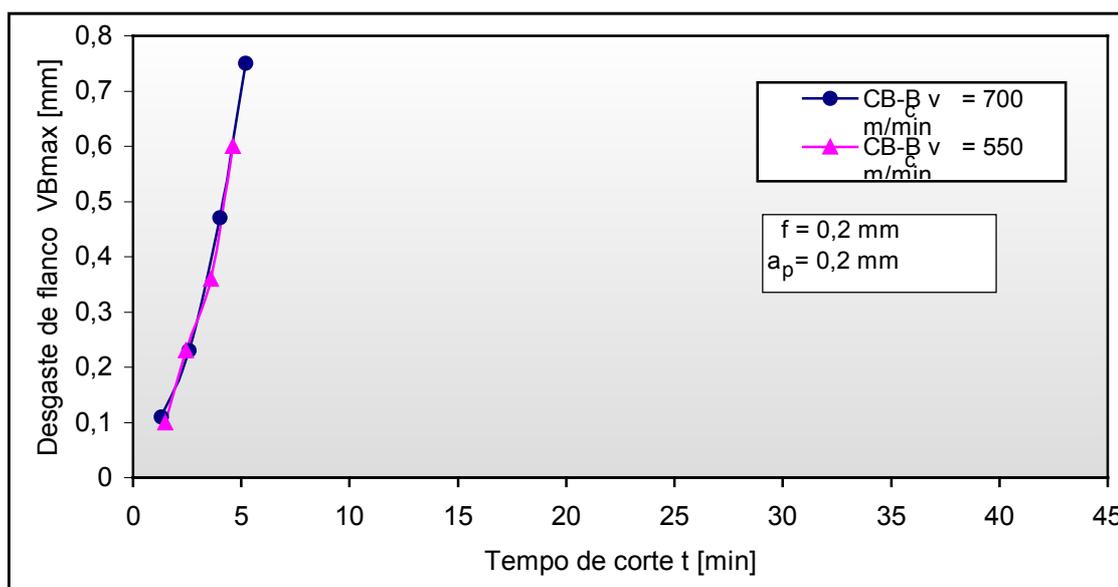


Figura 6.46: Comparação entre as curvas de desgaste da ferramenta CB-B.

6.3.3 Comparação entre as ferramentas CB-A x CB-B

A comparação das ferramentas mostra que não existe uma diferença significativa entre os materiais para ferramentas de corte dos fabricantes A e B (Figura 6.47).

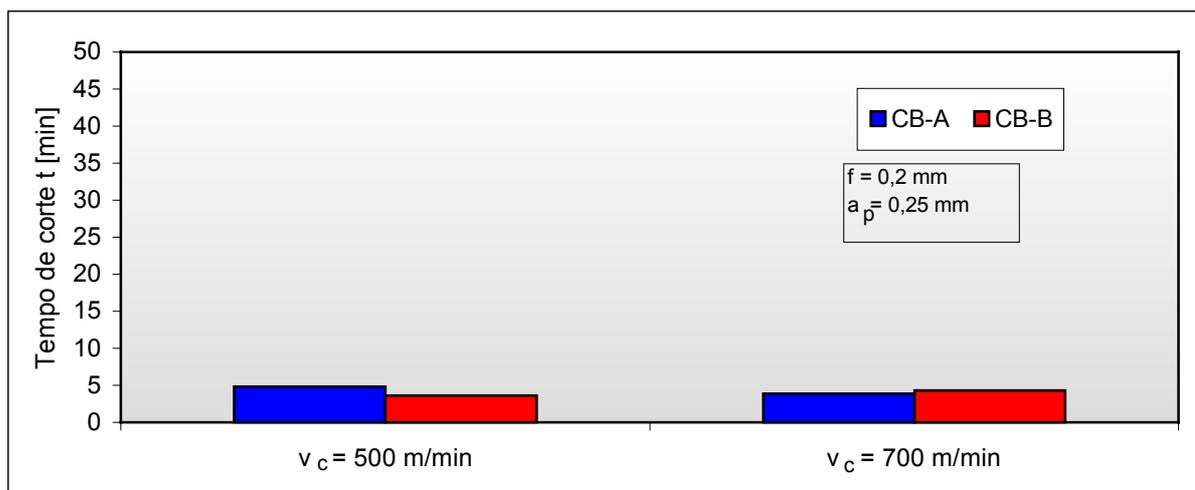


Figura 6.47: Comparação dos tempos de vida obtidos entre as ferramentas CB-A e CB-B.

Analisando a Figura 6.47, verifica-se também que as ferramentas CB-A e CB-B não são apropriadas, nestas condições utilizadas para a usinagem do ferro fundido vermicular, pois proporcionam vidas demasiadamente curtas e desta forma, devido ao seu elevado custo, estas têm pouca chance de competir com as de metal-duro.

Os resultados obtidos por esta pesquisa se mostram de acordo com os divulgados por Gabel (2000) e Reuter et al. (2000).

6.3.4 Análise química das ferramentas de CBN

Para melhor analisar as ferramentas de CBN e poder chegar a um bom entendimento dos mecanismos de desgaste atuantes nestas na usinagem do ferro fundido vermicular, foram realizadas análises químicas com a micro-sonda EDX sobre o local dos desgastes das ferramentas CB-A e CB-B utilizadas em cada uma das condições de usinagem.

A primeira análise foi feita com as ferramentas CB-A. Em ambas foi possível identificar a presença de vários elementos sobre a face da ferramenta, dentre os quais: Fe; Si; oxigênio (O_2); podendo isto identificar a possibilidade de ter ocorrido difusão entre os elementos da peça e da ferramenta.

Estes mesmos elementos também foram encontrados por Gastel (2000) em seu trabalho, principalmente Fe e Si. A Figura 6.48 (a) e (b), destaca os espectros da

análise química realizada.

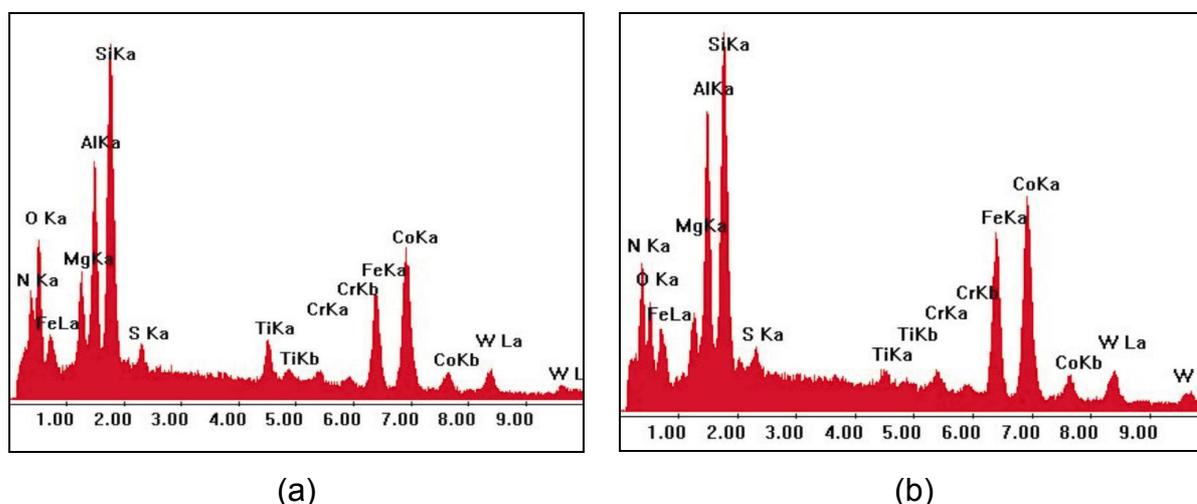


Figura 6.48: Espectro da análise química: a) Ferramenta CB-A na condição 1;
b) Ferramenta CB-A na condição 2.

Na análise química das ferramentas CB-B, os resultados apresentados diferem um pouco na quantidade de elementos medidos, mas da mesma forma que o ocorrido com as ferramentas CB-A (Figura 6.49 (a) e (b)), elas também exibiram Fe, Si e O₂, coincidindo igualmente com os resultados obtidos por Gastel (2000).

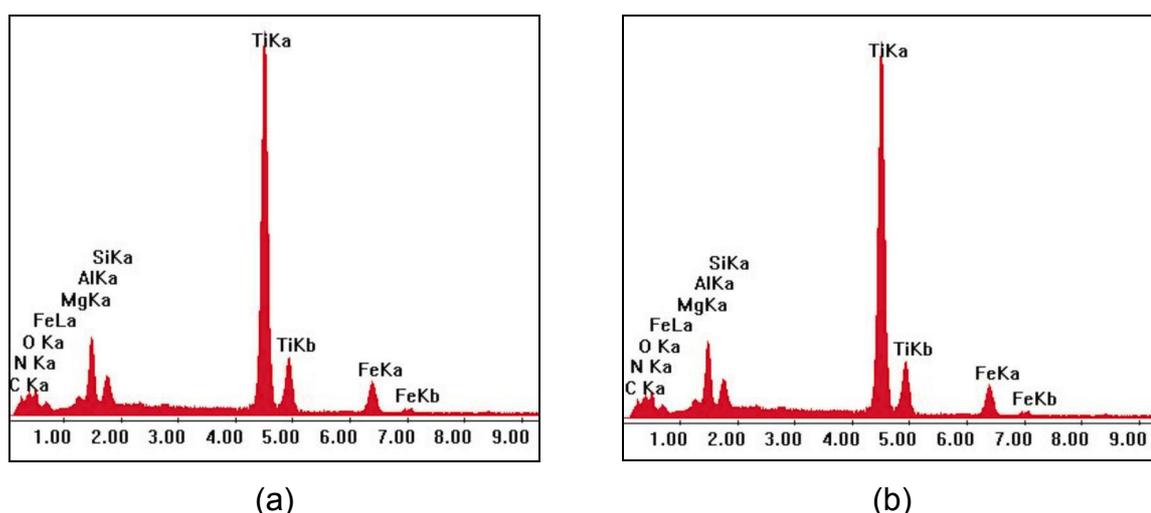


Figura 6.49: Espectro da análise química: a) Ferramenta CB-B na condição 1;
b) Ferramenta CB-B na condição 2.

Para investigar ainda a possibilidade de ter ocorrido a difusão entre a peça e a ferramenta durante a usinagem, foram analisadas amostras das peças usinadas

pelas respectivas ferramentas. As amostras foram analisadas, uma proveniente do corpo de prova utilizado pela ferramenta CB-A na condição 1 e outra do corpo de prova utilizado pela ferramenta CB-B na mesma condição. A Figura 6.50 (a) e (b), mostra os resultados da análise química.

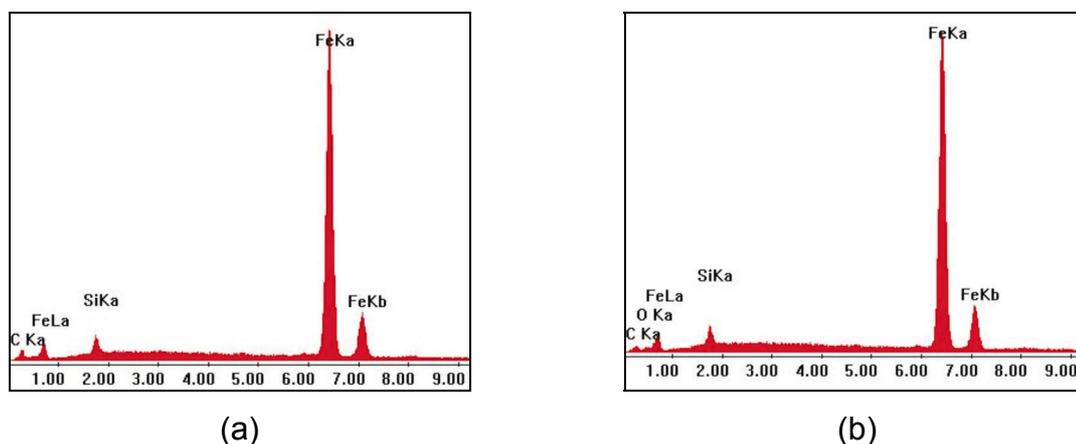


Figura 6.50: Espectro da análise química: a) corpo de prova para a ferramenta CB-A na condição 1; b) corpo de prova para a ferramenta CB-B na condição 1.

Os resultados indicam a presença de carbono, silício, oxigênio e ferro, resultado este que difere da análise realizada por Gastel (2000). No trabalho de Gastel, foi identificada a presença de boro (B), titânio (Ti) e tungstênio (W).

É importante salientar que, durante as análises químicas nas superfícies dos corpos de provas usinados, foram encontrados apenas resíduos de boro. Estes resíduos não são identificados nas Figuras 6.50 (a) e (b) por dois fatores:

1º) A sonda de análise química apresenta dificuldade em analisar elementos leves;

2º) a quantidade mostrada era insuficiente para ser identificada no gráfico.

Para esta micro-sonda poder registrar a presença de boro no espectro, o mesmo devia apresentar alta concentração na superfície da peça analisada, o que não foi o caso.

Desta maneira, os resultados são coerentes quando comparados com Gastel (2000), no entanto, a ocorrência de difusão durante a usinagem do CGI por ferramentas de CBN carece de estudos complementares para melhor esclarecer o fato.

6.3.5 Qualidade da superfície gerada

Quanto à análise da qualidade da superfície, os valores indicam que a ferramenta CB-A gera superfície com melhor qualidade, no quesito rugosidade R_z , do que os gerados pela ferramenta CB-B, resultando valores 50% menores. Este resultado é justificado devido à presença da quina alisadora na ferramenta CB-A, fato este já anteriormente discutido para as ferramentas de metal-duro. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 6.51 e 6.52.

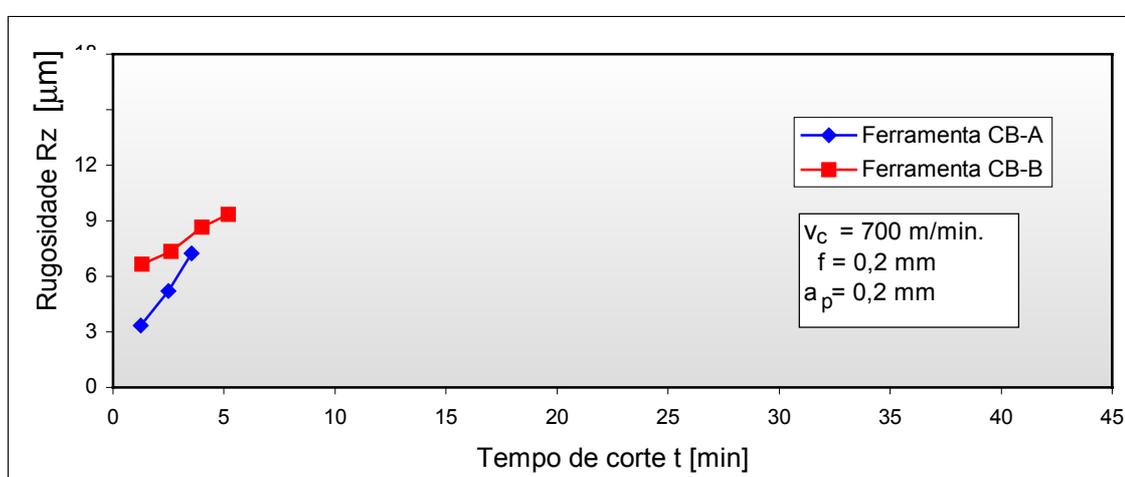


Figura 6.51: Curvas de rugosidade R_z para CB-A e CB-B, na v_c de 700 m/min.

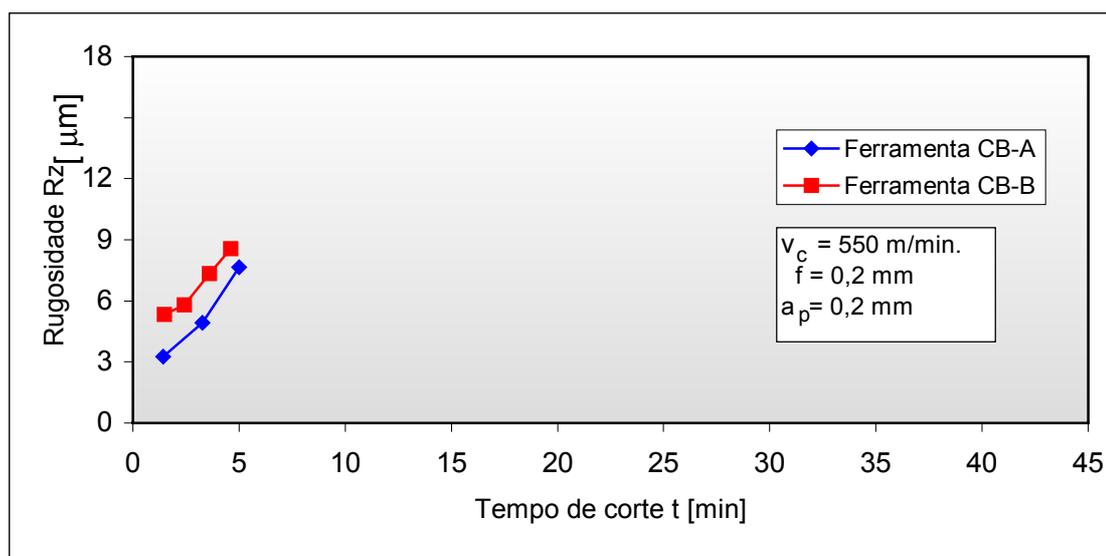


Figura 6.52: Curvas de rugosidade R_z para CB-A e CB-B, na V_c de 550 m/min.

Outra análise importante que pode ser extraída das figuras anteriores é a forte

tendência de diminuição da qualidade da superfície com o passar do tempo, em razão do aumento do desgaste principalmente na quina da ferramenta.

Para ilustrar o efeito da quina alisadora, foram investigadas as mesmas amostras utilizadas para as análises químicas, que com o auxílio do MEV, foi efetuada uma documentação fotográfica da textura das referidas superfícies usinadas. O objetivo foi caracterizar as diferentes texturas geradas pelas ferramentas, auxiliando, desta forma, no entendimento do efeito da quina alisadora (Figura 6.53 (a) e (b)).

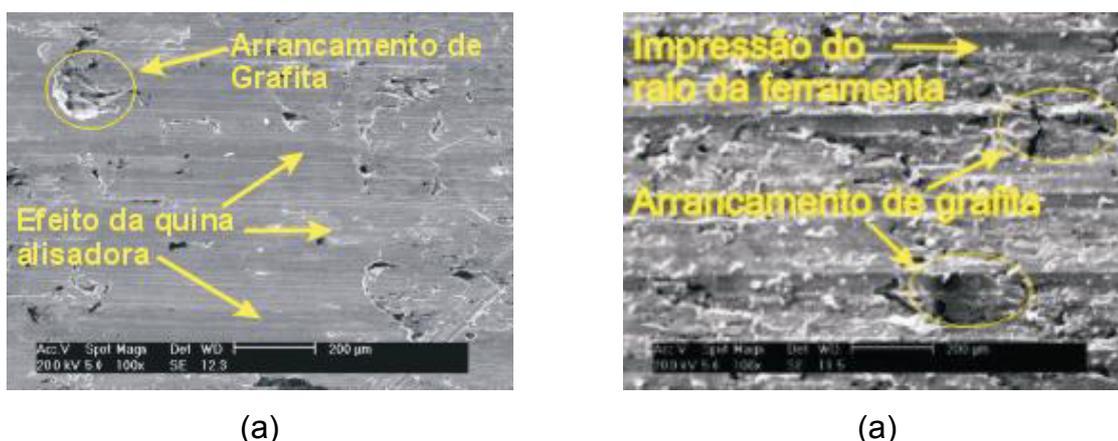


Figura 6.53: Caracterização da textura da superfície: a) textura gerada pela ferramenta MD-A; b) textura gerada pela ferramenta MD-B.

Na Figura 6.53 (a), é possível notar a sobreposição do avanço com a impressão do raio de quina da ferramenta na superfície da peça, deixando esta com um aspecto bastante “áspero”.

Já na Figura 6.53 (b), é possível observar uma superfície consideravelmente mais “lisa”, devido ao efeito da quina alisadora que diminuiu a altura entre os picos e vales no perfil da rugosidade da superfície.

6.4 Análise econômica

Para a análise econômica da usinagem foram calculados: a velocidade de corte para máxima produção, o tempo de vida para máxima produção, a velocidade econômica e a vida econômica da ferramenta (Stemmer, 1995).

$$V_{\max} = [(C_t^{1/n}) / (x-1) \cdot t_{tr}]^{1/x}$$

$$T_{vmaxpr} = (x - 1) \cdot t_{ff} \quad 6.5$$

$$V_{c \min} = [(C_t^{1/n}) / (x-1) \cdot (t_{ff} / C_p)]^{1/x} \quad 6.6$$

$$T_{ve} = [(x-1) (C_{fTV} + C_p \cdot t_{ff})] / C_p \quad 6.7$$

$$K_{fe} = C_{fTV} \cdot (t_p / T_{ve}) \quad 6.8$$

$$t_p = (\pi \cdot d \cdot l_f) / 1000 \cdot V_c \cdot f \quad 6.9$$

Em que:

V_{max} = velocidade de corte para máxima produção;

$n = (-1/k)$; K (coeficiente da equação de Taylor);

$x = 1/n$;

t_{ff} = tempo de troca da ferramenta

T_{vmaxpr} = vida da ferramenta para produção máxima;

C_p = custos relativos a máquinas, juros de capital empatado, custo da área ocupada, entre outros,

$V_{c \min}$ = velocidade econômica;

T_{ve} = vida econômica da ferramenta;

C_{fTV} = custo da ferramenta por gume;

K_{fe} = custo devido à ferramenta por peça;

t_p = tempo de corte efetivo por peça.

d = diâmetro usinado;

l_f = comprimento de usinagem.

Para preservar a competitividade da empresa parceira na pesquisa, os dados referentes ao C_p (custos relativos a máquinas, juros de capital empatado, custo da área ocupada, entre outros) e t_{ff} , tempo de troca da ferramenta, foram arbitrados para realização da análise econômica.

Como o cálculo da $v_{c \min}$ e do T_{ve} são influenciados pelos valores de C_p e t_{ff} , foram

supostos dois valores para cada um deles, um alto, e um baixo. ($C_p \text{ min} = 1$; $C_p \text{ Max} = 10$, $t_{ff \text{ min}} = 1$ e $t_{ff \text{ Max}} = 10$).

O objetivo desses valores foi verificar a influência do aumento e redução destas variáveis no custo da peça devido a ferramenta.

Quanto ao cálculo do K_{fe} (custo da peça devido a ferramenta), este foi calculado, supondo a usinagem de uma peça cilíndrica com $l_f = 175$ mm, $d = 90$ mm e utilizando um avanço de $f = 0,2$ mm.

Quanto aos valores de C_{ffV} para MD-A e MD-B foram, respectivamente, 10,16 e 7,86 R\$/gume.

Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Valores para cálculo e resultados da análise econômica da usinagem.

$C_p = 1$ R\$/min e $t_{ff} = 1$ min				
	$V_{c \text{ min}}$ [m/min]	T_{ve} [min]	t_p [min]	K_{fe} [R\$/peça]
MD-A	173,74	31,58	1,42	0,46
MD-B	181,44	22,23	1,36	0,48
$C_p = 1$ R\$/min e $t_{ff} = 10$ min				
MD-A	148,88	57,05	1,66	0,29
MD-B	135,09	44,82	1,83	0,29
$C_p = 10$ R\$/min e $t_{ff} = 1$ min				
MD-A	271,60	5,70	0,91	1,62
MD-B	286,35	4,48	0,86	1,51
$C_p = 10$ R\$/min e $t_{ff} = 10$ min				
MD-A	174,33	31,29	1,42	0,46
MD-B	171,55	27,07	1,44	0,41

Analisando estes dados, é possível identificar a tendência de que se os valores do C_p e do t_{ff} aumentarem, o desempenho econômico da ferramenta MD-B supera a concorrente MD-A. Ou seja, mesmo a ferramenta MD-A obtendo um tempo de vida 22% maior que a MD-B, em função do seu elevado custo, 29% mais cara, em algumas situações sua vantagem (maior tempo de vida) é diluída.

Ainda referente à ferramenta MD-A, seu melhor rendimento é obtido quando C_p e t_{ff} tendem a diminuir.

Na condição em que $C_p = 1$ R\$/min e $t_{ff} = 10$ min, é encontrado o ponto de inversão de custo entre as ferramentas MD-A e MD-B. Assim, se o t_{ff} continuar a aumentar e o C_p não for alterado a ferramenta MD-B apresentará o menor custo.

Uma observação que deve ser feita é que a ferramenta MD-A gera uma rugosidade R_z 50% menor que a MD-B. No cálculo, possíveis custos em processos posteriores relacionados à questão da qualidade do acabamento da superfície não foram analisados por não fazerem parte do escopo deste trabalho.

6.5 Comparação Geral

Como parte final do trabalho, foi realizada uma comparação entre as ferramentas dos fabricantes A e B, quanto ao tipo de material fornecido (metal-duro, cerâmica e CBN), nas condições testadas durante a realização da pesquisa. O resultado pode ser visto na Figura 6.54.

A comparação deixa claro o desempenho superior das ferramentas de metal-duro sobre as ferramentas de cerâmica e CBN, na usinagem do vermicular com corte contínuo, especialmente as ferramentas do fabricante A.

Os melhores resultados com as ferramentas de metal-duro foram constatados utilizando velocidades de corte mais baixas, quando os efeitos do aumento da temperatura e da abrasão não são tão ativos, proporcionando um maior tempo de vida para as ferramentas.

Quanto à diferença apresentada no tempo de vida entre as ferramentas de metal-duro dos fabricantes A e B, ela existe devido ao fato de que o metal-duro do fabricante A possui uma camada a mais de revestimento (TIN), que tem como característica principal a redução do atrito entre a peça e a ferramenta. Como o CGI é abrasivo e possui boa ductilidade, durante o corte, devido ao seu cavaco exibir um comportamento dúctil com deformação plástica, ele fica mais tempo em contato com a ferramenta, aumentando a temperatura e, deixando a ferramenta mais exposta a solicitações térmicas, mecânicas e químicas (Reuter, 1999).

No que tange às ferramentas de cerâmica e de CBN, fica evidente a necessidade de um estudo mais intenso para determinar as causas dos desgastes tão prematuros das ferramentas, sobretudo no caso da cerâmica. Os resultados encontrados por Reuter et al. (2000) na literatura mostram que, no processo de fresamento do

vermicular, a sua utilização é viável. Este Fato é pouco provável para o torneamento.

A análise econômica das ferramentas indicou que, se que se os valores do C_p e do t_{fr} aumentarem, o desempenho econômico da ferramenta MD-B supera a concorrente MD-A.

Quanto à análise da qualidade da superfície gerada, as ferramentas do fabricante A trouxeram os melhores resultados, com valores cerca de 50% inferiores aos obtidos pelas ferramentas do fabricante B.

De uma maneira geral, os resultados obtidos na presente pesquisa se mostram coerentes com os publicados por pesquisadores como Dawson (1999), Leuze (2000), Reuter et al. (2000), Gastel (2000) e Werthein (2002). Apesar disto, o tema não está esgotado, principalmente no que concerne aos mecanismos de desgaste tanto para as ferramentas de metal-duro quanto para as de cerâmicas e de CBN.

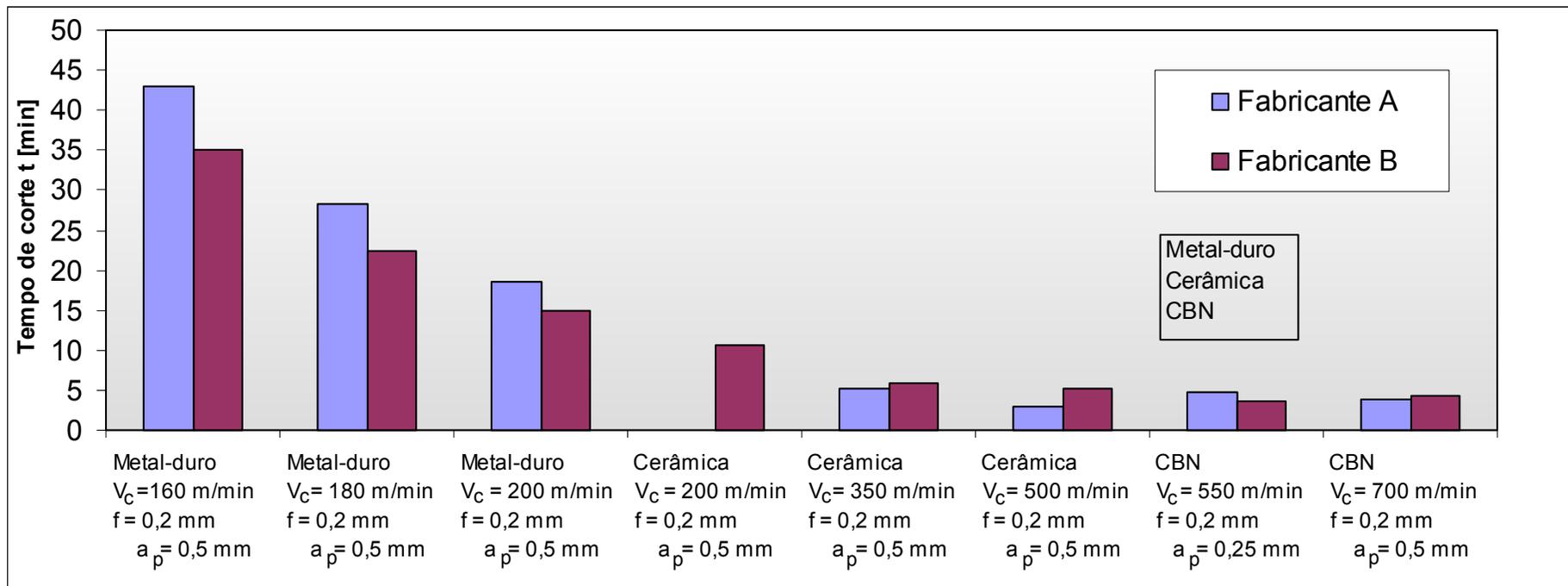


Figura 6.54: Comparação entre as ferramentas dos fabricantes A e B, utilizando metal-duro, cerâmica e CBN em diferentes condições de corte.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Após a realização dos ensaios de usinagem, analisando o desgaste das ferramentas e a rugosidade gerada por elas, conseguiu-se extrair algumas conclusões sobre as características das ferramentas testadas. As conclusões serão descritas ao longo deste capítulo, seguidas de algumas sugestões para trabalhos futuros. As sugestões são oriundas dos questionamentos que ocorreram durante a execução do trabalho, e que não puderam ser respondidos.

7.1 Conclusões

O presente trabalho ampliou os conhecimentos do autor e os resultados obtidos permitiram realizar uma série de importantes confrontações em relação aos resultados obtidos por outros pesquisadores nesta mesma linha de trabalho.

Primeiramente, pode-se concluir que, dentre todas as ferramentas de corte testadas nesta pesquisa para usinar o ferro fundido vermicular, no processo de corte contínuo, a que se mostrou mais adequada tecnicamente foi a de metal-duro, codificada no trabalho por MD-A. Esta possui uma camada a mais de revestimento de (TiN) e é encontrada no mercado com a identificação de GC 3005.

Nos ensaios realizados com o metal-duro, a ferramenta do fabricante A exibiu um rendimento médio 20% maior que os tempos de vida obtidos com a ferramenta do fabricante B.

Essa constatação deve-se ao fato de que a ferramenta MD-A apresentou a menor taxa de desgaste. Nos ensaios utilizando $v_c = 160$ m/min, $f = 0,2$ mm e $a_p = 0,5$ mm, ela obteve os maiores tempos de vida. Porém, na análise econômica, se os valores do C_p e do t_{tf} aumentarem a ferramenta MD-B, nesta mesma condição, é mais econômica que a MD-A.

Uma segunda conclusão é o efeito positivo que o revestimento de TiN proporciona sobre a vida da ferramenta. A ferramenta MD-A possuía tripla camada de revestimento (TiN, Al_2O_3 e TiCN), diferente da ferramenta MD-B, que possuía apenas duas (Al_2O_3 e TiCN).

O rendimento superior da ferramenta com revestimento de TiN é explicado pelo fato de que, durante a usinagem, em função das características do CGI (mais abrasivo, mais adesivo e cavaco com comportamento plástico) ocorre um aumento da abrasão, fricção e temperatura na ferramenta, ocasionando uma perda

progressiva de revestimento. Esta perda progressiva de revestimento deixa a ferramenta mais exposta a solicitações térmicas e mais vulnerável à ação da abrasão.

A presença de TiN na ferramenta MD-A, que proporciona baixo coeficiente de atrito, protegeu-a por mais tempo da ação dos mecanismos de desgaste, e por consequência, aumentou o seu tempo de vida.

Referente à qualidade da superfície, a ferramenta MD-A mostrou também os valores mais baixos da rugosidade R_z quando comparados com os obtidos pela ferramenta MD-B. Seus valores apresentados foram em média 50% menores que os da concorrente MD-B.

A diferença encontrada nos valores deve-se ao fato de que a ferramenta MD-A possui uma quina alisadora com uma combinação de raio com chanfro, que achata os picos de rugosidade diminuindo a distância entre picos e vales.

Na usinagem do ferro fundido vermicular, o efeito da velocidade de corte sobre o desgaste da ferramenta mostrou-se bastante forte, pois à medida que a velocidade aumenta, aumenta também a taxa de desgaste da ferramenta. Assim, velocidades de corte superiores a 160 m/min podem não ser recomendadas para corte contínuo do CGI com ferramentas de metal-duro. Essas proporcionam vidas muito baixas, acarretando em excessivas paradas de máquina para troca de ferramentas, e um consequente aumento dos custos de produção, como foi demonstrado no item 6.5.

Na indústria, o uso de velocidades de corte elevadas é importante para aplicações em máquinas modernas de “*High Speed Cutting*” (HSC), pois estas máquinas propiciam menores tempos de usinagem, refletindo diretamente nos custos de produção.

Neste contexto, a realização dos ensaios de usinagem com ferramentas cerâmicas e de CBN objetivou aumentar as velocidades de corte utilizadas na usinagem do CGI, tentando, assim, viabilizar o emprego de máquinas HSC. Porém, as ferramentas de cerâmica e CBN, dos fabricantes A e B, apresentaram tempos de vida muito pequenos, que, somados aos seus custos e ao número de paradas de máquina, se mostraram inviáveis para serem utilizadas.

Nas ferramentas cerâmicas, constatou-se como desgaste predominante a abrasão, ocorrendo um fato interessante, pois a cerâmica possui uma dureza maior que o metal-duro, mas seus tempos de vida, quando comparados com os dos metais-duros utilizados na pesquisa, foram inferiores.

O desgaste excessivo no corte contínuo do CGI utilizando cerâmica é atribuído a uma combinação de fatores, mas principalmente as suas propriedades mecânicas e físicas. Durante a sua usinagem, a formação do seu cavaco apresenta natureza dúctil ficando mais tempo em contato com a face da ferramenta. Isso, somado a sua abrasividade e ao menor coeficiente de transmissão de calor, fazem com que a temperatura no gume da ferramenta aumente, expondo-a mais aos efeitos térmicos da usinagem.

Quanto aos resultados obtidos com CBN, devido às altas velocidades de corte utilizadas, não se pode descartar os efeitos externos, como as vibrações durante a usinagem como causas do baixo desempenho. Mas as análises químicas realizadas nas ferramentas mostraram a presença de Fe e Si provenientes do material da peça e vestígios de B na superfície da peça usinada. Isso é um forte indício que pode ter ocorrido difusão durante a usinagem do CGI pelo CBN, sendo esta a causa mais provável do resultado negativo da usinagem.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a ferramenta de metal-duro é a melhor alternativa técnica, e conseqüentemente, econômica para a usinagem do CGI por processos de corte contínuos. Essa apresenta desempenho muito superior aos das cerâmicas e dos CBN's.

7.2 Proposições para novos trabalhos

Como o CGI começou a ser utilizado apenas recentemente em processos industriais, os dados disponíveis sobre sua usinagem são restritos, quando não mantidos em segredo industrial. Assim, existe um enorme campo para a pesquisa na usinagem do CGI, com tendência a aumentar nos próximos anos à medida que esse for se firmando no mercado como material para fabricar blocos de motores.

As sugestões para futuros trabalhos são:

- desenvolver materiais para ferramentas e revestimentos resistentes à abrasão;
- estudar os efeitos da utilização de fluidos de corte e a viabilidade do emprego da técnica de minimização de fluidos de corte em máquinas HSC.
- pesquisar os aprimoramentos das técnicas de usinagem;
- desenvolver uma geometria de usinagem específica para a usinagem do CGI;

- estudar a diferença de usinabilidade nas diversas camadas do corpo de prova;
- pesquisar por que materiais tidos pela literatura como de alta resistência ao desgaste apresentam resultados inferiores ao metal-duro quando usinando o CGI;
- pesquisar o efeito na usinagem do aumento da porcentagem de nódulos de grafita no ferro fundido vermicular.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTSTETTER, J. D.; NOWICKI, R. M. Compacted Graphite Iron: Its Properties and Automotive Applications. **AFS Transactions**, v. 82-188, p. 959-970. 197-.

ARMAREGO, E. J. A.; KARRIR, V.; SMITH, A. J. R. Computer-Aided Predictive Models for Fundamental Rotary tool Cutting Processes. 1993. CIRP. v. 42-1, p. 49-54. 1993.

ASM. **Speciality Handbook: Cast Irons**. Estados Unidos: ASM International, 1996, p. 33-267.

BALZERS. **Catálogos de produtos**. Disponível em: <<http://www.balzers.com.br>>. Acesso em: novembro 2002.

BATES, C. E. Study examines influences on machinability of iron castings. **Modern Castings**, p. 36-39, out. 1996.

BET, L. **Estudo da Medição da Textura de Superfícies com Sondas Mecânicas e com Sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.)

BOEHS, L. **Influência do sulfeto de manganês na usinabilidade do ferro fundido maelável preto ferrítico**. 1979. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.)

BORK, C. A. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. 1995. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BORMANN, K. Machining Capabilities in CGI. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

BORRMANN, K. Advanced Tooling Solutions for CGI Machining. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 2000, Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: 2000.

CIMM – **Centro de Informação Metal Mecânica**. <<http://www.cimm.com.br>> Acesso em: Outubro de 2002.

COOPER, K. P.; LOPER Jr., C. R. Some Properties of Compacted Graphite Cast Iron. **AFS Transactions**, v. 86, p. 241-248, 1978.

DAWSON, S.; WÜRTEMBERG, J. M. von. Experiências Práticas com Ferro Fundido de Grafita Compactada Como Material para Componentes Automotivos. IN: 26° SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA AUTOMOTIVA E AUTOMAÇÃO – ISATA, 1993, Aachen. **Anais...** Aachen: 1993.

DAWSON, S. **Mechanical and Physical Properties of Compacted Graphite Iron at Elevated Temperatures**. SinterCast S.A, Switzerland, Fev.1994a.

DAWSON, S. **Operational Properties of Compacted Graphite Iron**: Feedback from ongoing test programmes. SinterCast S.A, Switzerland, Fev. 1994b.

DAWSON, S. **The SinterCast Process and Compacted Graphite Iron**. In: International Conference on Latest and Best in Melting and Metal Treatment en Ferrous and Non-Ferrous Foundries, Coventry, England, abr. 1994c.

DAWSON, S., et al. The mechanical and physical properties of compacted graphite iron. In: Global Powertrain Congress. **Anais...** 1998.

DAWSON, S. et al. The effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 1999, Bad Nauheim. **Anais...** Bad Nauheim: 1999.

DAWSON, S. Practical applications for Compacted Graphite Iron. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

DIESEL FORUM. Diesel technology and the American Economy. <<http://www.dieselforum.com>> Acesso em: junho 2002.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. São Paulo: MM Editora, 1999.

EDWARDS, R. **Cutting tools**. 1º Edição. Editora University Press Cambridge. 1993.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 9º Edição. Editora Edgard Blücher LTDA. 1995.

GASTEL, M.; et al. Investigation of the wear mechanism of cubic boron nitride tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron. **International Journal of Refractory Metal & Hard Materials**, n. 18, p. 287-296, 13 jun. 2000.

GEORGIU, G. **Machine Tool Solution for Compacted Graphite Iron**. In: GPC – GLOBAL POWERTRAIN CONGRESS, 2001, Detroit. **Anais...** Detroit: 2001. v.17, p.1-6.

GEORGIU, G. **Machining solutions for compacted graphite iron**. Disponível em: <<http://www.machineshopguide.com>> Acesso em: 30 Jan. 2002a.

GEORGIU, G. CGI high speed machine tool solutions. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002b.

GÖBEL, R. Cylinder boring and milling in CGI. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

GUESSER, W.; SCHROEDER, T. DAWSON, S. Production Experience with Compacted Graphite Iron Automotiva Components. In: AFS CASTING CONGRESS, 105, 2001, Dallas. **Anais...** Dallas: 2001.

GUESSER, L. W.; GUEDES, L. C. **Desenvolvimentos Recentes em Ferros Fundidos Aplicados à Indústria Automobilística**. In: IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA, São Paulo, 1997.

HICK, H.; LANGMAYR, F. All star cast. **Engine Technology International**, Germany, p. 40-42. jan/2000.

KASSACK, J. REUTER, U. CGI – Production Planning. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5. Auflage. Aachen, 1997.

KRESS, D. Cilinder bores in CGI: State of the art. In: Compacted Graphite Iron – Machining Workoshop, 2000, Darmstad. **Anais...** Darmstad: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2000.

KRESS, J. Experiences and results in CGI machining on machining centres. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

KRUZYNSKI, J.; LEUZE, P.; BREUNING, R. Multi-teeth boring of CGI with performance and accuracy. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

LEUZE, P. High Productivity Carbide Boring Tools for Roughing and Finishing CGI. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 2000, Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: 2000.

MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S. C.; HYNDMAN, R. J. **Forecasting Methods and Applications**. 3rd Edition. Wiley. 1998.

MARQUARD, R.; HELFRIED, S.; McDONALD, M. Crank it up: New materials create new possibilities. **Engine technology international**, v. 2, p. 58-60, 1998.

MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação**. Florianópolis, 2002a. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

MOCELLIN, F. Estudo da Usinabilidade do Ferro Fundido vermicular em Ensaio de Furação. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2, João Pessoa – PB: 2002b.

MONROE, R. W.; BATES, C. E. Some Thermal and Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron. **AFS Transactions**, v. 82-146, p. 615-624. 197-.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 4th Edition. 1997.

OATHOUT, R. R. Compacted Graphite Iron for Diesel Engines Castings. **Metal Progress**. v. 113, nº 5, p. 54-58, mai. 1978.

PHILLIPS, C. W. Machinability of Compacted Graphite Iron. **American Foundrymens Society Transactions**, Detroit, p. 47-52. 1982.

PRENGEL, H. G. et al. A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools. **Surface and coating technologies**, n 139, p. 25-34, 2001.

RAY, M. Tomorrow's cutting tools: Building on the present, **Modern machine shop**, p.76-88, Aug.1989.

REUTER, U. et al. Wear Mechanisms in High-Speed Machining. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 1999, Bad Nauheim. **Anais...** Bad Nauheim: 1999a.

REUTER, U.; SCHULZ, H. CGI Machinability and Developments Towards Production. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 1999, Bad Nauheim. **Anais...** Bad Nauheim: 1999b.

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

REUTER, U.; SCHULZ, H. The end of the line – “The reason why high-speed cylinder boring of Compacted Graphite Iron has been difficult is finally understood – transfer line solutions are now available.” **Engine technology International**, Germany, p. 78-80. abr/2000a.

REUTER, U.; et al. The Wear Process of CGI Cutting Machining Developments. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 2000, Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: 2000.

REUTER, U.; SAHM, A.; SCHULZ, H. CGI Production on Transfer Lines and Machining Centers. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 2000, Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: 2000c.

ROTARY TECHNOLOGIES CORPORATION. **Reasons Why the Rotary Milling Cutter is the best milling cutter you can use.** Disponível em: <<http://www.rotarytech.com/reasons.php>> Acesso em: 19 jul. 2002.

SAHM, A.; ABELE, E.; SCHULZ, H. State of the art in CGI machining. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

SCHEIDTWEILER, L. CGI Machining with Carbide Tools. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 2000, Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: 2000.

SCHULZ, H.; REUTER, U. Compacted Graphite Iron. **Engine technology International**, Germany, p. 27-30. abr/2000.

SERGEANT, G. F.; EVANS, E. R. The Production and properties of compacted Graphite Irons. **British Foudryman**, London, v. 75, nº 5, p. 115-124, 1978.

SINTERCAST. Iron, the 21st Century Material. **Catálogo de Produtos.** SinterCast S.A, Switzerland, 1994.

SINTERCAST. **Diesel.** Disponível em: www.sintercast.com/market/diesel.htm. Acesso em: outubro 2002.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I.** 4^o Edição. Editora da UFSC. 1995.

TECHNICAL ARTICLES. Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron. Disponível em: http://www.castingsource.com/tech_art_graphite.asp. Acesso em: 29 ag. 2000.

THOLL, M.; MAGATA, A.; DAWSON, S. Pratical Experience with Passanger Car Engine Blocks Produced. In: High Quality Compacted Graphite Iron. In:

INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION, 1996, Detroit. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 960297. p. 61-69. 1996.

THORDENBERG, H. Helical milling for cylinder bores. In: Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, 2000, Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: 2000.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas**. 2º Edição. Alcan Alumínio do Brasil, São Paulo, 1991.

WERTHEIM, R. et. al. Development of CGI cutting materials. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

WÜRTEMBERG, J. M. von. **Environmental Arguments for Increased Application of Compacted Graphite Iron**. SinterCast S.A, Switzerland, Fev. 1994a.

WÜRTEMBERG, J. M. von. **The Diesel Engine: Lean, Clean and “Green”**. SinterCast S.A, Switzerland, Fev. 1994b.

ZIEGLER, K. R.; WALLACE, J. F. The Effect of Matrix Structure and alloying on the Properties of compacted Graphite Iron. **AFS Transactions**, v. 82-123, p. 735-748. 197-.