

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

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA NODULARIDADE NA USINABILIDADE DO  
FERRO FUNDIDO VERMICULAR**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para a obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CHRISTIAN DORÉ**

**Florianópolis, Outubro de 2007**

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

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA NODULARIDADE NA USINABILIDADE DO  
FERRO FUNDIDO VERMICULAR CLASSE 450**

**CHRISTIAN DORÉ**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FABRICAÇÃO  
sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.  
Orientador**

---

**Prof. Wilson Luiz Guessier, Dr. Eng.  
Co-Orientador**

---

**Prof. Fernando Cabral, Dr.  
Coordenador**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D - Presidente**

---

**Carlos Augusto Silva de Oliveira, Dr.Sc**

---

**Álisson Rocha Machado, Ph.D. Eng (UFU)**

O maior elogio que recebi em toda  
a minha vida de inventor foi:

*“Isso nunca vai funcionar”*

**Thomas Alva Edison**

## AGRADECIMENTOS

- Á Deus – Razão de toda a existência, fonte de esperança e amor;
- Ao Prof. Lourival Boehs, pela oportunidade, orientação, colaboração e companheirismo;
- Ao Dr. Wilson Luiz Guessser, pelo auxílio e co-orientação;
- Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização do trabalho;
- Ao CNPq, pelo apoio financeiro;
- Ao Projeto Verde-Amarelo Tupy-LMP/GRUCON, pelo apoio financeiro;
- Ao Instituto Fábrica do Milênio, Projeto IFM-II.
- A Prof<sup>a</sup>. Ana Helena Bressiani e ao IPEN, pelo fornecimento das ferramentas cerâmicas e prontidão no fornecimento de informações.
- À Empresa Tupy Fundições, pela doação dos materiais fundidos, e apoio dos Funcionários;
- Aos colegas e amigos do Laboratório do Usicon e do Grucon, em especial ao Eng. Fabio Antônio Xavier, ao Eng. João Henrique Bagetti e ao Eng Marcelo Sarturi, Eng. Cassiano Guerra, pelo apoio e companheirismo;
- Aos membros dos laboratórios do LMP e LABMAT pela disponibilização de equipamentos e informações;
- Aos Familiares, à minha namorada Rose, parentes e amigos, pela compreensão e apoio incondicional.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>08</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>13</b>
<b>SIMBOLOGIA.....</b>	<b>14</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>16</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1    Objetivos.....	19
1.1.1    Objetivo geral.....	19
1.1.2    Objetivos específicos.....	19
1.1.3    Estrutura do trabalho.....	19
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1    Ferro fundido cinzento.....	21
2.2    Ferro fundido nodular.....	22
2.3    Ferro fundido vermicular.....	23
2.3.1    Microestrutura dos ferros fundidos vermiculares.....	27
2.3.2    Propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido vermicular.....	28
2.3.3    Mecanismo de formação do cavaco.....	29
2.3.4    Usinabilidade do ferro fundido cinzento, vermicular e nodular.....	33
2.3.5    Efeito das variáveis metalúrgicas na usinabilidade do ferro fundido vermicular.....	40
2.3.6    Influência da nodularização da grafita no ferro fundido vermicular.....	52
2.3.7    Novas concepções de ferramentas na usinagem de ferro fundido vermicular.....	54
2.4    Processo de torneamento.....	56
2.4.1    Temperatura na interface ferramenta-peça.....	58
2.5    Materiais para ferramentas de corte.....	58
2.5.1    Ferramentas de metal-duro.....	60
2.5.2    Ferramentas de cerâmica.....	63
2.6    Mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte.....	65
2.7    Critérios de fim de vida para as ferramentas de corte.....	70

<b>3</b>	<b>EQUIPAMENTOS E MÉTODOS</b> .....	<b>72</b>
3.1	Considerações iniciais .....	72
3.1.1	Máquina ferramenta .....	72
3.1.2	Sistema de fixação dos corpos de prova .....	73
3.1.3	Suportes para fixação das ferramentas de corte .....	73
3.1.4	Microscópio para a medição do desgaste nas ferramentas de corte .....	74
3.1.5	Microscópio eletrônico de varredura .....	74
3.1.6	Geometria dos corpos de prova .....	75
3.1.7	Metodologia dos ensaios de usinagem.....	76
3.1.8	Critério de fim de vida para as ferramentas de corte .....	77
3.1.9	Parâmetros de corte utilizados.....	77
3.1.10	Análise estatística dos resultados.....	78
<b>4</b>	<b>MATERIAIS UTILIZADOS</b> .....	<b>79</b>
4.1	Caracterização das ligas de ferro fundido vermicular e ferramentas utilizadas .....	79
4.1.1	Análise da microestrutura do ferro fundido vermicular .....	79
4.1.2	Determinação da dureza do material.....	83
4.1.3	Determinação das propriedades mecânicas.....	85
4.2	Ferramentas de corte.....	85
4.2.1	Ferramentas de metal-duro.....	86
4.2.2	Ferramentas de cerâmica .....	88
<b>5</b>	<b>RESSULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>90</b>
5.1	Análise da usinabilidade das ligas com ferramentas de metal-duro.....	90
5.1.1	Análise da usinabilidade da liga VER-1 .....	90
5.1.2	Análise da usinabilidade da liga VER-2 .....	94
5.1.3	Análise da usinabilidade da liga VER-3 .....	97
5.1.4	Comparativo da usinabilidade entre as ligas VER-1, VER-2 e VER-3 .....	101
5.2	Análise da usinabilidade das ligas com ferramentas de cerâmica.....	103
5.2.1	Análise da usinabilidade das ligas com a ferramenta CER-NS260 comercial.....	103
5.2.2	Análise da usinabilidade das ligas com as cerâmicas produzidas pelo IPEN	107
5.2.2.1	Análise da usinabilidade da liga VER-1 com as cerâmicas produzidas pelo IPEN.....	107

5.2.2.2	Análise da usinabilidade da liga VER-3 com as cerâmicas produzidas pelo IPEN.....	111
5.2.3	Comparativo da usinabilidade das ligas com as ferramentas cerâmicas.....	115
5.3	Avaliação do cavaco gerado na usinagem das ligas VER-1 e VER-3 .....	116
5.4	Comparativo geral da usinabilidade das ligas VER-1, VER-2 e VER-3.....	119
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>122</b>
6.1	Conclusões .....	122
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	125
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>126</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Imagens de diferentes morfologias da grafita em ferros fundidos cinzentos (MARWANGA et al, 1999a, BATES et al, 2002, e SINTERCAST, 2006).....	22
Figura 2-2 Microestrutura típica de um ferro fundido nodular (MELLERAS et al, 2003).....	22
Figura 2-3 Aspecto da grafita vermicular com 10% de nodularização (DAWSON, 1999; SINTERCAST, 2001). .....	23
Figura 2-4 O efeito das adições de titânio na vida da ferramenta durante o corte contínuo com metal-duro do ferro fundido vermicular perlítico (REUTER et al, 2001). .....	24
Figura 2-5 Curva S - Influência na nodularidade em função da variação de magnésio (DAWSON, 2002). .....	25
Figura 2-6 Adição de 0,001% de magnésio é suficiente para mudar uma estrutura lamelar para uma estrutura vermicular com 3% de nodularidade (DAWSON, 2001; DAWSON, 2002). ....	25
Figura 2-7 Vista do amostrador por imersão, utilizado para a obtenção do ferro fundido vermicular (SINTERCAST, 2001a; DAWSON, 2002). .....	26
Figura 2-8 Na região central, a formação de grafita vermicular, enquanto no fundo com menos Mg ocorre à formação de grafita de super-resfriamento (SINTERCAST, 2001a; DAWSON 2002). .....	26
Figura 2-9(a) Vermicular atacado por Nital (GUESSER <i>et al.</i> , 1997); (b) Microestrutura do ferro fundido vermicular vista em três dimensões (HEISSER <i>et al.</i> , 2003). .....	27
Figura 2-10 Morfologia típica da grafita. A (cinzento), B (vermicular) e C (nodular). Imagens geradas por MEV (SINTERCAST, 2006).....	28
Figura 2-11 Mecanismo de formação do cavaco em ferro fundido cinzento (MARWANGA <i>et al.</i> , 1999a; 1999b). .....	31
Figura 2-12 Mecanismo de formação do cavaco: A) Fratura no ferro fundido cinzento, B) e C) Deformação da grafita no ferro fundido nodular (COHEN & VOIGT, 2003).....	32
Figura 2-13 Diferença na formação do cavaco no ferro fundido cinzento, vermicular e no nodular (REUTER <i>et al.</i> , 1999b). .....	32
Figura 2-14 Efeito da composição química nas propriedades dos ferros fundidos e na vida da ferramenta (SRIVASTAVA, 2005). .....	33
Figura 2-15 Comportamento do desgaste nas ferramentas de corte na usinagem de ferro fundido cinzento FC 25 com diferentes % de enxofre (PEREIRA, <i>et al.</i> , 2005 & 2006). .....	35
Figura 2-16 Usinagem de ferro fundido nodular da classe FE-50007 com ferramentas de metal-duro (DILÇO <i>et al.</i> , 2000). .....	36

Figura 2-17 Comparativo entre a usinabilidade do ferro fundido cinzento e a do vermicular em torneamento e fresamento (Modificada de REUTER et al, 2001).....	37
Figura 2-18 Resultados obtidos na usinagem de diferentes microestruturas de ferro fundido vermicular pelo processo de furação (MOCELLIN 2002, 2004).....	38
Figura 2-19 Resultados obtidos por XAVIER (2003) na usinagem de ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN.....	38
Figura 2-20 Resultados do torneamento de ferro fundido cinzento e do ferro fundido vermicular com alta e baixa proporção de perlita (REUTER, 1999a; ABELE <i>et al</i> , 2002). ...	39
Figura 2-21 Torneamento de ferro fundido vermicular com ferramentas de cerâmica no processo de corte contínuo (REUTER, 2000 citado por XAVIER 2003).....	40
Figura 2-22 a) Propagação da trinca na grafita lamelar do ferro cinzento; b) Dificuldade na propagação da trinca na grafita vermicular devido sua forma (GEORGIU, 2002; ANDRADE, 2005).....	41
Figura 2-23 Influência da grafita na vida da ferramenta de PCBN (REUTER <i>et al</i> , 2001). ...	42
Figura 2-24 Influência do aumento da porcentagem de perlita na matriz metálica nas propriedades do ferro fundido vermicular com 0-10% de nodularidade (DAWSON, 1999). ..	43
Figura 2-25 Redução na vida de brocas com o aumento da quantidade de Fe <sub>3</sub> C na perlita (BATES, 1996).....	44
Figura 2-26 Vida das ferramentas de corte em função da quantidade de perlita/ferrita. a) ferramenta de metal-duro, b) ferramenta de CBN (REUTER et al, 2001; XAVIER, 2003). ..	44
Figura 2-27 Efeito da adição de elementos perlitizantes na usinagem de vermicular com ferramentas de metal-duro e CBN (REUTER <i>et al</i> , 2001). .....	46
Figura 2-28 Efeito do antimônio na formação da grafita no ferro fundido vermicular. (REUTER <i>et al</i> , 2001).....	47
Figura 2-29 Ferro fundido cinzento com variação do teor de enxofre de 0,065%, 0,12%, 0,15% e 0,18%, respectivamente (PEREIRA <i>et al</i> , 2006).....	48
Figura 2-30 Camada de sulfeto de manganês na ferramenta de CBN: a) Usinagem de vermicular; b) usinagem de cinzento (Adaptada REUTER et al, 2001, e GASTEL et al, 2000). .....	48
Figura 2-31 Efeito do silício na usinagem de vermicular (Modificado REUTER <i>et al</i> , 2001). .....	49
Figura 2-32 Inclusões de carbonitretos de titânio que aumentam o desgaste abrasivo na ferramenta de corte (REUTER <i>et al</i> , 2001).....	51
Figura 2-33 Adição de cálcio no inoculante diminui o desgaste nas ferramentas de corte (REUTER <i>et al</i> , 2001).....	51

Figura 2-34 Influência da nodularidade nas propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular (Modificada de ECOB, HARTUNG, 2004). .....	52
Figura 2-35 Variação das propriedades mecânicas do vermicular em função da nodularização (SERGEANT & EVANS do BCIRA, 1978). .....	53
Figura 2-36 Influência da nodularização da grafita na condutividade térmica do ferro fundido vermicular (Sergeant & Evans do BCIRA, 1978). .....	53
Figura 2-37 Ferramentas de mandrilar com múltiplos insertos de diferentes fabricantes (REUTER <i>et al</i> , 2001; REUTER <i>et al</i> , 1999c).....	54
Figura 2-38 Ferramentas com insertos rotativos fabricadas pela <i>Rotary Technologies Corporation</i> (VACCARI, 2000; DZIERWA, 2003). .....	55
Figura 2-39 Representação da operação de torneamento (Modificada de SOUZA, 2004).....	56
Figura 2-40 Movimentos relativos entre a peça e a ferramenta (ALVES, 2006).....	57
Figura 2-41 Principais operações de torneamento (ALVES, 2006). .....	57
Figura 2-42 Distribuição da temperatura na interface ferramenta peça (CIMM, 2006).....	58
Figura 2-43 Propriedades das ferramentas de corte (CIMM, 2006). .....	59
Figura 2-44 Ilustração da composição de uma ferramenta de metal-duro (CIMM, 2006). .....	61
Figura 2-45 Revestimento multicamadas aplicado em uma ferramenta de Metal-Duro (SANDVIK, 2005).....	63
Figura 2-46 Principais fatores causadores de desgaste em ferramentas de corte (WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002). .....	65
Figura 2-47 Representação da ação dos mecanismos de desgaste no contato entre a peça e a ferramenta (KONIG, 1997 citado por XAVIER, 2003).....	66
Figura 2-48 Representação do desgaste de flanco em uma ferramenta de corte ((a) SANDVIK, 2004 e (b) AMORIM, 2003). .....	67
Figura 2-49 Representação do desgaste de cratera em uma ferramenta de corte ((a) SANDVIK, 2004 e (b) AMORIM, 2003). .....	68
Figura 2-50 Oxidação da fase ligante na forma de rutilo (TiO <sub>2</sub> ) e o surgimento de micro-trincas no CBN (REUTER <i>et al</i> , 1999b, GASTEL <i>et al</i> , 1999, REUTER <i>et al</i> , 2002).....	69
Figura 2-51 Imagem de MEV mostrando a deformação plástica no flanco e pequenos lascamentos indicados pela seta (Scuor <i>et al</i> , 2005).....	70
Figura 3-1 Máquina-ferramenta da marca IMOR utilizada nos ensaios de torneamento. ....	73
Figura 3-2 Sistema de fixação dos corpos de prova com três castanhas e contraponto.....	73
Figura 3-3 Suportes para a fixação das pastilhas de corte.....	74
Figura 3-4 Microscópio utilizado para a medição do desgaste das ferramentas de corte. ....	74

Figura 3-5 Ilustração de um Microscópio Eletrônico de Varredura (LABMAT-UFSC, 2006). .....	75
Figura 3-6 Corpos de prova produzidos pela Fundição Tupy para a realização dos ensaios... 75	75
Figura 3-7 Geometria dos corpos de prova padrão para as três composições de nodularidade. .....	76
Figura 3-8 Marca de desgaste no flanco de uma ferramenta de corte de geometria definida. . 77	77
Figura 4-1 Amostras embutidas para a análise da microestrutura dos corpos de prova. ....	79
Figura 4-2 Micrografia do ferro fundido vermicular, VER-1: (A) sem ataque de Nital 3% e (B) com ataque de Nital 3%. ....	80
Figura 4-3 Micrografia do ferro fundido vermicular, VER-2: (A) sem ataque de Nital 3% e (B) com ataque de Nital 3%. ....	81
Figura 4-4 Micrografia do ferro fundido vermicular, VER-3: (A) sem ataque de Nital 3% e (B) com ataque de Nital 3%. ....	81
Figura 4-5 Segregação de carbonetos de ferro ( $Fe_3C$ ) ou cementita na liga VER-1.....	82
Figura 4-6 Microestrutura do corpo de prova VER-2 (A) e VER-3 (B).....	82
Figura 4-7 Análise por EDS de um precipitado na liga VER-1. ....	83
Figura 4-8 Ferrita envolvendo a grafita nodular na liga VER-3.....	83
Figura 4-9 Regiões de medição da dureza da superfície dos corpos de prova. ....	84
Figura 4-10 Revestimento com cobertura menos porosa da ferramenta MD-3215.....	87
Figura 4-11 Ferramentas de metal-duro utilizadas nos ensaios: (a) Ferramenta MD-3005, (b) Ferramenta MD-3215 e (c) Ferramenta MD-AC700.....	87
Figura 4-12 Esquema do raio de quina das ferramentas de corte de metal-duro.....	87
Figura 4-13 Ferramenta de Cerâmica CER-NS260. ....	88
Figura 4-14 Imagem de MEV e geometria de uma ferramenta cerâmica fabricada pelo IPEN. .....	88
Figura 5-1 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-1 com ferramentas de metal- duro. ....	91
Figura 5-2 Desgaste nas ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-1. ....	93
Figura 5-3 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-2 com ferramentas de metal- duro. ....	95
Figura 5-4 Desgaste nas ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-2. ....	96
Figura 5-5 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-3 com ferramentas de metal- duro. ....	98

Figura 5-6 Desgaste nas ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-3.....	99
Figura 5-7 Comparativo da usinabilidade entre as ligas VER-1, VER-2 e VER-3.....	102
Figura 5-8 Curva de vida x desgaste na usinagem das ligas VER-1, VER-2 e VER-3 com ferramentas CER-NS260.....	104
Figura 5-9 Desgaste da ferramenta CER-NS260 na usinagem das ligas VER-1, VER-2 e VER-3. ....	106
Figura 5-10 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-1 com ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN. ....	108
Figura 5-11 Desgaste nas ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN na usinagem da liga VER-1. ....	110
Figura 5-12 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-3 com ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN. ....	112
Figura 5-13 Desgaste nas ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN na usinagem da liga VER-3. ....	114
Figura 5-14 Comparativo da usinabilidade entre as ligas VER-1 e VER-3 com as ferramentas cerâmicas. ....	115
Figura 5-15 Imagem dos cavacos gerados nos ensaios das ligas VER-1 e VER-3 com as ferramentas de metal-duro e a cerâmica de $\text{Si}_3\text{N}_4$ .....	117
Figura 5-16 Comportamento da grafita nodular na usinagem das ligas VER-1 e VER-3. ....	118
Figura 5-17 Comparativo geral dos resultados obtidos na usinagem das ligas VER-1, VER-2 e VER-3 com ferramentas de metal-duro e cerâmica.....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Análise química típica de um ferro fundido vermicular com nodularidade de 0-20% (SINTERCAST, 2001).....	28
Tabela 2-2 Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos vermicular, cinzento e nodular (SINTERCAST, 2001 citado por MOCELLIN 2002; VACCARI, 2000). .....	29
Tabela 2-3 Variação das propriedades mecânicas do vermicular em função da nodularidade (Modificada de SINTERCAST, 2001).....	52
Tabela 3-1 Parâmetros de corte utilizados para os experimentos de usinagem. ....	78
Tabela 4-1 Caracterização do material para as diferentes estruturas através das imagens obtidas. ....	80
Tabela 4-2 Dureza da superfície e do núcleo dos corpos de prova (HB 5/750).....	84
Tabela 4-3 Microdureza da perlita dos corpos de prova (0,5 Kgf).....	85
Tabela 4-4 Propriedades mecânicas das três variações de vermicular. ....	85
Tabela 4-5 Codificação das ferramentas de corte.....	86
Tabela 4-6 Comparação entre as propriedades das cerâmicas produzida pelo IPEN e as comerciais (IPEN, 2006; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002). ....	89

## SIMBOLOGIA

<b>ap</b>	[mm]	Profundidade de corte;
<b>CBN</b>		Nitreto de boro cúbico;
<b>D</b>	[mm]	Diâmetro externo do corpo de prova;
<b>d</b>	[mm]	Diâmetro interno do corpo de prova;
<b>f</b>	[mm/rot]	Avanço
<b>F<sub>cal</sub></b>		Valor estatístico calculado;
<b>F<sub>cri</sub></b>		Valor estatístico fornecido por tabela;
<b>HB</b>		Dureza Brinell;
<b>HV</b>		Dureza Vickers;
<b>K<sub>T</sub></b>	[mm]	Profundidade da cratera na ferramenta de corte;
<b>L</b>	[mm]	Comprimento do corpo de prova;
<b>PCBN</b>		Nitreto de boro cúbico policristalino;
<b>R<sup>2</sup></b>		Coefficiente de correlação;
<b>rpm</b>		Rotações por minuto;
<b>VB</b>	[mm]	Desgaste de flanco na ferramenta de corte;
<b>V<sub>Bmáx</sub></b>	[mm]	Desgaste de flanco máximo na ferramenta de corte;
<b>Vc</b>	[m/min]	Velocidade de corte.

## RESUMO

Atualmente, fatores como: a redução das emissões de poluentes, redução do consumo de combustíveis dos veículos sem alterar a potência, são decisivos para corporações do ramo automobilístico ganhar o mercado consumidor. Neste contexto, o ferro fundido vermicular tem se apresentado como um material de uso potencial, em diversos componentes, bem como em motores diesel devido às suas propriedades superiores. Apesar das boas características mecânicas e dos seus vários benefícios para a indústria, sua microestrutura é de difícil usinabilidade o que se torna um fator limitante de sua aplicação. Um desses fatores é o limite de nodularidade que deve estar em uma faixa de 0 a 20%, pois quanto maior seu aumento, maior será a resistência a tração e a rigidez, diminuindo a condutividade térmica e usinabilidade do material. Ademais, comparado ao ferro fundido cinzento, a dificuldade na usinagem do vermicular está relacionada também a dois fatores: a sua alta resistência mecânica que acarreta grandes forças de corte, e a ausência de sulfeto de manganês em sua microestrutura, sempre presente no ferro fundido cinzento, e que deposita-se sobre a ferramenta de corte garantindo uma ação lubrificante local. Desse modo o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência que a variação na nodularidade do ferro fundido vermicular tem sobre a sua usinabilidade. Os critérios utilizados para a análise foram os tempos de vida e os mecanismos de desgaste das ferramentas de metal-duro e de cerâmica na usinagem do ferro fundido vermicular em processo de corte contínuo. Os resultados obtidos mostram que a variação da microestrutura tem grande influência na usinabilidade do material e que as ferramentas de metal-duro se mostram as mais viáveis para a usinagem do ferro fundido vermicular em função dos bons resultados apresentados.

**Palavras-chave:** Ferro fundido vermicular, torneamento, usinabilidade, microestrutura, nodularidade.

## ABSTRACT

Nowadays, factors such as: the pollutants emission reductions, the fuel consumption reduction on vehicles without losing power, are decisive to the automobile corporations to win the consumer market. Within this context, the compact graphite iron has showed itself as a material with a lot of potential to many components, as well as diesel engines due its superior properties. Despite its good mechanical characteristics and the many benefits that it can bring to the industry, its structure and the composition have a very hard machinability what become limiting factors to its application. One of these factors is the nodularity that should be between 0-20 percent, because how much increase the nodularity, bigger will be the stiffness and tensile strength, decreasing the machinability and thermal conductivity of the CGI. Furthermore comparing to the gray cast iron, the difficulty on machining the compact graphite iron is related on two factors: its high mechanical resistance which involves great cutting powers and the absence of manganese sulfide on its microstructure, which is always present on the gray cast iron that deposits on the cutting tool and guarantees a lubricant action locally. The present work has as purpose to analyze the influence of the nodularity variation on the machinability of compact graphite iron. The parameters consider for the analyses were the tool life and the wear mechanisms of the carbide and ceramics cutting tools. The results showed that the microstructure variation has great influence on the CGI machinability and that the carbides showed the most viable cutting tool for machining the compact graphite iron.

**Keywords:** Compact graphite iron, turning, machinability, microstructure, nodularity.

## 1 INTRODUÇÃO

O ferro fundido vermicular foi patenteado em 1965 por R.D. Schelleng (ASM Handbook, 1990), mas somente na década de 90, após o desenvolvimento de processos e equipamentos que permitissem sua produção em larga escala, surgiu como uma grande opção para a fabricação de diversas peças até então feitas em ferro fundido cinzento. São exemplos de sua utilização tambores de freio, coletores de escapamento, cabeçotes e principalmente blocos de motores Diesel, nos quais são empregadas elevadas taxas de compressão.

As constantes exigências pela diminuição das emissões de poluentes (CO<sub>2</sub>), juntamente com a redução do consumo dos combustíveis fósseis, transformou-se em um objetivo generalizado entre os fabricantes de veículos. As pesquisas para a diminuição do consumo de combustível, por um lado, já estão bastante avançadas na melhoria da aerodinâmica e das técnicas de acionamento dos veículos, mas, por outro, a redução do peso dos veículos oferece outros potenciais de economia de combustível. A redução do peso do motor, que representa aproximadamente 15% do peso total de um veículo, sem alteração da potência, se torna um fator importante levado em conta pelos fabricantes (KLINK & FLORES, 2001).

Com base nos fatores citados acima e comparado ao ferro fundido cinzento, o uso do ferro fundido vermicular pode resultar em reduções de espessura de parede e aumento de pressões de trabalho, proporcionando uma combustão mais completa e reduzindo, assim, a emissão de poluentes, além de garantir um motor mais leve e econômico. Dessa forma, o ferro fundido vermicular apresenta-se como um material de uso potencial e decisivo para corporações do ramo automobilístico ganhar uma maior fatia do mercado consumidor.

Contudo, o processo de desenvolvimento de blocos de motores em ferro fundido vermicular envolve uma análise criteriosa das vantagens e desvantagens de sua utilização, passando pelas áreas de análise estrutural, processo de obtenção da liga e a sua usinagem.

A boa resistência mecânica, à abrasão e à fadiga, a boa condutividade térmica, facilidade de fundição e homogeneidade de propriedades são características do ferro fundido vermicular que permitem fazer o uso desse material para a fabricação de motores diesel com combustão mais eficiente e com melhor desempenho, pois se admite maior pressão na câmara de combustão. Ademais, permite a obtenção de blocos com paredes mais finas e por consequência, blocos mais leves, cerca de 30% em relação ao ferro fundido cinzento (KLINK & FLORES, 2001). Apesar das boas propriedades mecânicas e dos benefícios que o ferro fundido vermicular traz para a indústria automobilística em relação à economia e ao peso dos motores diesel, tem-se constatado que, devido à sua microestrutura ocorre uma diminuição significativa da sua usinabilidade, tornando-se esse um fator limitante de sua aplicação. E um

desses fatores é o limite de nodularidade que deve estar em uma faixa de 0 a 20%, pois quanto maior seu aumento, maior será a resistência a tração e a rigidez, diminuindo a condutividade térmica e usinabilidade do material (LUCHNER & LUDWIG, 2004).

Em função das dificuldades de usinagem desse material, as pesquisas estão divididas em três campos (DAWSON, 1999): aprimoramento das técnicas de usinagem, desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte e melhoria do ferro fundido vermicular por fatores metalúrgicos. O presente trabalho faz parte tanto do campo de desenvolvimento de novos materiais para ferramentas, quanto da obtenção de melhorias por fatores metalúrgicos.

Em nível nacional, várias são as pesquisas na área de ferro fundido vermicular, podendo citar empresas como a Tupy Fundições Ltda, que vem desenvolvendo pesquisas na área desde 1992, sobretudo no que diz respeito a controle de processo e melhoramento da usinabilidade por fatores metalúrgicos e a Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, que desenvolve pesquisas voltadas ao melhoramento da usinabilidade do ferro fundido vermicular através de novos materiais e geometria de ferramentas de corte em diversos processos de fabricação. Destacam-se, neste âmbito, os trabalhos de Xavier (2003) no torneamento de ferro fundido vermicular, de Mocellin (2002) na furação e brunimento de ferro fundido vermicular.

Nesse contexto, determinar as características da liga em termos de nodularidade é de suma importância, pois, a partir da quantidade de nódulos é possível identificar que estrutura fornece melhores resultados na aplicação industrial, como, por exemplo, em blocos e cabeçotes de motores diesel. Isso também possibilita estudar melhor os fatores de desgaste e otimizar a vida das ferramentas de corte, reduzindo tempos de usinagem e desse modo, os custos de produção, proporcionando produtos mais competitivos em relação aos blocos de motores em ferro fundido cinzento. Outro fato em relação ao presente trabalho são os poucos estudos em nível nacional referentes à usinabilidade e variação das características da microestrutura do vermicular, principalmente em termos de nodularidade.

Diante dessa realidade, este trabalho visa avaliar a influência que as variações da nodularidade têm sobre a usinabilidade do ferro fundido vermicular, através de ensaios de torneamento. Tal trabalho é fruto de uma parceria entre o Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e a Tupy Fundições Ltda.

A pesquisa consiste na caracterização do material e de suas propriedades mecânicas, bem como na caracterização e avaliação do desgaste ocorrido nas ferramentas de corte utilizadas na usinagem do ferro fundido vermicular com diferentes nodularidades. Além disso, procurou-se definir, dentre as ferramentas de corte utilizadas na pesquisa, qual a que apresenta as melhores características para a usinagem do ferro fundido vermicular e em qual faixa de

nodularidade. Nesta pesquisa, foram estudadas também ferramentas cerâmicas desenvolvidas especialmente para este trabalho pelo IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), compostas de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carboneto de nióbio ( $\text{NbC}$ ) e óxido de ítria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), e seus resultados serão mostrados e comparados aos das demais ferramentas utilizadas. Levando em consideração a importância do ferro fundido vermicular, sua gama de aplicação e suas propriedades superiores, são descritos abaixo os objetivos desta pesquisa:

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar a influência da variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular mediante ensaios de torneamento longitudinal.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Analisar a influência da variação da nodularidade nas propriedades mecânicas do ferro fundido vermicular;
- Verificar o efeito da variação da nodularidade do ferro fundido vermicular no desgaste e na vida das ferramentas de corte de metal-duro e cerâmica;
- Determinar a ferramenta de metal-duro e de cerâmica mais indicada para a usinagem de ferro fundido vermicular pelo processo de torneamento;
- Avaliar o desempenho de quatro ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carboneto de nióbio ( $\text{NbC}$ ) e óxido de ítria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) na usinagem de ferro fundido vermicular e compará-lo ao desempenho das demais ferramentas utilizadas.

### **1.1.3 Estrutura do trabalho**

O trabalho está estruturado em 7 capítulos. Além deste 1º capítulo, que apresenta uma breve explanação sobre o material em estudo e as pesquisas na área, assim como os fatores que justificam a pesquisa e os objetivos do trabalho, O 2º capítulo apresenta a fundamentação teórica relacionada com pesquisas já realizadas no campo de estudo e necessárias para a interpretação dos resultados obtidos na presente pesquisa. O 3º capítulo trata da metodologia e dos equipamentos utilizados. O 4º capítulo apresenta a caracterização do material e das ferramentas utilizadas e as propriedades mecânicas do ferro fundido vermicular em cada uma das três nodularidades ensaiadas. O 5º capítulo salienta os resultados obtidos na pesquisa e as discussões necessárias. O 6º capítulo aborda as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros, e o 7º capítulo exhibe a lista das referências utilizadas no trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A tecnologia de ferros fundidos tem recebido, continuamente, importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Tais desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação ou ainda de redução de custos, trazem como consequência a atualização tecnológica de um material de longa tradição de uso na indústria automobilística (GUESSER *et al*, 1997).

Por definição, considera-se ferro fundido a liga ferrosa com teor de carbono acima de 2%. Face à influência do silício nessa liga, o ferro fundido é normalmente considerado uma liga ternária Fe-C-Si, já que o silício está frequentemente presente em teores superiores ao do próprio carbono (CHIAVERINI, 2002).

Segundo Chiaverini (1986), a composição química é um dos fatores mais importantes para determinar a estrutura dos ferros fundidos. Nesse caso, os elementos de liga têm o seguinte efeito:

- **Carbono** – é um elemento base que determina a quantidade de grafita a se formar;
- **Silício** – é um elemento grafitizante que favorece a decomposição do carbono do ferro;
- **Manganês** – é um elemento estabilizante da cementita e, além disso, é dessulfurante;
- **Fósforo** – formador de um composto de natureza eutética – carboneto de ferro e fosfeto de ferro - de aparência branca e perfurada chamado steadita;
- **Enxofre** – combina com o manganês, formando sulfeto de manganês (MnS) que no ferro fundido cinzento forma uma camada lubrificante sobre a ferramenta protegendo-a do desgaste. Já no ferro fundido vermicular essa camada lubrificante não ocorre em função da quantidade de enxofre ser 10 vezes menor que no ferro fundido cinzento.

Em resumo, a estrutura dos ferros fundidos é constituída de: ferrita, perlita e cementita com maior ou menor quantidade de grafita na forma de veios, dependendo da composição química e das condições de resfriamento. Outro fator que pode afetar a formação da grafita nos ferros fundidos é a inoculação, que consiste na adição de um material (Por exemplo, o silício) no metal quando ainda está no estado líquido, no próprio forno. A sua adição faz-se no sentido de aumentar a tendência à grafitização, melhorando a tendência à formação de estruturas mais finas e uniformes e possibilitando obter um ferro fundido de melhores propriedades mecânicas.

Conforme Chiaverini (2002), os ferros fundidos podem ser distinguidos nos seguintes tipos de liga:

- **Ferro fundido cinzento** – apresenta como elementos fundamentais o carbono e o silício e sua estrutura possui grande parcela de carbono no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado ( $\text{Fe}_3\text{C}$ );
- **Ferro fundido branco** – devido às condições de fabricação e menor teor de silício apresenta o carbono quase todo na forma combinada ( $\text{Fe}_3\text{C}$ );
- **Ferro fundido mesclado** – caracterizado por uma mescla das variáveis do ferro fundido branco e cinzento;
- **Ferro fundido maleável** – obtido a partir do ferro fundido branco através de tratamento térmico especial com praticamente toda a grafita na forma nodular.
- **Ferro fundido nodular** – apresenta carbono livre na forma de grafita esferoidal que lhe confere boa ductilidade;
- **Ferro fundido de grafita compacta (vermicular)** – considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o nodular. Possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade.

## 2.1 Ferro fundido cinzento

Os ferros fundidos cinzentos são empregados em larga escala pelas suas propriedades de fundição e baixo custo relativo. Possuem características como:

- Boa fusão e moldagem;
- Boa resistência mecânica;
- Excelente usinabilidade;
- Boa resistência ao desgaste;
- Boa capacidade de amortecimento.

Por apresentarem fratura de cor cinza, denominam-se, classicamente, ferros fundidos cinzentos. Possuem a grafita na forma lamelar interconectada e isso lhes garante boa condutividade térmica, visto que a grafita é um bom condutor térmico. Entretanto, a grafita disposta desta forma reduz a resistência mecânica, a ductilidade e também a tenacidade do material, pois provoca descontinuidades na matriz, como também efeitos de entalhe (MARQUARD *et al.*, 1998 citado por BOFF, 2003).

A grafitização é obtida principalmente pelo aumento no teor de silício, que é um elemento grafitizante, aliado a uma redução na velocidade de resfriamento, para que a cementita tenha tempo suficiente para se decompor (MOCELLIN, 2002). A **Figura 2.1** mostra imagens de diferentes morfologias de grafita para o ferro fundido cinzento.

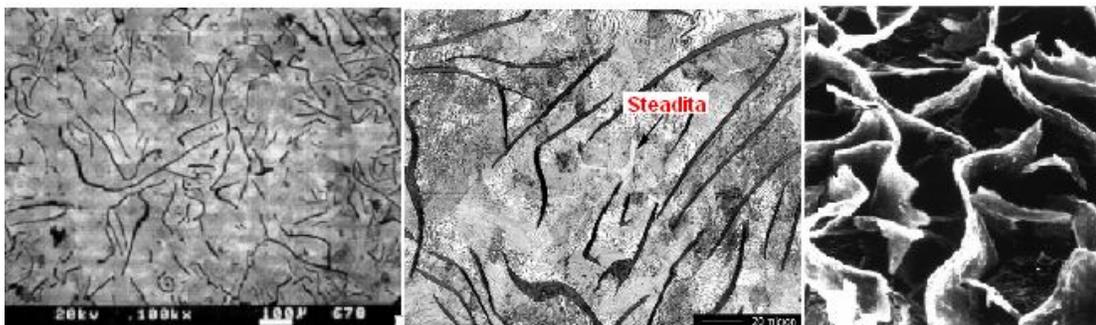


Figura 2-1 Imagens de diferentes morfologias da grafita em ferros fundidos cinzentos (MARWANGA et al, 1999a, BATES et al, 2002, e SINTERCAST, 2006).

A fluidez do ferro fundido cinzento líquido e sua expansão durante a solidificação, em virtude da formação da grafita, fazem dele o metal ideal para a produção econômica de peças complexas, livres de rechupes, pois sua contração durante a solidificação é muito baixa, podendo-se tomar, por exemplo, os blocos de motores à gasolina de combustão interna (MALUF, 2002).

## 2.2 Ferro fundido nodular

O que garante as boas propriedades do ferro fundido nodular é a grafita na forma esferoidal (nódulos), a qual não interrompe a continuidade da matriz. As principais características que destacam esse tipo de ferro é a ductilidade, tenacidade, e também sua resistência mecânica. O limite de escoamento do ferro fundido nodular é mais elevado do que o do ferro fundido cinzento, do maleável e até mesmo dos aços carbono de baixa liga (MOCELLIN, 2002). A **Figura 2-2** representa a microestrutura típica de um ferro fundido nodular.

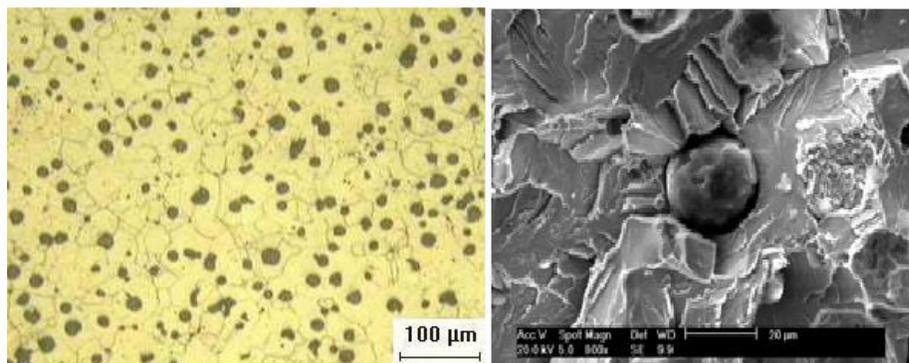


Figura 2-2 Microestrutura típica de um ferro fundido nodular (MELLERAS et al, 2003).

A grafita na forma de nódulos é obtida por meio da adição de elementos nodularizantes como o magnésio e o níquel. De modo contrário a presença de elementos como chumbo,

antimônio, titânio e outros, podem interferir no processo de formação de nódulos e devem ser minimizados quando possível.

### 2.3 Ferro fundido vermicular

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), de acordo com a **Figura 2-3**, porém havia um problema que era no controle da reprodutibilidade do material, uma vez que as adições de magnésio e silício usadas para produzir a grafita nodular não podiam ser controladas, obtendo, dessa forma, um material com muita nodularidade ou com muita grafita em flocos. (OATHOUT, 1978; SERGEANT, 1978).

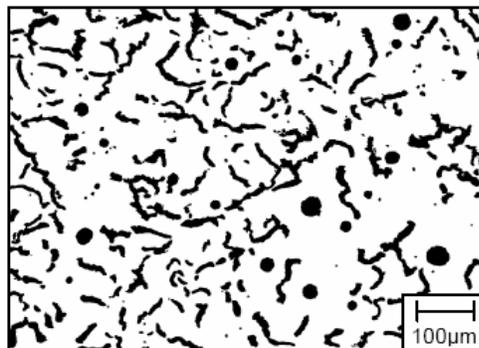


Figura 2-3 Aspecto da grafita vermicular com 10% de nodularização (DAWSON, 1999; SINTERCAST, 2001).

Já na década de 60 foram desenvolvidas técnicas mais avançadas na produção e aplicação do ferro fundido vermicular, e desde então, muitas aplicações do vermicular foram estabelecidas com sucesso em produções em série. Todavia, tais referências da produção são restringidas tipicamente aos produtos com uma microestrutura específica ou àquelas que podem tolerar o uso do titânio para aumentar a escala estável do ferro fundido vermicular (DAWSON *et al* 2004).

Vários métodos foram pesquisados para garantir a obtenção do vermicular, mas apenas dois tiveram resultados positivos e são utilizados para a produção em escala industrial:

- Tratamento da liga com elementos nodularizantes (magnésio) e antinodularizantes (titânio);
- Tratamento da liga com quantidades controladas de elementos que promovem a nodularização da grafita, como o magnésio.

O tratamento da liga com elementos nodularizantes e antinodularizantes foi uma melhora significativa na tecnologia da fabricação do ferro fundido vermicular. Na década de 60,

Shelling relatou que a obtenção do vermicular 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 forma de nódulos. Em contrapartida, a utilização do titânio influencia na usinabilidade do ferro fundido vermicular. Para cada 0,10% de adição do titânio, mais de 1000 inclusões de carbonitreto estarão atuando em cada milímetro quadrado da área de superfície usinada (GUESSER et al, 2001). Como mostra a **Figura 2-4**, mesmo um pequeno aumento no teor de titânio reduz drasticamente a vida da ferramenta durante operações de corte contínuo, tal como mandrilamento do cilindro. (GUESSER et al., 2001).

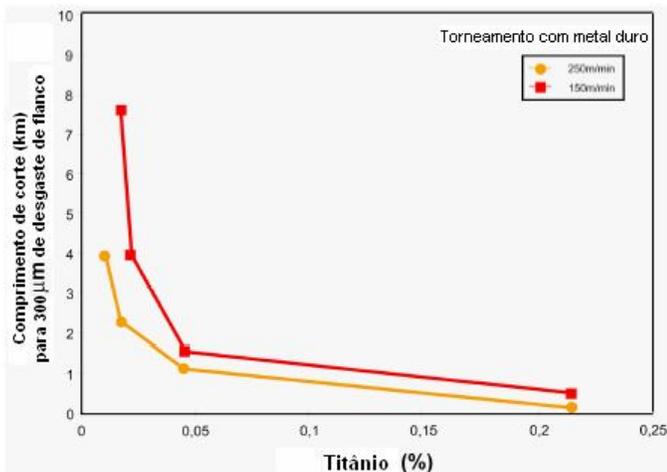


Figura 2-4 O efeito das adições de titânio na vida da ferramenta durante o corte contínuo com metal-duro do ferro fundido vermicular perlítico (REUTER et al, 2001).

Já com a utilização do processo que utiliza somente magnésio, verificou-se que a estrutura vermicular poderia ser obtida somente com o controle do magnésio residual (ou o chamado controle da “curva-S” visto na **Figura 2-5**), em que os valores de magnésio na liga devem variar na faixa de 0,010 a 0,020%. Essa quantidade é insuficiente para gerar o ferro fundido nodular, mas suficiente para assegurar uma faixa estável do ferro fundido vermicular sem a formação de grafita em floco (DAWSON, 2002; GUESSER et al., 2001).

Esse método de obtenção do ferro fundido vermicular não mostra o mesmo problema que pela adição do titânio, já que o controle do magnésio residual na faixa descrita na curva-S assegura uma quantidade suficiente de nodularizante 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 de oxidação para garantir a microestrutura desejada da liga (DAWSON, 1994; GUESSER et al, 2001).

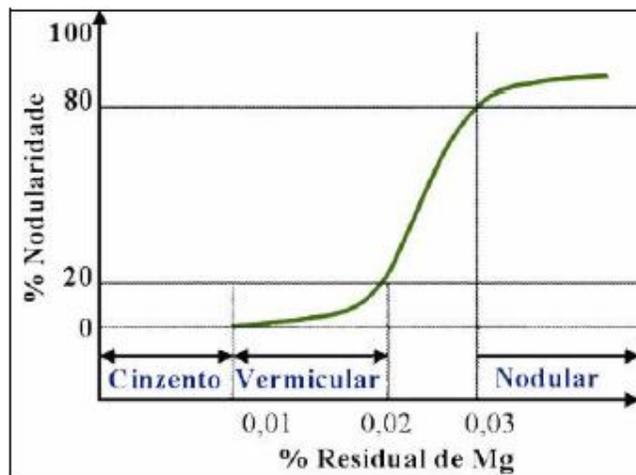


Figura 2-5 Curva S - Influência na nodularidade em função da variação de magnésio (DAWSON, 2002).

Para Guesser (2002), os elementos-chave no controle do processo de produção do ferro fundido com grafita vermicular são as habilidades para medir, de maneira precisa, o comportamento do metal líquido e para responder corretamente antes do vazamento das peças.

A **Figura 2-6** mostra que, para haver a transição de uma grafita lamelar para grafita vermicular com 3% de nodularidade em uma barra do teste de 25 milímetros do diâmetro, basta adicionar somente 0,0010% (10g) de magnésio em uma tonelada de ferro fundido (DAWSON, 2001; DAWSON, 1998; DAWSON, 2002).

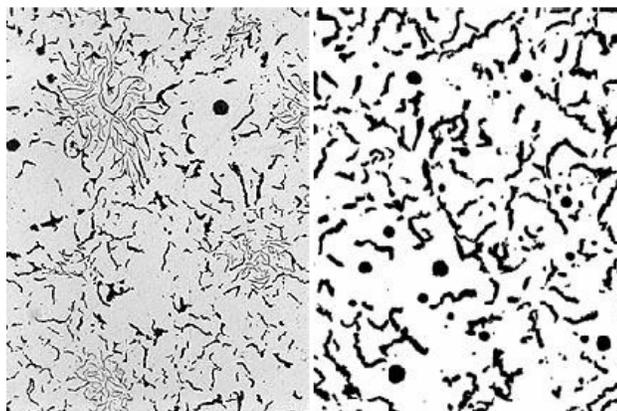


Figura 2-6 Adição de 0,001% de magnésio é suficiente para mudar uma estrutura lamelar para uma estrutura vermicular com 3% de nodularidade (DAWSON, 2001; DAWSON, 2002).

No processo Sintercast, adotado pela Fundição Tupy, o controle é baseado na análise térmica durante a solidificação da liga após o tratamento inicial com magnésio. Essa análise sintetiza o efeito combinado de todas as variáveis do processo, incluindo as matérias-primas,

as práticas de fusão e manutenção do banho, as diferenças de operação e os rendimentos das adições de magnésio. A adição inicial de Mg é intencionalmente baixa, de maneira que a análise térmica sempre determine a quantidade adicional de tratamento necessária para chegar à formação da grafita vermicular (GUESSER, 2002).

A análise térmica é realizada utilizando-se um amostrador de imersão, ilustrado na **Figura 2-7**. Trata-se de um copo metálico de paredes finas, que, em uma imersão de 3 segundos, obtém uma amostra de 200 g (GUESSER, 2002).

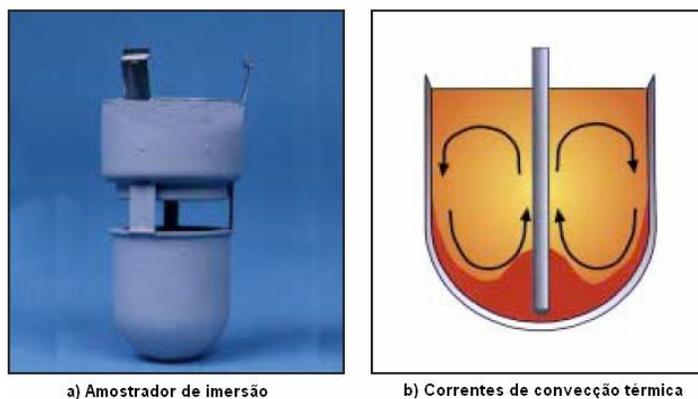


Figura 2-7 Vista do amostrador por imersão, utilizado para a obtenção do ferro fundido vermicular (SINTERCAST, 2001a; DAWSON, 2002).

O amostrador contém um tubo protetor por onde dois termopares reutilizáveis monitoram a solidificação das duas regiões, centro e fundo. Tipicamente, a curva de análise térmica da região com menos Mg indicará a tendência à formação de uma mescla de grafita compacta e grafita de super-resfriamento, tipo D, enquanto que a curva da região central apresentará as características correspondentes à formação de grafita compacta. A **Figura 2-8** exibe as microestruturas correspondentes às duas regiões do amostrador (GUESSER, 2002; DAWSON, 2002).

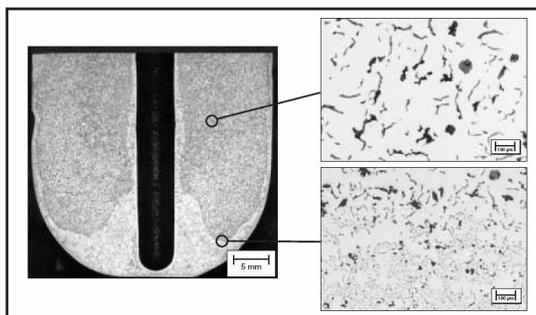


Figura 2-8 Na região central, a formação de grafita vermicular (SINTERCAST, 2001a; DAWSON 2002).

O processador do sistema analisa as duas curvas e determina a quantidade de correção para manter as peças fundidas livres de grafita lamelar e com um mínimo de grafita nodular. As adições complementares de Mg são feitas automaticamente, por meio de um alimentador de fio de magnésio metálico (GUESSER, 2002; DAWSON, 2002).

### 2.3.1 Microestrutura dos ferros fundidos vermiculares

Como mostrado na **Figura 2-9** (a) (GUESSER *et al.*, 1997), a fase da grafita no ferro fundido vermicular aparece na forma de vermes ou de partículas vermiculares, que são alongadas e orientadas aleatoriamente como no ferro cinzento, porém são mais curtas, mais grossas e de bordas arredondadas. Quando as partículas de grafita compacta aparecem na forma vermicular, são vistas em duas dimensões, através de uma varredura mais profunda (Figura 2.9 (b) (HEISSER *et al.*, 2003)) mostrando que os vermículos estão conectados a seus vizinhos mais próximos dentro da célula eutética. O complexo coral com a morfologia da grafita, com as bordas arredondadas e as superfícies irregulares das partículas comprimidas da grafita, resultam em uma adesão mais forte entre a grafita e a matriz do ferro inibindo assim a iniciação e o crescimento de rachaduras fornecendo propriedades mecânicas superiores (DAWSON *et al.*, 2004).

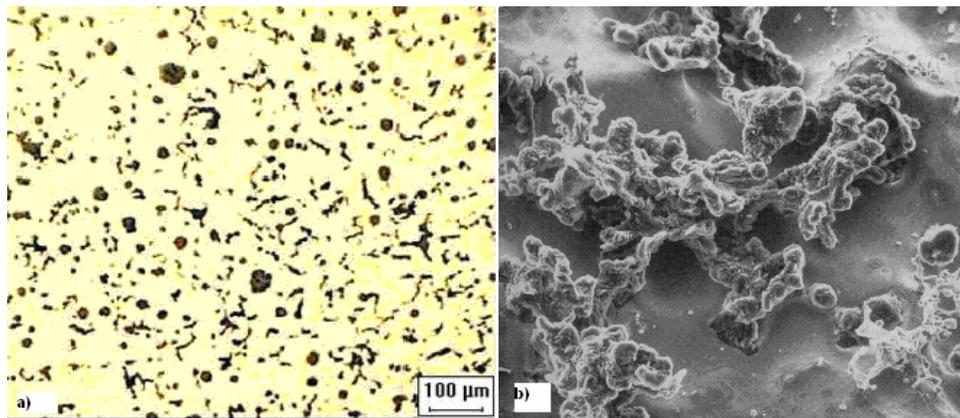


Figura 2-9(a) Vermicular atacado por Nital (GUESSER *et al.*, 1997); (b) Microestrutura do ferro fundido vermicular vista em três dimensões (HEISSER *et al.*, 2003).

Os vermículos desse tipo de ferro são similares aos nódulos do ferro fundido nodular, pois ambos são bem menores do que as lamelas de grafita do ferro fundido cinzento, possuindo cantos arredondados e isolados individualmente, com uma matriz contínua de ferro envolvendo cada vermículo (SINTERCAST, 2001).

Portanto, contendo tal tipo de microestrutura, o ferro fundido vermicular apresenta as seguintes características: boa resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência a choques térmicos, amortecimento e condutividade térmica.

As especificações da microestrutura requerem tipicamente uma escala da nodularidade na faixa de 0-20%. A perlita pode ser definida de acordo com a aplicação, já a grafita lamelar é inadmissível. Quanto aos elementos de liga podem ser adicionados para realçar a resistência a altas temperaturas, ao desgaste ou outras propriedades. As escalas típicas da composição química são fornecidas na **Tabela 2-1**, embora a especificação química de carcaças de ferro fundido vermicular esteja ligada às propriedades mecânicas (SINTERCAST, 2001).

Tabela 2-1 Análise química típica de um ferro fundido vermicular com nodularidade de 0-20% (SINTERCAST, 2001).

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

### 2.3.2 Propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular típico, do ponto de vista da faixa de composição química, não apresenta nenhuma diferença significativa do ferro fundido cinzento e nodular, cada um contém aproximadamente 94% de ferro (Fe), 3% de carbono (C), 2,5% de silício (Si) e o restante está dividido entre elementos de liga e elementos residuais (DAWSON, 1993 citado por XAVIER, 2003).

As diferenças principais entre essas ligas se devem aos tipos de morfologias das suas grafitas, que conferem propriedades físicas e mecânicas distintas a cada uma delas. A vermicularização da grafita se dá mediante a ação do magnésio, que é um elemento nodularizante, presente numa faixa de 0,01 a 0,02% na liga (GUESSER *et al*, 2001). Essas diferenças podem ser visualizadas na **Figura 2-10**.

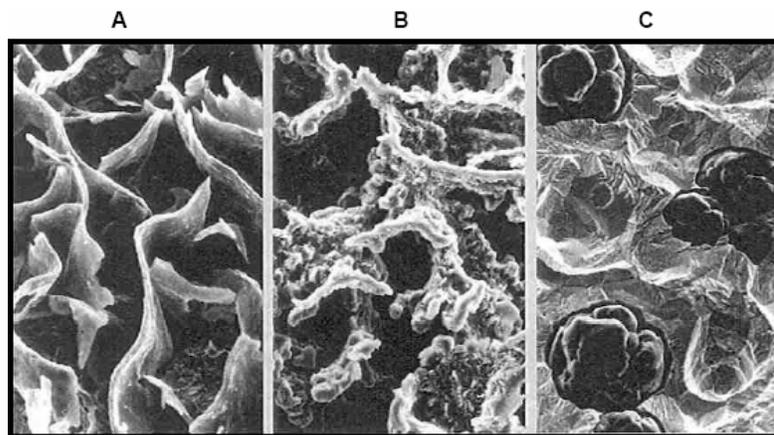


Figura 2-10 Morfologia típica da grafita. A (cinzento), B (vermicular) e C (nodular). Imagens geradas por MEV (SINTERCAST, 2006).

No caso do ferro fundido vermicular, os cantos arredondados das lamelas de grafita não agem como pontos de concentração de tensões e a grafita interconectada propicia uma taxa maior de transferência de calor e dissipação de vibrações do que o nodular, garantindo assim boas propriedades físicas e mecânicas (ASM Handbook, 1990; GUESSER, 1997). Na **Tabela 2.2**, são comparadas as propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido vermicular em relação ao ferro fundido cinzento e ao nodular.

Tabela 2-2 Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos vermicular, cinzento e nodular (SINTERCAST, 2001 citado por MOCELLIN 2002; VACCARI, 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

### 2.3.3 Mecanismo de formação do cavaco

No processo de corte, quando o gume da ferramenta inicia a penetração no material da peça, faz com que uma parte do material seja deformada elástica e plasticamente. Isso ocasiona o aumento das tensões, até que o limite máximo de cisalhamento do material seja atingido, e o mesmo comece a escoar sobre a face da ferramenta formando o cavaco. Quanto maior a deformação do cavaco, menor será o ângulo de cisalhamento, e conseqüentemente maiores serão os esforços de corte (DINIZ *et al*, 1999, WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

Os cavacos produzidos no processo de torneamento podem apresentar aspectos e formas distintas, dependendo do avanço, da profundidade de corte, da velocidade de corte, da geometria da ferramenta, do material da peça e da utilização ou não de fluido de corte. A formação do cavaco vai influenciar diversos fatores ligados à usinagem, como, por exemplo, o desgaste da ferramenta de corte, os esforços de corte e o calor gerado na usinagem (DINIZ *et al*, 1999; STEMMER, 2005).

Na usinagem do ferro fundido, o cavaco é influenciado pela forma e quantidade da grafita. A presença de grafita reduz o atrito entre a ferramenta e a peça levando a uma melhora na

usinabilidade, gerando cavacos quebradiços, com menores forças de corte e maior vida de ferramenta. No ferro fundido cinzento, durante a usinagem, a ferramenta primeiramente comprime o material, ocorrendo uma concentração de tensão nas suas extremidades, e devido ao fato da grafita estar na forma de lamelas interconectadas, cria-se um plano de propagação de trincas à frente do gume (**Figura 2-11** (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, melhorando a usinabilidade e piorando a rugosidade da superfície usinada (d) (MARWANGA *et al* (1999a e 1999b), GEORGIU, 2002 citados por XAVIER, 2003; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

No ferro fundido nodular, a grafita na forma de nódulos é deformada pela ação compressiva da ferramenta, antes da separação do cavaco. Os cavacos, desse modo, fluem sobre a superfície da ferramenta de forma contínua. Ademais a microestrutura do ferro fundido nodular fornece maior escoamento e ductilidade do que o ferro fundido cinzento durante a usinagem (GEORGIU, 2002, citado por XAVIER, 2003). Segundo Marwanga *et al* (1999a), no ferro fundido cinzento a fratura é dominante na formação do cavaco, enquanto no ferro fundido nodular, os nódulos de grafita são deformados e alongados na direção do corte. A deformação e alongamento dos nódulos e o fluxo das linhas de usinagem normalmente visíveis confirmam a severa deformação plástica que ocorre antes da fratura na usinagem do ferro fundido nodular. Devido à maior deformação, o cavaco do nodular acaba sendo mais longo do que o do ferro fundido cinzento. Ainda conforme Marwanga *et al* (2000), há um consentimento geral de que quando se usina ferro fundido nodular as seguintes características são observadas:

- Ocorre a produção de cavacos finos e semi-descontínuos;
- É observada baixa fricção na interface cavaco-ferramenta;
- Diminui a força necessária para a remoção do material;
- As temperaturas na ferramenta são mais baixas;
- Vidas mais longas de ferramenta são obtidas;
- Uma larga variação na usinabilidade é observada;
- Em baixas velocidades de corte, ocorre a formação de aresta postiça de corte.

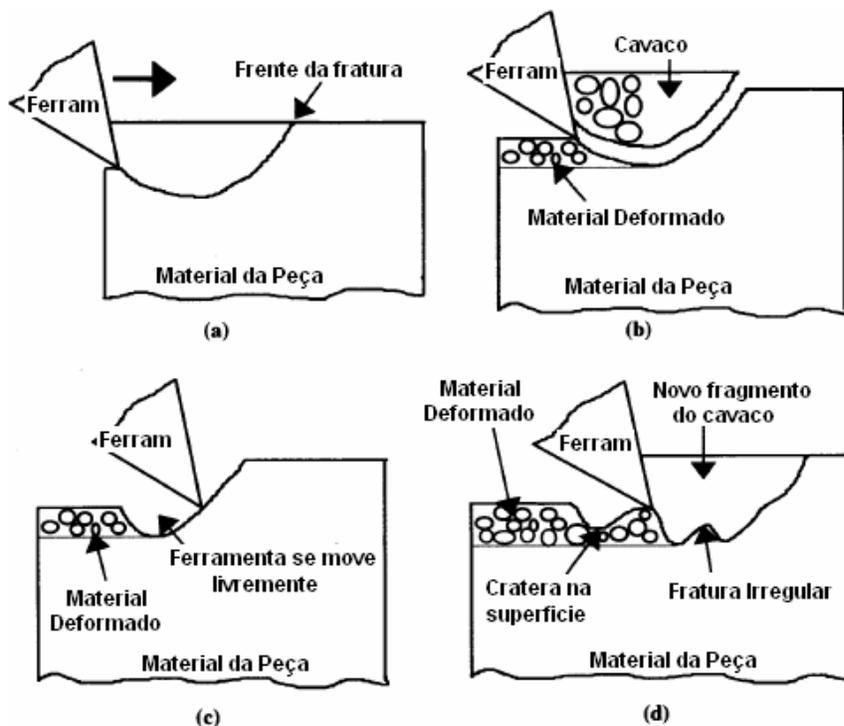


Figura 2-11 Mecanismo de formação do cavaco em ferro fundido cinzento (MARWANGA *et al.*, 1999a; 1999b).

Lucas *et al* (2005), pesquisaram a formação do cavaco na usinagem de ferro fundido nodular ferrítico através do método de interrupção súbita do processo de torneamento (o chamado sistema *quick-stop*). Nos ensaios, foram utilizadas velocidades de corte baixas de 20 e 40 m/min, intermediária de 80 m/min e de 200 m/min. Como nos trabalhos de Marwanga *et al* (1999a) e Georgiou (2002), Lucas *et al* (2005) observaram uma grande quantidade de deformação plástica pela deformação da grafita. As grafitas apresentaram-se fortemente alongadas com orientação paralela à região primária de deformação. Verificaram também que, em velocidades baixas, ocorre a formação da aresta postiça de corte de cerca de 0,5mm sobre o gume da ferramenta e com altura máxima de 0,25mm. O material deformado na aresta postiça revelou uma estrutura constituída por ferrita e perlita, intensamente deformada e alongada no sentido da deformação. Na **Figura 2-12** é mostrada uma comparação entre a formação do cavaco do ferro fundido cinzento e a do nodular.

No ferro fundido vermicular, a estrutura é caracterizada por inclusões de grafita na forma de vírgulas (vermiculos), que dá ao material propriedades entre o ferro fundido cinzento e o nodular. Nesse material a formação de cavaco vai apresentar a característica dúctil do nodular e a fragilidade do cinzento. Na usinagem, o material é removido devido a trincas que se formam no plano da grafita que possui uma resistência menor aos esforços de corte. A

diferença é que, como a grafita tem bordas arredondadas, requer uma força de corte maior, formando um cavaco parecido com o do ferro fundido nodular (REUTER *et al*, 1999b).

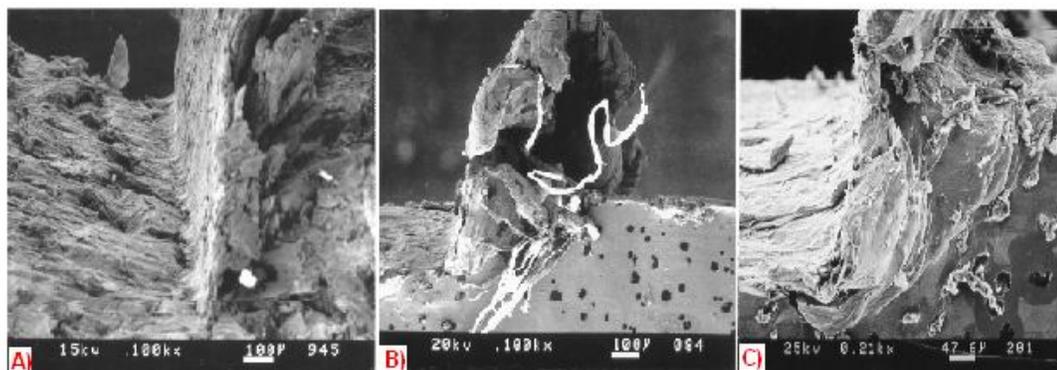


Figura 2-12 Mecanismo de formação do cavaco: A) Fratura no ferro fundido cinzento, B) e C) Deformação da grafita no ferro fundido nodular (COHEN & VOIGT, 2003).

Reuter *et al* (1999b) realizaram testes de usinagem com parada instantânea com o objetivo de analisar a raiz do cavaco no momento de sua remoção do ferro fundido. Na **Figura 2-13**, tem-se a comparação entre o ferro fundido cinzento, o vermicular e o nodular.

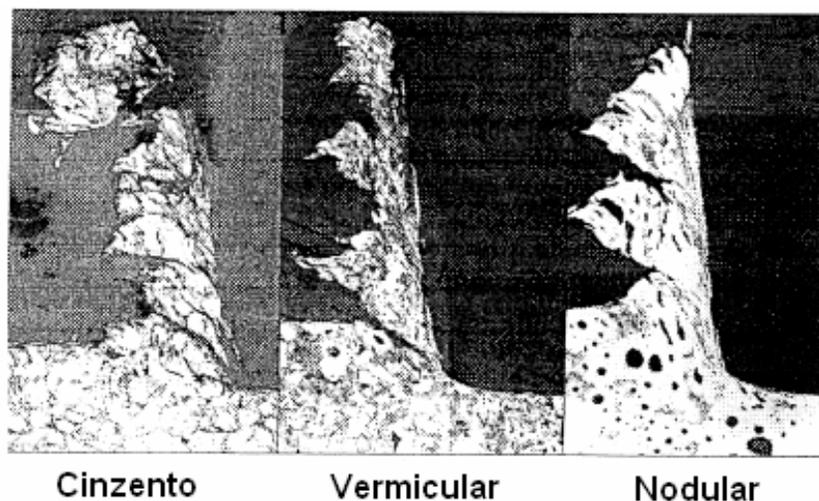


Figura 2-13 Diferença na formação do cavaco no ferro fundido cinzento, vermicular e no nodular (REUTER *et al*, 1999b).

Observando a Figura 2-13, pode-se ver que o ferro fundido vermicular e o nodular possuem um comportamento dúctil com deformação plástica, enquanto o ferro fundido cinzento apresenta um comportamento frágil. Tanto o ferro fundido vermicular como o nodular, têm um comportamento de desgaste semelhante, indicando que o nodular é igual ou até mais difícil de usinar do que o vermicular. O ponto comum entre esses tipos de ferro fundido é sua maior ductilidade em comparação com o cinzento. Além do mais o vermicular possui um alongamento de 10-20 vezes maior do que o cinzento, o que se torna uma diferença significativa.

### 2.3.4 Usinabilidade do ferro fundido cinzento, vermicular e nodular

Usinabilidade, por definição, é a facilidade ou a dificuldade relativa de remoção do metal, transformando-o em um produto final. O objetivo geral é obter as exigências dimensionais desejadas com o menor custo possível.

Normalmente, a usinagem está relacionada a três componentes: a máquina ferramenta (principalmente no que diz respeito à rigidez), os parâmetros de usinagem (que incluem ferramentas de corte (materiais, revestimentos e geometria), velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e utilização de fluido lubri-refrigerante), e os fatores relacionados ao material da peça (microestrutura, dureza do material, a composição química e as propriedades mecânicas), que afetam significativamente a usinabilidade como apresentado na **Figura 2-14** (SRIVASTAVA, 2005).

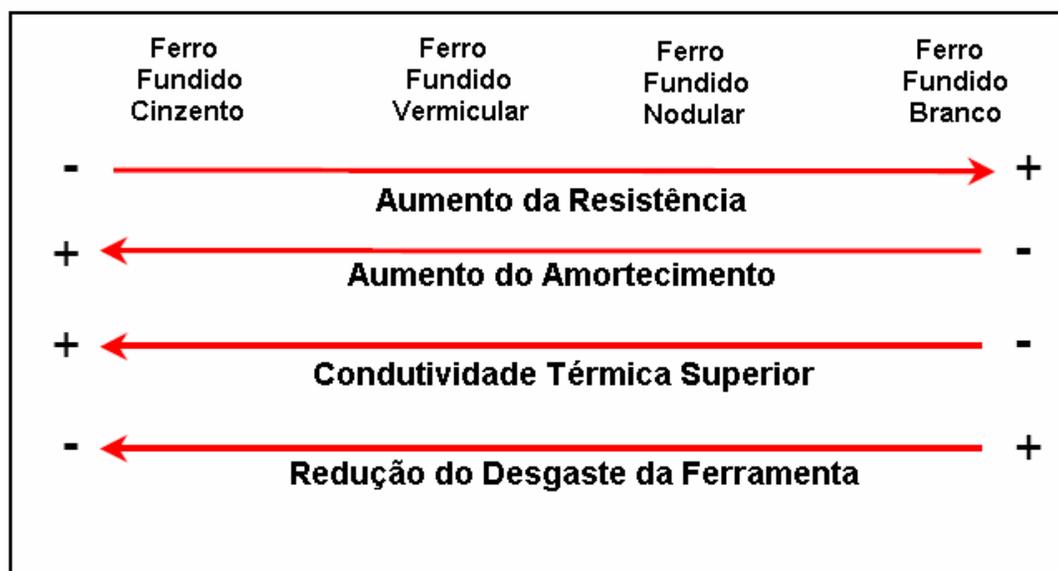


Figura 2-14 Efeito da composição química nas propriedades dos ferros fundidos e na vida da ferramenta (SRIVASTAVA, 2005).

Na usinagem de ferro fundido cinzento, destacam-se os trabalhos de Bates (1996) e Eleftheriou & Bates (1999), que realizaram ensaios de furação em diversas ligas de ferro fundido, entre elas o ferro fundido cinzento classe 40, obtido através da variação do inoculante com o objetivo de verificar a influência de carbonetos, da velocidade de corte e das células eutéticas na usinabilidade desses materiais. Segundo eles, os carbonetos influenciam na usinagem e sua quantidade se deve à maior concentração de elementos formadores de carbonetos e elementos que retardam a difusão do carbono na liga. Outra conclusão é que a vida da ferramenta diminui com o aumento da velocidade de corte ou com o aumento da porcentagem de carbonetos presentes na liga. Vidas mais longas de ferramenta podem ser obtidas em velocidades mais baixas porque geram baixo aquecimento e permitem que o calor

gerado seja difundido pela superfície de corte minimizando o superaquecimento na ponta da ferramenta. Para Bates (1996), diminuindo a porcentagem de elementos inoculantes (por exemplo, cálcio e alumínio) de 0,5% para 0,2%, pode-se aumentar a vida da ferramenta de corte em até 100%. Eleftheriou & Bates (1999), por sua vez, afirmam que uma alta contagem de células eutéticas na liga diminui a taxa de desgaste nas ferramentas de corte.

Pereira *et al* (2005 & 2006) realizaram ensaios de torneamento de ferro fundido cinzento FC25 com diferentes quantidades de enxofre na liga, com o objetivo de verificar a influência do enxofre (pela formação de sulfeto de manganês MnS) na usinagem do ferro fundido cinzento. As ligas foram produzidas com 0,065%, 0,12%, 0,15% e 0,18% de enxofre e usinadas com velocidades de corte de 100, 150 e 200 m/min com ferramentas de metal-duro revestido e sem revestimento. As curvas de desgaste das ferramentas para as velocidades de 100 e 200 m/min podem ser vistas na **Figura 2-15**.

De acordo com Pereira *et al* (2006), o aumento na quantidade de enxofre no ferro fundido cinzento de 0,12% para 0,18% não piorou a usinabilidade. Na liga com 0,065% de enxofre, houve maior aderência sobre a ferramenta, portanto, para que não ocorra a aderência é necessário que haja uma porcentagem mínima de área ocupada por inclusões de sulfeto de manganês. Segundo a autora, essa área deve ser em torno de  $(18 \pm 6) \times 10^{-3}$ .

Estatisticamente, a usinabilidade das ligas com 0,12, 0,15 e 0,18% de enxofre não difere significativamente nas velocidades de corte de 100, 150 e 200 m/min. Na comparação entre a liga de 0,12% S com a de 0,065% S, houve uma diminuição na vida de ferramenta de 24, 32 e 38%, respectivamente, às velocidades de corte de 100, 150 e 200 m/min. Isso indica que a influência das inclusões de sulfeto de manganês é maior em altas velocidades de corte (PEREIRA *et al*, 2006 & PEREIRA 2005).

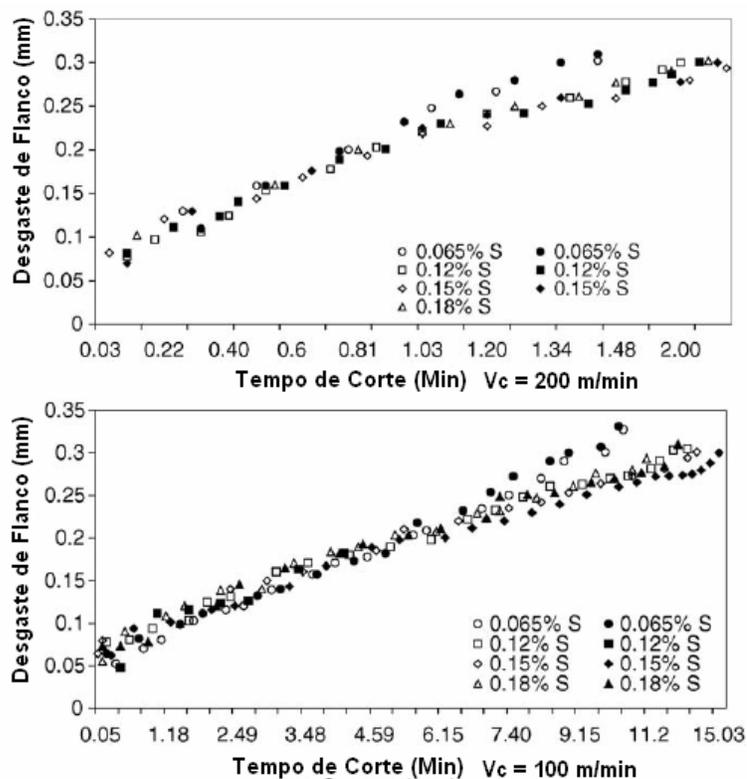


Figura 2-15 Comportamento do desgaste nas ferramentas de corte na usinagem de ferro fundido cinzento FC 25 com diferentes % de enxofre (PEREIRA, *et al*, 2005 & 2006).

Na usinagem de ferro fundido nodular, destacam-se trabalhos como o de Dilço *et al* (2000), que fizeram ensaios de torneamento de perfis cilíndricos de ferro fundido nodular da classe FE-50007 produzido por fundição contínua. Foram utilizadas ferramentas de metal duro de classes e camadas de revestimentos diferentes. As condições de corte foram definidas em: velocidade de corte de 250 m/min, avanço de 0,2 mm e profundidade de corte de 2,5 mm. A região dos ensaios de usinagem foi definida de acordo com as análises metalográficas que foram efetuadas em diversos diâmetros da barra. A primeira camada foi considerada de 1 a 8,5 mm da superfície, a segunda camada, de 8,5 a 16 mm e a terceira camada, de 16 a 23,5 mm da superfície. O resultado mostrado na **Figura 2-16** representa a vida das ferramentas de corte na usinagem da segunda camada.

Conforme Dilço *et al* (2000), os melhores resultados foram obtidos com a ferramenta GC3015 em que os tempos de vida da ferramenta se mantiveram entre 13 e 48 minutos, dependendo da camada usinada. Constatou-se também que, a partir de um desgaste VB de 0,2 mm, a taxa de desgaste aumenta bruscamente, o que foi associado à perda do revestimento pela ferramenta de corte e pelo aumento na solicitação térmica e fricção na região desgastada.

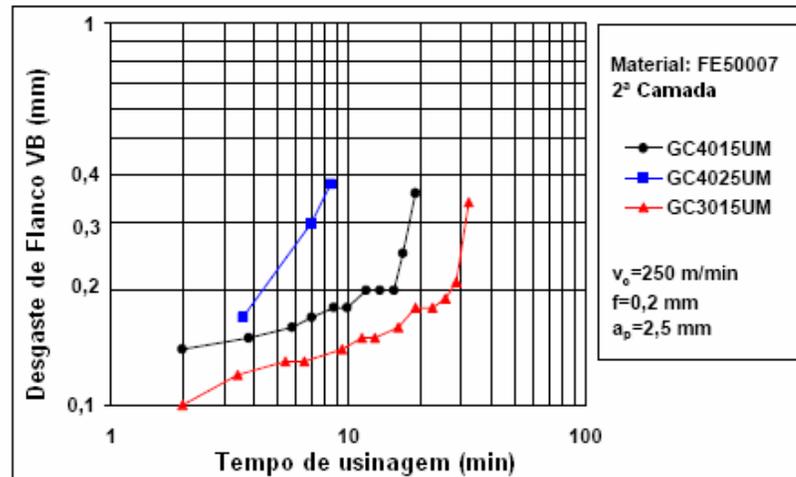


Figura 2-16 Usinagem de ferro fundido nodular da classe FE-50007 com ferramentas de metal-duro (DILÇO *et al*, 2000).

Outro trabalho recente que pode ser citado é o de Silva & Abrão (2006), que investigaram a usinabilidade do ferro fundido nodular GGG 40 por meio de ensaios de torneamento com ferramentas de metal-duro revestido GC 3015 QM com camada externa de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), GC 3015 KM com camada externa de nitreto de titânio (TiN) e cerâmica de alumina mista (70%  $Al_2O_3$  + 30% TiC). Foram utilizadas velocidades de corte de 200, 250 e 300 m/min, avanços de 0,1, 0,25 e 0,4 mm e profundidade de corte de 0,5 e 1,5 mm.

Após os ensaios, os autores concluíram que a elevação da velocidade de corte e do avanço resultou na diminuição da vida de ferramenta de corte de metal-duro QM. Aumentando a velocidade de 200 para 300 m/min, teve-se uma redução de 65% da vida de ferramenta no avanço 0,1 mm e uma redução de 51% no avanço de 0,4mm. Mantendo a velocidade constante em 300 m/min e variando o avanço de 0,1 para 0,4mm, a vida da ferramenta reduziu 38%. Os mecanismos de desgaste mais evidentes observados por Silva & Abrão (2006) foram a abrasão e a difusão. Quanto aos resultados da cerâmica, apresentou valores inferiores de rugosidade com relação às ferramentas de metal-duro e o tempo de vida ficou abaixo dos metais-duros.

Já quando comparado ao ferro fundido cinzento, a dificuldade na usinagem do vermicular está associada a dois fatores: a sua alta resistência mecânica envolvendo grandes forças de corte, e a ausência de sulfeto de manganês em sua microestrutura, sempre presente no ferro fundido cinzento, e que se deposita sobre a ferramenta de corte garantindo uma ação lubrificante local (PEREIRA *et al*, 2006, REUTER *et al*, 2001, GASTEL *et al*, 2000). Além disso, o ferro fundido vermicular possui um limite de resistência 75% maior que o ferro fundido cinzento e uma rigidez 45% maior, refletindo diretamente na diminuição de sua usinabilidade. Como exibido na **Figura 2-17**, obtida inicialmente em 1998 usando parâmetros

de corte padrão do ferro cinzento, o corte abaixo da velocidade (entre 100-200 m/min) com as ferramentas convencionais de metal-duro fornece aproximadamente 50% da vida da ferramenta para ferro cinzento em operações de fresamento e de torneamento (DAWSON *et al*, 2004; GUESSER *et al*, 2001).

Similarmente, as operações de fresamento de alta velocidade (400-800 m/min) fornecem cerca de 50% da vida da ferramenta para ferro fundido cinzento ao usar o nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) ou insertos cerâmicos. Porém, a diferença entre a usinabilidade do CGI e o ferro cinzento é mais significativa ao usar PCBN ou insertos de cerâmica em operações contínuas de alta velocidade de corte, tais como o torneamento ou o brunimento do cilindro (DAWSON *et al*, 2004).

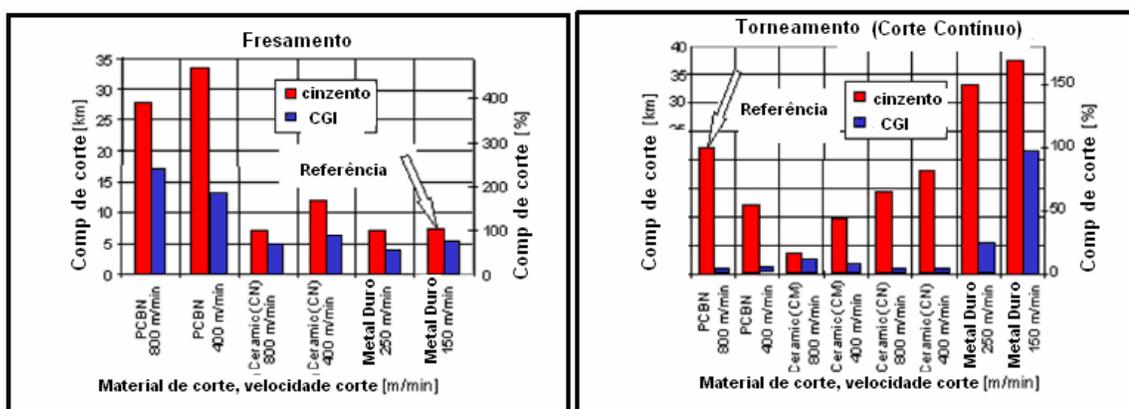


Figura 2-17 Comparativo entre a usinabilidade do ferro fundido cinzento e a do vermicular em torneamento e fresamento (Modificada de REUTER *et al*, 2001).

Mocellin (2002) avaliou a usinabilidade do ferro fundido vermicular com diferentes propriedades através de ensaios de furação de longa duração. Os corpos de prova foram furados com brocas de metal-duro revestidas por TiNAl monocamada, sendo que o desgaste de flanco de 0,40mm foi considerado como critério de fim de vida para as ferramentas.

Analisando os resultados obtidos, pode-se dizer que os diferentes tipos de ferros fundidos vermiculares obtidos de variáveis de fundição controladas podem fornecer uma ampla gama de usinabilidades. Com a adição de elementos de liga para formar um ferro fundido vermicular 100% perlítico, consegue-se apenas 44% de usinabilidade em relação ao ferro fundido cinzento, sendo que os vermiculares com 84% de perlita apresentaram uma usinabilidade de 67% em relação aos cinzentos. Já o resultado do vermicular 3 foi excelente, no entanto possuía uma baixa proporção de perlita e dureza bastante inferior ao cinzento 1 (MOCELLIN, 2002; 2004). Os resultados obtidos por ele estão representados na **Figura 2-18**.

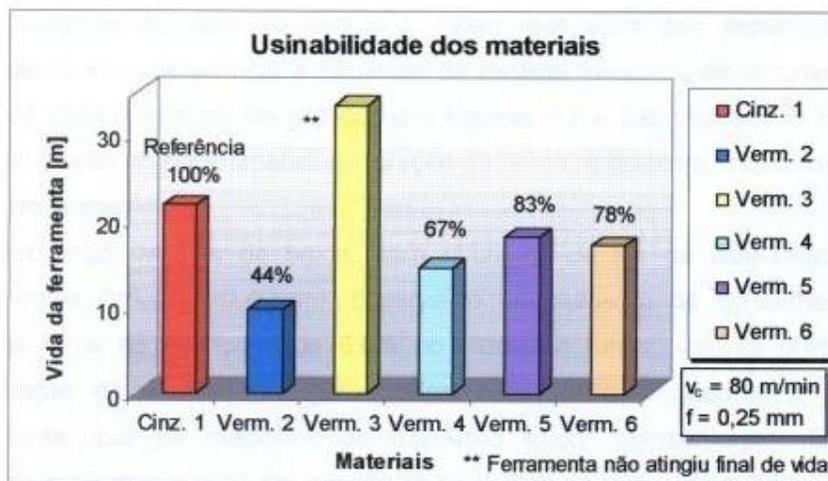


Figura 2-18 Resultados obtidos na usinagem de diferentes microestruturas de ferro fundido vermicular pelo processo de furação (MOCELLIN 2002, 2004).

Xavier (2003), realizou testes de torneamento com ferramentas de metal-duro, cerâmica e nitreto de boro cúbico (CBN), para verificar qual dessas ferramentas possui melhor desempenho na usinagem de ferro fundido vermicular. O material possuía uma matriz metálica com 92% de perlita e 8% de ferrita, grafita nas formas III e IV sendo 92% vermicular e 8% nodular e dureza média de 236 HB.

Diante dos resultados obtidos, 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, que possuía três camadas de revestimento (1ª camada de TiCN, 2ª camada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo a 3ª mais externa de nitreto de titânio (TiN), e deve-se ao fato de que ele apresentou a menor taxa de desgaste. Nos ensaios utilizando  $v_c = 160 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,2 \text{ mm}$  e  $a_p = 0,5 \text{ mm}$ , ela obteve os maiores tempos de vida quando comparada às outras ferramentas, e pode ser vista na **Figura 2-19**.

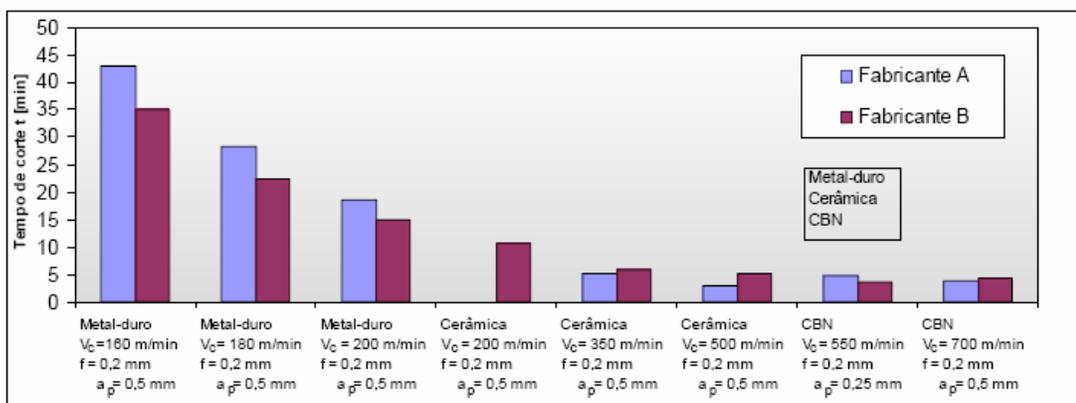


Figura 2-19 Resultados obtidos por XAVIER (2003) na usinagem de ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN.

O rendimento superior da ferramenta com uma terceira camada de revestimento de TiN é explicado pelo fato de que, durante a usinagem, em função das características do ferro fundido vermicular (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, o qual deixa a ferramenta exposta à solitação térmica, tornando-a mais vulnerável à ação da abrasão. Dessa forma, o revestimento proporciona baixo coeficiente de atrito, protegendo-a por mais tempo da ação dos mecanismos de desgaste, e por consequência, aumentando o seu tempo de vida (XAVIER, 2003). O autor também cita como desgaste predominante nas ferramentas a abrasão.

Com o objetivo de comparar o ferro fundido cinzento com o vermicular, Reuter (1999a) realizou ensaios de torneamento longitudinal utilizando como materiais para ferramentas de corte o CBN, a cerâmica e o metal-duro. As ligas de ferro fundido utilizadas apresentavam teores de perlita altos (HP = 95% perlita) e baixos (LP = 50% perlita). Os resultados obtidos nesta pesquisa encontram-se na **Figura 2-20**.

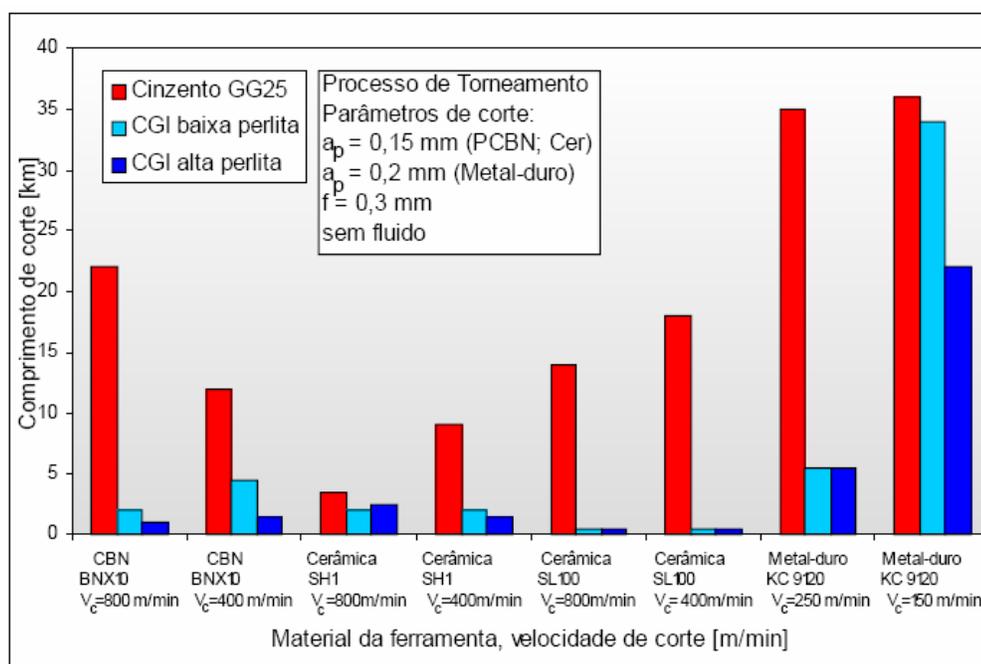


Figura 2-20 Resultados do torneamento de ferro fundido cinzento e do ferro fundido vermicular com alta e baixa proporção de perlita (REUTER, 1999a; ABELE *et al*, 2002).

Pode-se observar que a diferença entre os resultados obtidos no ferro fundido cinzento e no vermicular é mais significativa em altas velocidades de corte, já em velocidades de corte mais baixas, destacam-se as ferramentas de metal-duro que obtiveram uma vida em torno de 50% da apresentada no ferro fundido cinzento.

Segundo Reuter *et al* (1999b), em seu estudo para determinar os mecanismos de desgaste em ferramentas de corte, o ferro fundido vermicular é 33% mais abrasivo e 15% mais adesivo que o ferro fundido cinzento. O efeito combinado da abrasividade com a resistência à fricção ajuda a explicar por que a vida das ferramentas de corte na usinagem do vermicular alcança 50% do tempo de vida quando comparado ao ferro fundido cinzento.

Em outros experimentos, Reuter 2000, citado por Xavier (2003), testou ferramentas cerâmicas à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (nitreto de silício) no corte contínuo. Os ensaios mostraram o baixo desempenho dessas ferramentas na usinagem do ferro fundido vermicular quando comparadas à usinagem no ferro fundido cinzento. Os resultados estão apresentados na **Figura 2-21**.

Leuze 2000, citado por Xavier (2003), também realizou ensaios de torneamento em ferro fundido vermicular com 0,18% de titânio com cerâmicas à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (nitreto de silício), em velocidade de corte de 250 m/min, avanço de 0,3 mm/rot e profundidade de corte de 0,15 mm. Nessa ocasião, o resultado obtido foi um tempo de vida em torno de 8 minutos.

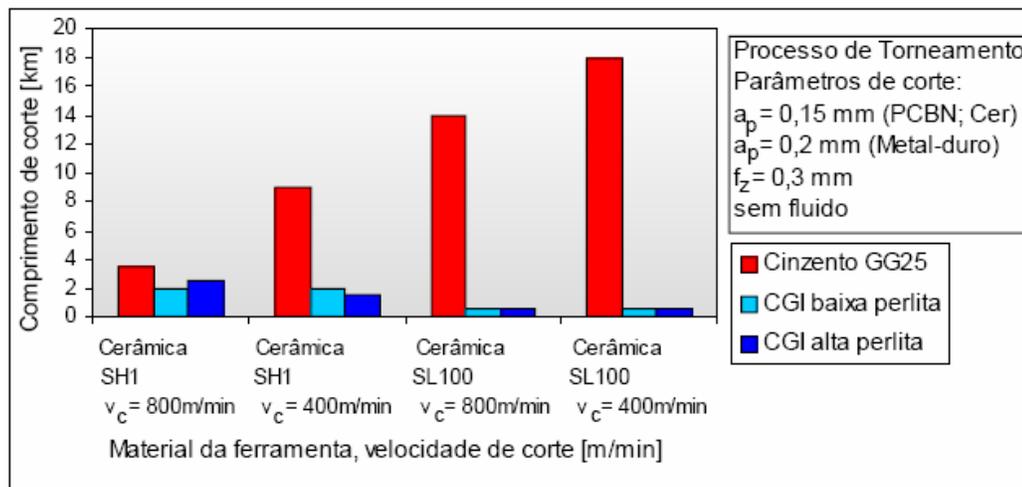


Figura 2-21 Torneamento de ferro fundido vermicular com ferramentas de cerâmica no processo de corte contínuo (REUTER, 2000 citado por XAVIER 2003).

### 2.3.5 Efeito das variáveis metalúrgicas na usinabilidade do ferro fundido vermicular

Para Reuter *et al* (2001), as principais variáveis envolvidas na usinabilidade do ferro fundido vermicular são: a forma da grafita, o tipo e a proporção de perlita, o efeito dos elementos químicos (Sb, Mn, Si, S, Ti, Cr) e o efeito das inclusões. Cada variável citada acima será abordada na seqüência.

### a) Efeito da forma da grafita

Nos ferros fundidos, o tamanho, a forma e a quantidade de grafita são geralmente mais significativos do que a sua composição. A variação da grafita da forma lamelar para a vermicular faz com que se altere a forma de ruptura do cavaco, passando de frágil para dúctil.

A morfologia das grafitas do ferro fundido vermicular não permite a clivagem e nem a propagação de trincas, como pode ser visto na **Figura 2-22**. Lämpic e Henkel atribuem parte do maior desgaste da ferramenta na usinagem do ferro fundido vermicular à integração da grafita na matriz metálica, de modo a promover maior resistência mecânica e maior tenacidade do material (REUTER *et al*, 2001).

Durante a usinagem, o cavaco do ferro fundido vermicular tende a ficar mais em contato com a ferramenta do que o cinzento. Dessa maneira, aliado ao coeficiente de atrito do ferro fundido vermicular e sua menor condutividade térmica, tende a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte, sendo essa alguns graus acima do cinzento (REUTER *et al*, 2001).

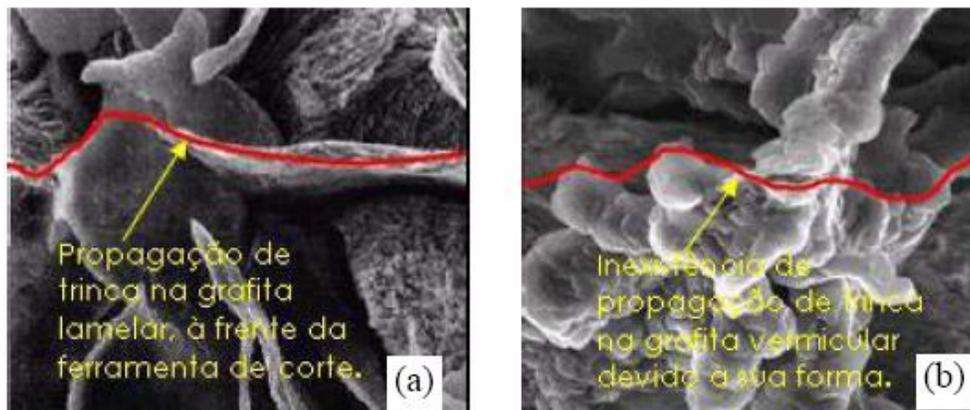


Figura 2-22 a) Propagação da trinca na grafita lamelar do ferro cinzento; b) Dificuldade na propagação da trinca na grafita vermicular devido sua forma (GEORGIU, 2002; ANDRADE, 2005).

Reuter *et al* (2001), utilizando o processo de torneamento com ferramentas de corte de PCBN em velocidade de corte de 800 m/min, verificaram a influência que o aumento da quantidade de grafita vermicular tem sobre a vida da ferramenta de corte. Também foi observada a influência da grafita nodular na vida da ferramenta de corte quando comparada à usinagem da grafita na forma lamelar. O resultado está representado na **Figura 2-23**.

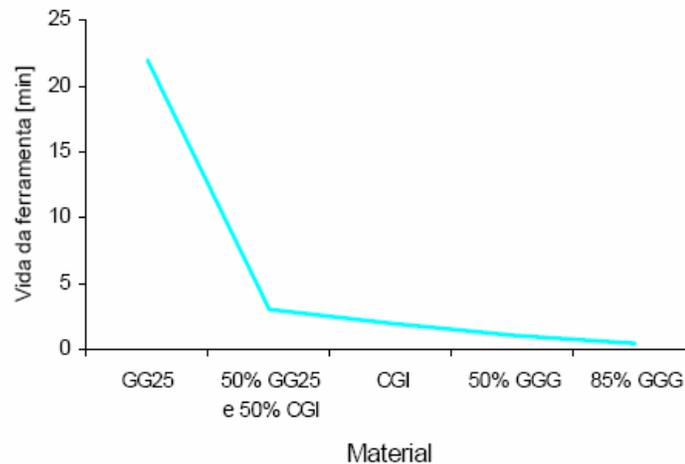


Figura 2-23 Influência da grafita na vida da ferramenta de PCBN (REUTER *et al*, 2001).

A diminuição mais significativa na vida da ferramenta ocorre entre a faixa de 100% de grafita lamelar do ferro fundido cinzento e a faixa de 50% de lamelar mais 50% de vermicular. À primeira vista, não há muita diferença entre o ferro fundido vermicular e a alta nodularidade, mas a vida da ferramenta para a nodularidade de 5%, no caso do vermicular, é 40% mais alta do que para uma nodularidade de 50% e 3.5 vezes maior do que para a nodularidade de 85%. Pode-se concluir, assim, que o ferro fundido vermicular é mais difícil de usinar do que o ferro fundido cinzento e que o esforço para manter a grafita nodular na faixa de 0-20%, de acordo com a norma ASTM 842-85, contribui significativamente para aumentar a vida da ferramenta de corte (REUTER *et al*, 2001).

### b) Influência da perlita

Os ferros fundidos são formados por partículas de grafita em uma matriz de ferrita e/ou perlita, que durante a solidificação o material passa por uma faixa de temperatura na qual se encontra sob a forma de austenita. Abaixo de 725° C o material se transforma em ferrita ou perlita. Se a velocidade de resfriamento for lenta o suficiente e as condições químicas favoráveis, os átomos de carbono presentes na austenita migram para formar partículas de grafita, pelo processo de difusão. Entretanto, se os átomos não conseguirem sair da matriz, ocorrerá à formação de perlita, sendo esta constituída por uma estrutura lamelar alternada entre ferrita e cementita ( $Fe_3C$ ). Essas lamelas de  $Fe_3C$  reforçam a matriz, tornando-a mais dura e resistente (REUTER *et al*, 2001).

Para um ferro fundido vermicular típico com 10% de nodularidade, o efeito do aumento da perlita vai influenciar nas propriedades mecânicas do vermicular, aumentando a resistência mecânica e diminuindo o alongamento, descritos na **Figura 2-24**.

O efeito da perlita na usinabilidade deve ser visto de duas maneiras: um é considerando o tipo de perlita existente na matriz metálica, que, de acordo com o diagrama ferro-carbono, a fração em volume de ferrita e  $Fe_3C$  na perlita é de 88% e 12%, respectivamente. Na prática, o comportamento da liga é um pouco diferente, pois a adição de silício e a presença de núcleos da inoculação promovem o crescimento das partículas de grafita durante a solidificação. Por outro lado, elementos como manganês, cobre e estanho, que atuam como barreiras de difusão evitando que o carbono se deposite sobre as partículas de grafita em crescimento. A velocidade de resfriamento do material no momento que deixa a fase de austenita, na temperatura de 725° C, também contribui para determinar um maior ou menor crescimento da grafita. Levando em conta esses fatores mencionados acima, a proporção de  $Fe_3C$  na perlita situa-se na faixa de 8% a 15%. Dependendo do tempo de resfriamento, a perlita pode ficar mais fina ou mais grossa, sendo que, quanto mais grossas forem as lamelas de  $Fe_3C$  mais grossa será a perlita (DAWSON *et al*, 1999 citado por MOCELLIN, 2002; REUTER *et al*, 2001).

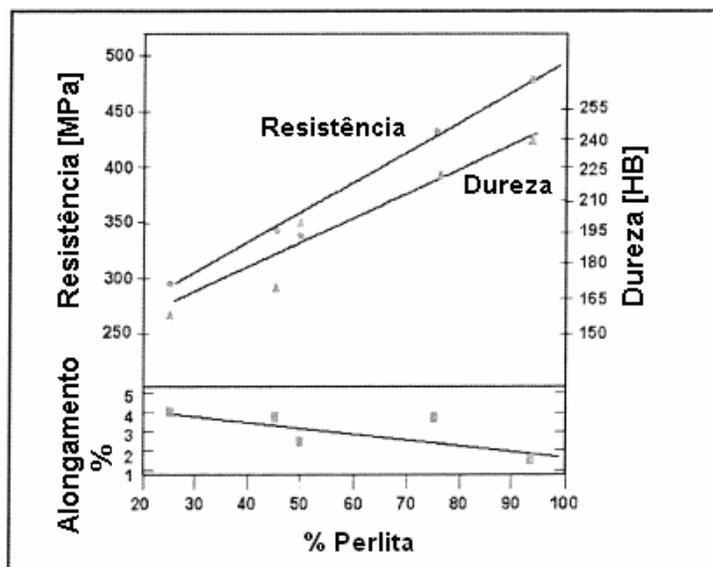


Figura 2-24 Influência do aumento da porcentagem de perlita na matriz metálica nas propriedades do ferro fundido vermicular com 0-10% de nodularidade (DAWSON, 1999).

Bates (1996), efetuou alguns estudos para verificar a relação entre o teor de  $Fe_3C$  na perlita com a usinabilidade de ferros fundidos nodulares e cinzentos. Nos ensaios de furação, torneamento e fresamento, foi percebido que a vida das ferramentas decresce com o aumento da  $Fe_3C$  na perlita, como mostrado na **Figura 2-25**.

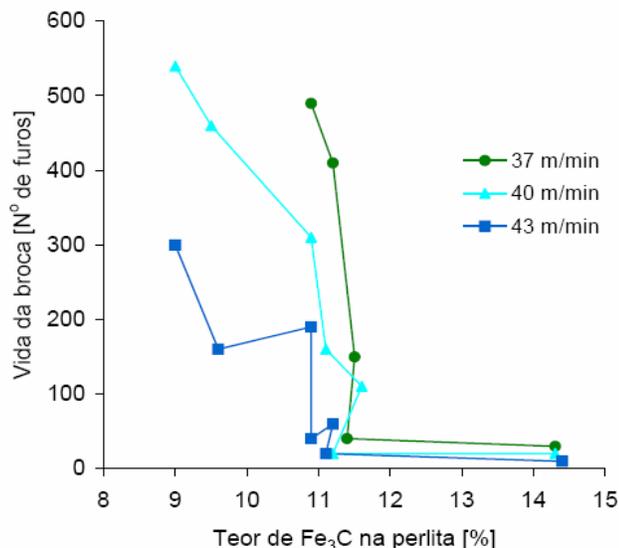


Figura 2-25 Redução na vida de brocas com o aumento da quantidade de Fe<sub>3</sub>C na perlita (BATES, 1996).

A segunda maneira de verificar a influência da perlita é pela proporção de perlita e de ferrita. A razão perlita / ferrita é um fator determinante na resistência mecânica do material. Um aumento de 15% para 95% de perlita no ferro fundido vermicular, mantendo as demais variáveis inalteradas, induz a um aumento de tensão limite de resistência de 300 MPa para 480 MPa refletido na usinagem.

Reuter *et al* (2001) realizaram ensaios de torneamento e fresamento em ligas de ferro fundido vermicular contendo baixos (50-60%), médios (70-80%) e altos (acima de 90%) teores de perlita. Os resultados são apresentados na **Figura 2-26**.

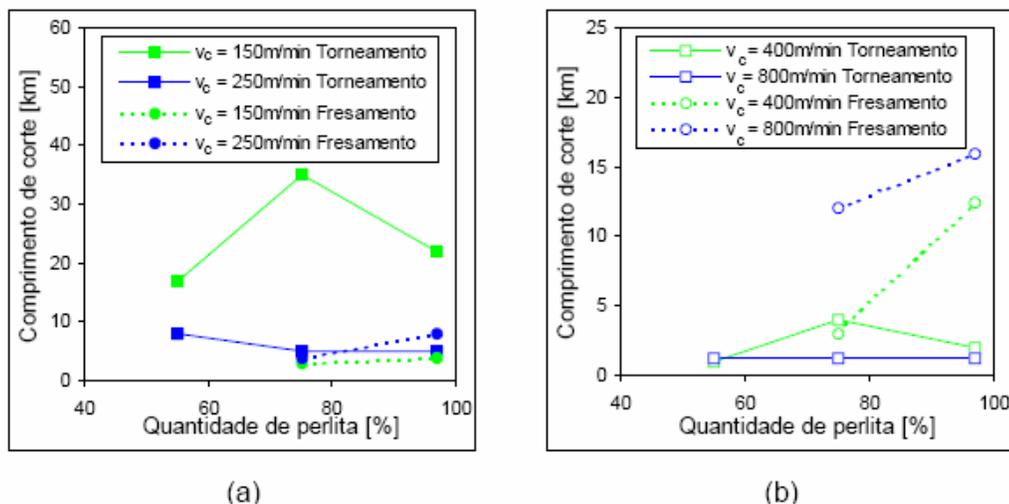


Figura 2-26 Vida das ferramentas de corte em função da quantidade de perlita/ferrita. a) ferramenta de metal-duro, b) ferramenta de CBN (REUTER *et al*, 2001; XAVIER, 2003).

Os resultados mostram que o aumento na quantidade de perlita, juntamente com a velocidade de corte, melhora o rendimento do processo de fresamento com ferramenta de CBN. A vida da ferramenta de metal-duro melhora de 2-3 vezes com um aumento de 70-80% para 95% de perlita, enquanto a ferramenta de CBN tem seu rendimento melhorado na faixa de 1,5-3 vezes. Para velocidades mais baixas principalmente no processo de torneamento, a vida das ferramentas se mostrou melhor para faixa de perlita de no máximo 75%. Dentro de uma faixa de 70-100% de perlita, nota-se que sua diminuição melhora o processo de torneamento, porém piora o processo de fresamento. Em função desse comportamento, fica difícil determinar uma quantidade de perlita em uma liga, pois a melhora na usinagem do ferro fundido vermicular em uma operação não pode ser a piora de outra (REUTER *et al*, 2001; XAVIER, 2003).

Normalmente o ferro fundido vermicular tem tendência a apresentar menor teor de ferrita que o ferro fundido cinzento por possuir menos teores de oxigênio e de enxofre do que o cinzento. Para isso, é preciso estabilizar a perlita através da adição de elementos como cobre (Cu), estanho (Sn) e antimônio (Sb) que formam uma barreira de difusão em torno das partículas de grafita, obstruindo a formação de perlita. Outro mecanismo também usado para estabilizar a perlita é pela adição de manganês (Mn) e cromo (Cr), que aumentam a solubilidade do carbono na austenita, auxiliando na formação de  $Fe_3C$  (REUTER *et al*, 2001).

O manganês é adicionado ao ferro fundido vermicular com a finalidade de unir-se ao enxofre (MnS) para evitar perdas de propriedades mecânicas causadas pelo enxofre livre. É adicionado na proporção de 0,35% a 0,45%, sendo que, na presença de cobre e estanho, a adição de manganês em níveis maiores, na faixa de 0,90%, forma um ferro fundido 100% perlítico (REUTER *et al*, 2001).

Já o antimônio tem um poder mil vezes maior que o cobre e é semelhante ao TiN (nitreto de titânio) em termos de estabilizar a perlita. A adição de apenas 0,1% de antimônio é suficiente para estabilizar por completo a matriz perlítica, em especial na presença de cobre, TiN e manganês. A fim de avaliar o efeito desses elementos perlitizantes, Reuter *et al* (2001) produziram algumas ligas de ferro fundido vermicular e as testaram em torneamento com ferramentas de metal-duro e CBN. Os resultados são apresentados na **Figura 2-27**.

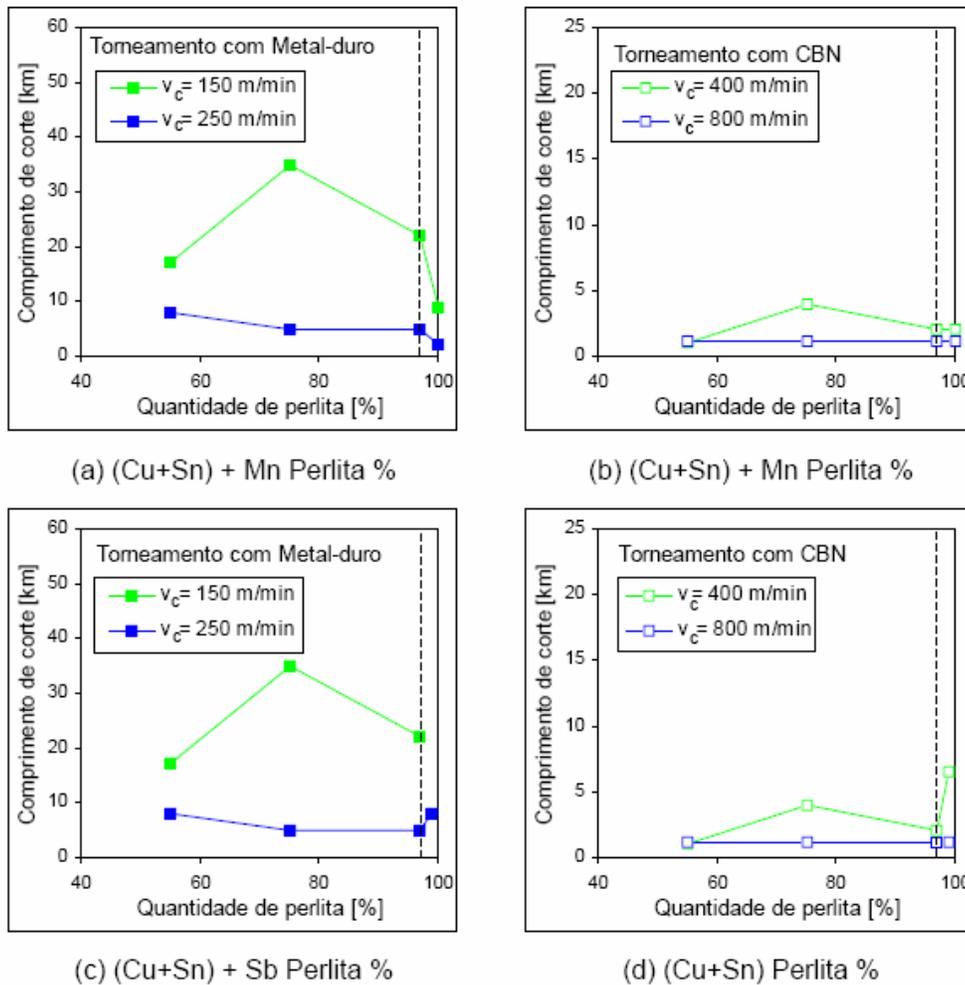


Figura 2-27 Efeito da adição de elementos perlitizantes na usinagem de vermicular com ferramentas de metal-duro e CBN (REUTER *et al*, 2001).

Analisando os dados, observa-se que a ferramenta de metal-duro teve uma redução de 50% na vida quando comparado o material contendo 100% perlita com o de 97,5% de perlita. Essa diferença é atribuída não à variação de 2,5% de perlita, mas sim aos efeitos dos elementos perlitizantes na composição da cementita e na microdureza da ferrita (REUTER *et al*, 2001).

Para as ligas com antimônio e 100% de perlita, houve um aumento na vida das ferramentas de metal-duro na velocidade de 250 m/min e de CBN na velocidade de 400 m/min que foi associado ao excesso na adição de antimônio ou de manganês. Tal fato foi estudado e o aumento na usinabilidade pode ter sido causado pela degeneração das partículas de grafita, ao invés do aumento na quantidade de perlita. Isso pode ser visto na **Figura 2-28**.

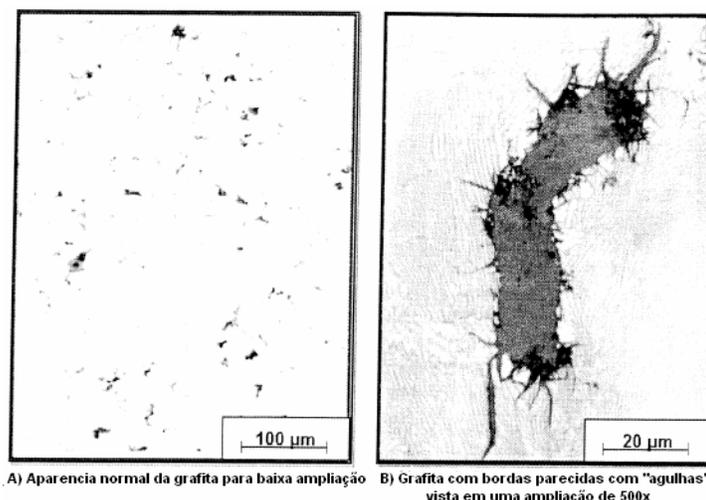


Figura 2-28 Efeito do antimônio na formação da grafita no ferro fundido vermicular. (REUTER *et al*, 2001).

Em uma ampliação de 100X a matriz do ferro fundido vermicular com antimônio na estrutura, parece normal, mas quando visto a 500x, é possível ver o que o autor chama de “*spikes*”, uma grafita com bordas “agulhadas”. São fendas que aparecem pela barreira de difusão entre a liga com antimônio e átomos de carbono, atacando a grafita e havendo o crescimento desses pontos de contato, resultando na formação dessa grafita agulhada (*graphite spikes*). Testes subseqüentes mostraram que as ligas de ferro fundido com antimônio tinham resistência mecânica na faixa entre 421 e 465 MPa, o que é abaixo do esperado para uma liga com 100% de perlita que deveria ter uma resistência entre 500 e 525 MPa. Testes de fadiga apontam que as ligas com variação de antimônio tiveram uma diminuição no limite de resistência à fadiga de 6% em relação a um ferro fundido vermicular perlítico convencional. Essa diminuição nas propriedades mecânicas do vermicular não é significativa, observando-se que as ligas com antimônio aumentaram à vida das ferramentas de corte (REUTER *et al*, 2001).

### c) Efeito do enxofre

O enxofre, juntamente com o manganês, forma o sulfeto de manganês (MnS), que nos ferros fundidos cinzentos forma uma camada protetora sobre a superfície do material, evitando a corrosão e a difusão, além de atuar como lubrificante da ferramenta de corte durante a usinagem do material (GASTEL *et al*, 2000; REUTER *et al*, 2001). Em seu trabalho, Pereira *et al* (2006), como citados anteriormente, avaliaram a influência da variação do teor de enxofre na microestrutura e nas propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento.

Foram realizados ensaios de torneamento longitudinal externo, sendo testado o ferro fundido com quatro teores de enxofre: 0,065%, 0,12% (padrão de produção), 0,15% e 0,18%, representados na **Figura 2-29**, e velocidades de corte de 100, 150 e 200 m/min.

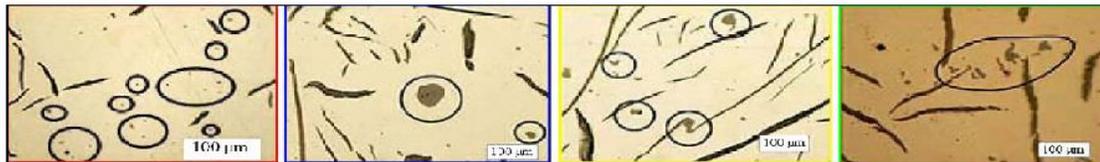


Figura 2-29 Ferro fundido cinzento com variação do teor de enxofre de 0,065%, 0,12%, 0,15% e 0,18%, respectivamente (PEREIRA *et al*, 2006).

Na usinagem da liga com 0,65 % de enxofre, apresentou-se uma intensa adesão na ferramenta. Na velocidade de 100 m/min, a usinabilidade do ferro fundido com 0,12% e 0,18% de enxofre não teve diferença significativa, e nas velocidades de 150 e 200 m/min a usinabilidade da liga com 0,12%, 0,15% e 0,18% não difere significativamente. Segundo a autora, para uma efetiva diminuição do desgaste por adesão, deve-se ter uma quantidade mínima da matriz metálica ocupada por inclusão de sulfeto de manganês, em torno de  $(18 \pm 6) \times 10^{-3}$ . O efeito do sulfeto de manganês é maior na usinagem do ferro fundido cinzento em altas velocidades de corte (PEREIRA *et al*, 2006).

Já nos ferros fundidos vermiculares, a camada protetora de sulfeto de manganês não ocorre devido à porcentagem de enxofre ser dez vezes menor do que nos ferros fundidos cinzentos, por volta de 0,01%, e que normalmente combina com o magnésio um elemento nodularizante e forte formador de sulfetos, não havendo quantidades remanescentes para a formação de MnS (REUTER *et al*, 2001). A diferença entre o ferro fundido cinzento e o vermicular pode ser verificada na **Figura 2-30**, na qual, na usinagem com ferramenta de CBN com velocidade de corte de 800 m/min, há a formação da camada de sulfeto de manganês no cinzento, enquanto no vermicular ocorre um forte desgaste na ferramenta (REUTER *et al*, 2001; GASTEL *et al*, 2000).

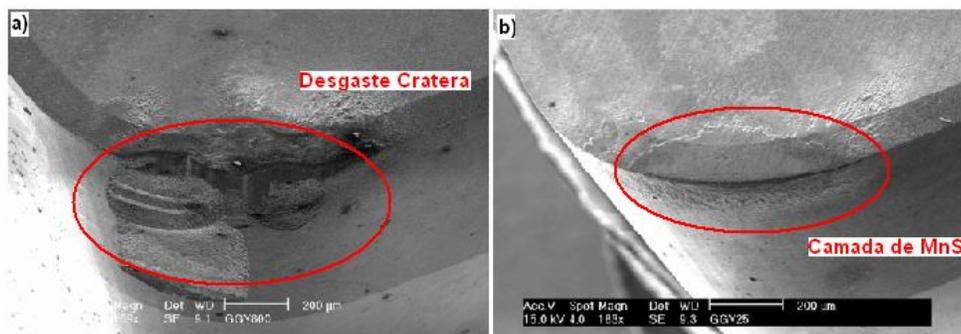


Figura 2-30 Camada de sulfeto de manganês na ferramenta de CBN: a) Usinagem de vermicular; b) usinagem de cinzento (Adaptada REUTER *et al*, 2001, e GASTEL *et al*, 2000).

#### d) Efeito do silício

O silício é um elemento formador de ferrita que está presente nos ferros fundidos vermiculares numa percentagem de 2,0 a 2,4%, juntamente com elementos perlitizantes que permitem formar uma quantidade desejada de perlita. Caso ocorra uma diminuição dos elementos perlitizantes na liga e o silício seja aumentado para 3,0%, o ferro fundido vermicular terá uma matriz totalmente ferrítica, pois a quantidade elevada de silício tende a endurecer a ferrita, fazendo com que o material atinja elevados valores de dureza e resistência semelhantes ao do ferro fundido vermicular perlítico (REUTER *et al*, 2001).

Reuter *et al* (2001) realizaram uma série de testes de torneamento para identificar a influência da variação da percentagem de silício na usinabilidade do ferro fundido vermicular. Os resultados são exibidos na **Figura 2-31**.

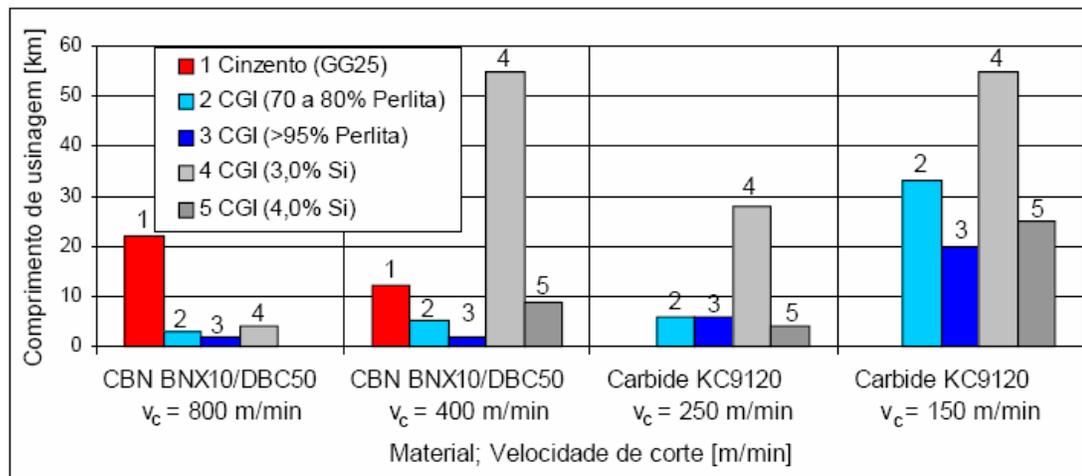


Figura 2-31 Efeito do silício na usinagem de vermicular (Modificado REUTER *et al*, 2001).

Os resultados indicaram que, com a adição de 3,0% de silício, a usinabilidade do vermicular é melhorada, mas, em contrapartida, a sua dureza e resistência mecânica são afetadas, o que impossibilita o seu uso na fabricação de blocos de motores. Já a liga contendo 4,0% de silício, a resistência mecânica ficou numa faixa satisfatória de 500 MPa, e como ponto negativo dos resultados foi a redução na usinabilidade e a perda de 15% na condutividade térmica.

#### e) Efeito do cromo

Introduzido no ferro através da sucata de aço ou intencionalmente como liga para obtenção de maior resistência a altas temperaturas, o cromo precipita formando carbonetos, tais como cementita ( $Fe_3C$ ) e carboneto de cromo ( $Cr_3C$ ), sobretudo nas últimas regiões em

solidificação (REUTER et al, 2001). O cromo também é adicionado à liga para aumentar a resistência à tração sob elevadas temperaturas. Além disso, o cromo é um forte perlitizante, quando comparado ao manganês, pois o aumento do seu teor provoca a formação da perlita fina, ou seja, um aumento da quantidade de cementita que é de difícil usinabilidade (REUTER et al, 2001).

Reuter et al (2001) afirmaram ainda que a redução de 0,18 para 0,10% do teor de Cr no ferro fundido vermicular pode propiciar um aumento de aproximadamente 40% da vida da ferramenta. Como o vermicular é mais difícil de usar do que o ferro fundido cinzento, a prevenção do coquilhamento e da precipitação de carbonetos no ferro fundido vermicular é mais crítica. Dessa forma, os níveis de cromo devem ser restringidos a uma faixa de 0,08% para otimizar a usinabilidade do ferro fundido vermicular.

#### **f) Efeito do titânio**

O titânio pode estar presente na liga de ferro fundido vermicular 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 no ferro fundido vermicular. Geralmente quando adicionado para essa função, a porcentagem de titânio presente na liga está entre 0,10 – 0,25%.

Comumente o titânio aparece na liga advindo junto com a matéria-prima adicionada à liga fundida. Variando a quantidade de titânio na liga, ele pode reagir com o carbono e/ou com o nitrogênio presente no ferro fundido formando inclusões duras de carbonitretos de titânio. Conforme mostrado na **Figura 2-32**, essas inclusões podem formar grandes aglomerados de forma cúbica, os quais aumentam de forma significativa o desgaste das ferramentas de corte pelo processo de abrasão.

De acordo com Reuter *et al* (2001), o aumento na proporção de titânio de 0,01 para 0,02% é suficiente para reduzir a vida da ferramenta de corte em 50%. Já Guesser et al (2001) avaliaram a influência do titânio e concluíram que, para cada adição de 0,10% de titânio, há a formação de mais de 1000 inclusões de carbonitretos de titânio em uma área usinada de 1 mm<sup>2</sup>.

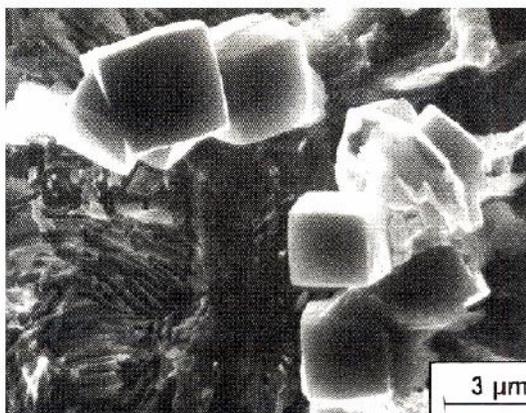


Figura 2-32 Inclusões de carbonitretos de titânio que aumentam o desgaste abrasivo na ferramenta de corte (REUTER *et al*, 2001).

### g) Efeito das inclusões

Metais fundidos normalmente apresentam inclusões não metálicas como óxidos, sulfetos ou complexos intermediários. Ensaios realizados buscaram melhorar a usinabilidade do ferro fundido vermicular através da transformação das inclusões de alta dureza em inclusões de menor dureza, para que pudessem aderir na superfície da ferramenta, protegendo-a dos mecanismos de desgaste. Isso gerou inclusões com durezas menores, mas seu efeito benéfico sobre a qualidade da liga foi insignificante frente à maior dificuldade de fabricação do ferro fundido vermicular. Outros ensaios procuraram gerar inclusões que pudessem se depositar na superfície da ferramenta protegendo-a. O resultado desses ensaios para ferro fundido cinzento pode ser visto na **Figura 2-33**.

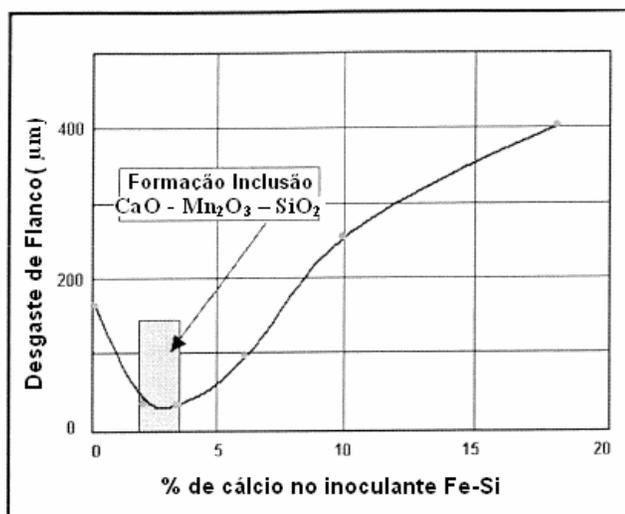


Figura 2-33 Adição de cálcio no inoculante diminui o desgaste nas ferramentas de corte (REUTER *et al*, 2001).

Em materiais como o ferro fundido cinzento que possui um comportamento frágil, o contato com o flanco da ferramenta é intermitente, existindo intervalos de tempo em que não existe um contato abrasivo sobre a ferramenta. Durante esse período, as inclusões que entram em contato com a ferramenta aderem fortemente sobre ela antes do próximo contato abrasivo, gerando assim uma camada protetora. No caso do ferro fundido vermicular, por seu comportamento mais dúctil do que no ferro fundido cinzento, o tempo sem contato da ferramenta é reduzido, não permitindo a aderência das inclusões, devido ao constante contato abrasivo (REUTER *et al*, 2001).

### 2.3.6 Influência da nodularização da grafita no ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular inclui invariavelmente algumas partículas (esferoidais) de grafita nodular. Aumentando-se a nodularidade, aumenta-se também a força e a rigidez, diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica. É comum se usar um limite de nodularidade de 20% para especificações de ferro fundido vermicular utilizado na fabricação de blocos e cabeçotes de motor (GUESSER, DURAN, KRAUSE, 2004; GUESSER, 2003; DAWSON *et al*, 2004). A **Figura 2-34** e a **Tabela 2-3** destacam a influência da nodularização da grafita nas propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular.

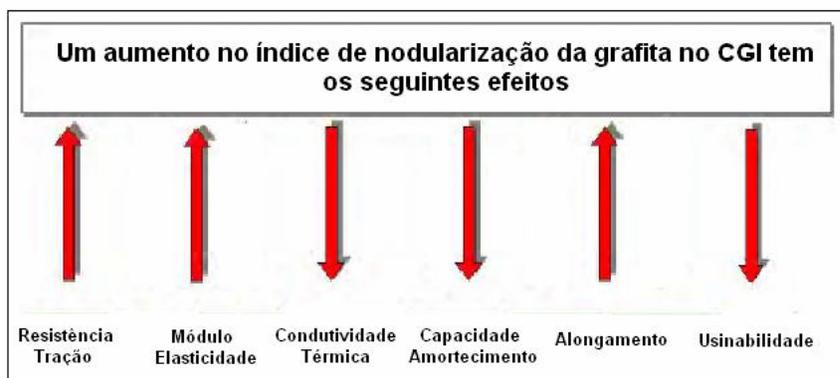


Figura 2-34 Influência da nodularidade nas propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular (Modificada de ECOB, HARTUNG, 2004).

Tabela 2-3 Variação das propriedades mecânicas do vermicular em função da nodularidade (Modificada de SINTERCAST, 2001).

Propriedades (25°C)	Nodularidade %				
	10	30	50	70	90
Resistência tração (MPa)	450	520	590	640	700
Resist Escoamento 0,2% (MPa)	370	390	410	440	490
Limite de Fadiga (MPa)	210	220	230	240	255
Módulo de Elasticidade (GPa)	145	150	155	155	160
Alongamento (%)	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6
Expansão Térmica ( $\mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$ )	11.0	11.0	11.0	11.5	12.0
Condutividade Térmica ( $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ )	36	33	31	30	28

No ferro fundido vermicular, a nodularidade elevada diminui a condutividade térmica, quando as temperaturas crescentes tiverem pouco efeito em tal propriedade, além de aumentar bastante a resistência à tração (DAWSON *et al*, 1994; GUESSER *et al*, 2005). A **Figura 2-35** e a **Figura 2-36** mostram de forma gráfica as mudanças que ocorrem nas propriedades do ferro fundido vermicular com a variação da nodularização da grafita.

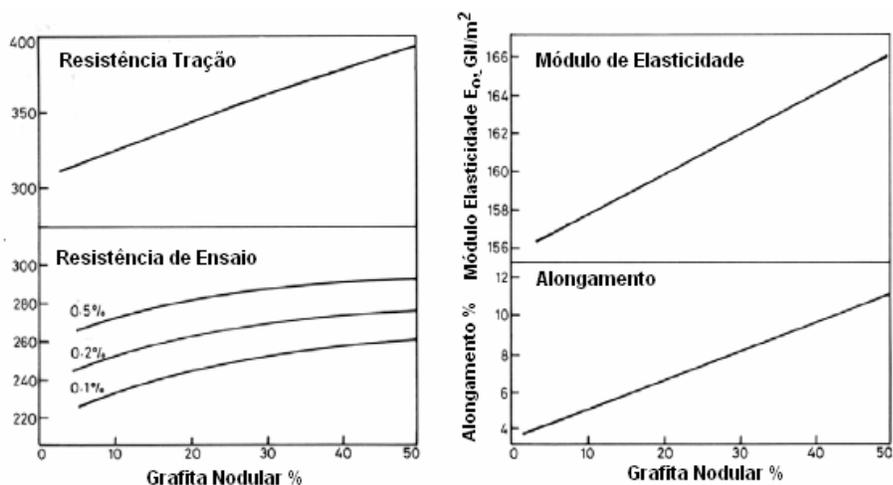


Figura 2-35 Variação das propriedades mecânicas do vermicular em função da nodularização (SERGEANT & EVANS do BCIRA, 1978).

A especificação da nodularidade deve conseqüentemente ser escolhida dependendo das exigências da produção e das condições do desempenho do produto. Por exemplo, a produção dos coletores de escape de ferro fundido vermicular é especificada tipicamente com nódulos de até 50%.

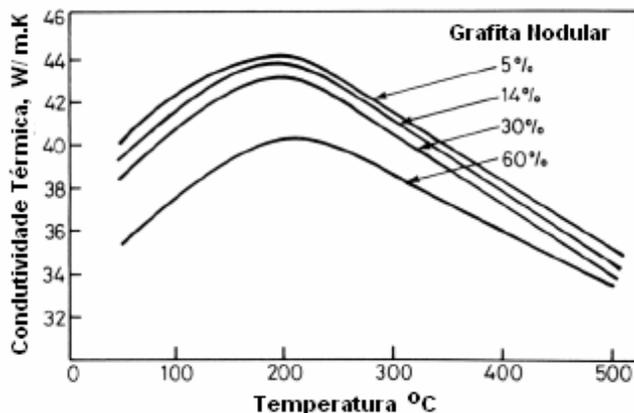


Figura 2-36 Influência da nodularização da grafita na condutividade térmica do ferro fundido vermicular (Sergeant & Evans do BCIRA, 1978).

Para os coletores, a nodularização mais elevada fornece maior resistência para aumentar o suporte do sistema de exaustão e facilitar também o fluxo do calor da exaustão no catalisador para conseguir a expulsão mais rápida. A nodularização mais elevada beneficia o produto sem

aumentar a incidência de defeitos da carcaça ou danificar a usinabilidade. Em outro exemplo, a empresa Daimler Chrysler enfatizou que a ductilidade fornecida pela microestrutura com até 50% de nódulos reduziu os defeitos de rachaduras nas bases de assentamento dos motores. Nesse caso, a nodularização mais elevada é aceitável porque a usinagem é limitada ao fresamento, furação curta e o produto não é carregado termicamente (DAWSON *et al*, 2004). Já em blocos e cabeçotes de motores, que combinam carregamentos térmicos e mecânicos e a usinagem é mais extensiva, se necessita um controle maior da microestrutura, requerendo uma nodularidade dentro de uma faixa de 0-20% (GUESSER *et al*, 2001; DAWSON, 2001).

### 2.3.7 Novas concepções de ferramentas na usinagem de ferro fundido vermicular

O estudo das variáveis metalúrgicas mostra que é possível se ter um bom controle da microestrutura de grafita, contribuindo para o sucesso da usinagem do ferro fundido vermicular. Entretanto, esses parâmetros não podem resolver os problemas associados ao mandrilamento em altas velocidades de corte dos cilindros de um bloco de motor. Dessa forma, tem-se estudado o desenvolvimento de novas concepções de ferramentas, e dentre elas destacam-se as ferramentas de mandrilar com múltiplos insertos e as ferramentas com insertos rotativos. Em virtude dos bons resultados na usinagem do ferro fundido vermicular com insertos de metal-duro, muitos fabricantes propuseram o mandrilamento de cilindros com ferramentas contendo insertos múltiplos de metal-duro. Os resultados obtidos mostraram uma remoção de 2-3 mm de material durante mandrilamento de desbaste com um ciclo de processo menor do que 14 segundos. Alguns exemplos de ferramentas com múltiplos insertos são mostrados na **Figura 2-37**.

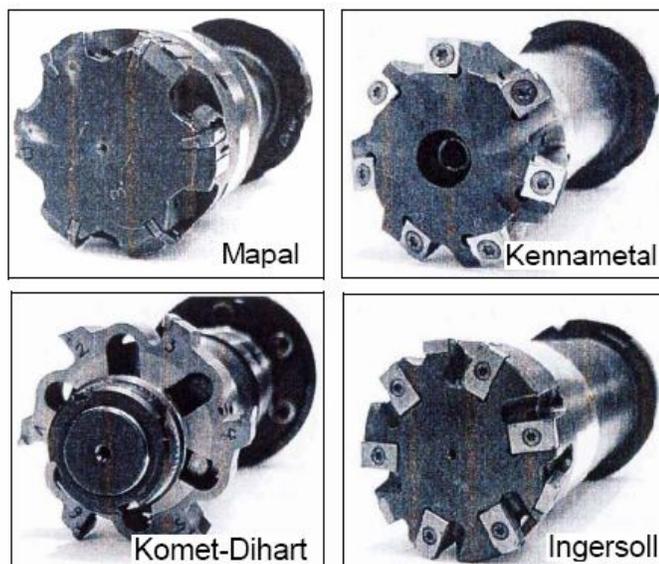


Figura 2-37 Ferramentas de mandrilar com múltiplos insertos de diferentes fabricantes (REUTER *et al*, 2001; REUTER *et al*, 1999c).

Com o aperfeiçoamento das ferramentas utilizando vários insertos, pode-se trabalhar 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*, 1999c). O fator negativo é que, para o uso dessas ferramentas, as máquinas devem possuir um elevado torque para poder realizar a operação (KRUYNSKI, 2002, citado por XAVIER, 2003).

Outro conceito que vem sendo aperfeiçoado são as ferramentas com insertos rotativos, desenvolvidas pela empresa *Rotary Technologies Corporation*. Normalmente os insertos são de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), mas ultimamente insertos de metal-duro também vêm sendo usados para a usinagem de CGI em altas velocidades de corte. Os insertos no referido tipo de ferramenta são circulares e com liberdade para rotacionarem em seus próprios eixos (DZIERWA, 2003; VACCARI, 2000, ROTARY TECH, 2006). A geometria e a disposição dos insertos rotativos nesse tipo de ferramenta de corte podem ser visualizados na **Figura 2-38**.

Tal conceito facilita o corte e tem como vantagem a mudança contínua do gume, onde o corte passa de contínuo para intermitente com sucessiva refrigeração da zona de corte, sendo a maior parte do calor transmitida pelo cavaco (AMAREGO, 1993, citado por XAVIER, 2003; GEORGIU, 2003).

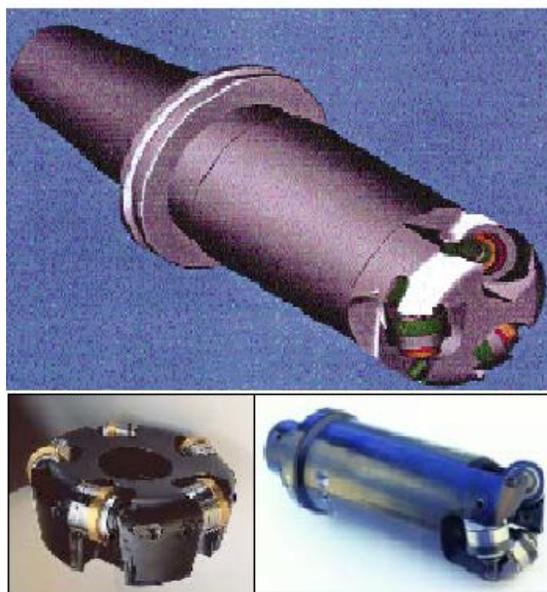


Figura 2-38 Ferramentas com insertos rotativos fabricadas pela *Rotary Technologies Corporation* (VACCARI, 2000; DZIERWA, 2003).

Essas ferramentas em operações de mandrilamento de cilindros possibilitam o uso de velocidades de corte na faixa de 600 m/min e avanços de até 2500m/min para desbaste e de 800 m/min de velocidade e avanço de 1700 m/min para acabamento (REUTER *et al*, 1999c).

Comforme Georgiou, 2002, citado por Xavier (2003) e Rotary Tech (2006), as vantagens dessas ferramentas são: menor temperatura, menor força de corte e potência de máquina, melhor acabamento das superfícies e aumento da vida da ferramenta de corte em função da distribuição do desgaste abrasivo em toda a circunferência do inserto. Como desvantagem pode ser citada a redução no diâmetro dos cilindros em decorrência do desgaste da ferramenta de corte.

## 2.4 Processo de torneamento

O torneamento é um tipo de processo convencional de usinagem que utiliza ferramentas com geometria definida, e pode ser definido como sendo um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas mono cortantes. Para isso, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea ou curvilínea com o referido eixo. A **Figura 2-39** mostra os principais componentes de uma operação de torneamento (FERRARESI, 1977 citado por SOUZA, 2004).

No torneamento, a ferramenta penetra na peça, cujo movimento rotativo ao redor de seu eixo permite o corte contínuo e regular do material. A força necessária para retirar o cavaco é feita sobre a peça, enquanto a ferramenta firmemente presa no porta-ferramenta contrabalança a reação dessa força (ALVES, 2006).

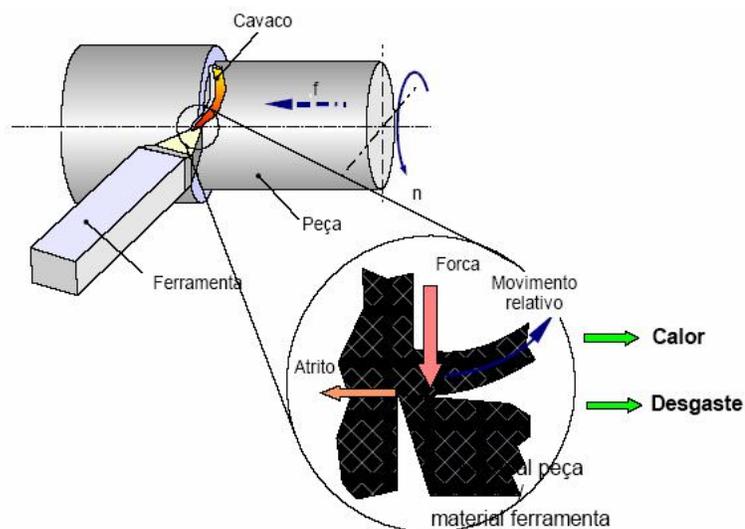


Figura 2-39 Representação da operação de torneamento (Modificada de SOUZA, 2004).

Para realizar o torneamento, são necessários três movimentos relativos entre a peça e a ferramenta. São eles:

- **Movimento de corte:** é o movimento principal que possibilita cortar o material. O movimento é rotativo e realizado pela peça;

- **Movimento de avanço:** é o movimento que desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça;
- **Movimento de penetração:** é o movimento que determina a profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça e assim regular a profundidade do passe e a espessura do cavaco. Esses movimentos podem ser observados na **Figura 2-40** (ALVES, 2006).

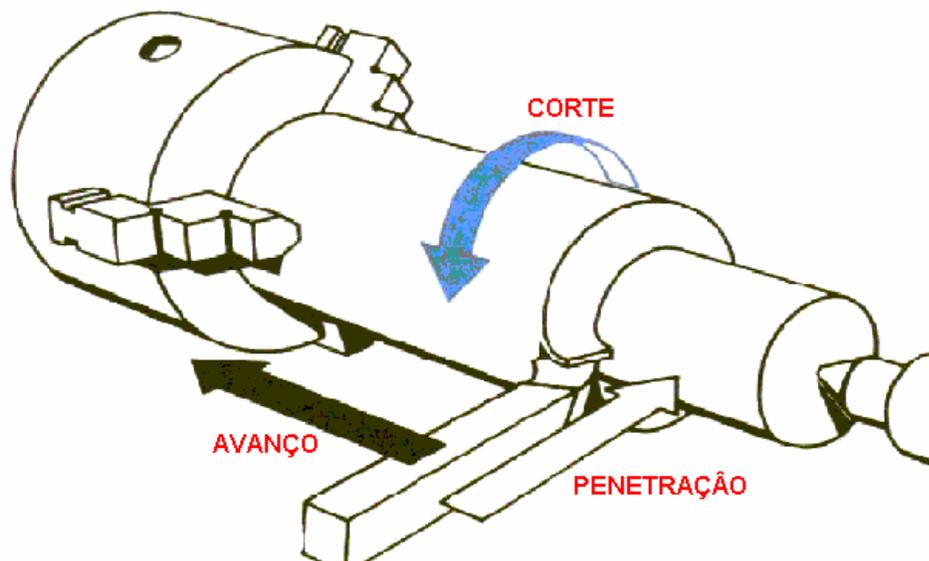


Figura 2-40 Movimentos relativos entre a peça e a ferramenta (ALVES, 2006).

Variando os movimentos, a posição e o formato da ferramenta, é possível realizar uma grande variedade de operações, sendo as principais o torneamento externo e o interno, que são exibidos na **Figura 2-41** (ALVES, 2006).

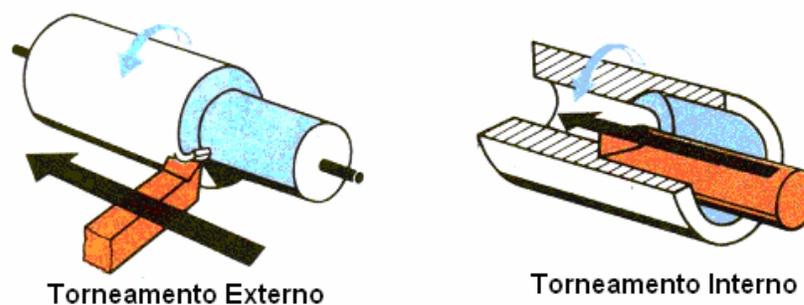


Figura 2-41 Principais operações de torneamento (ALVES, 2006).

Quanto à finalidade, a operação de torneamento pode ser dividida em operação de desbaste, anterior ao acabamento que visa obter na peça a forma e as dimensões próximas da final e a operação de acabamento que se destina à obtenção da peça nas dimensões finais especificadas no projeto (FERRARESI, 1977 citado por SOUZA, 2004).

### 2.4.1 Temperatura na interface ferramenta-peça

Na usinagem, praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica. Os centros de geração de calor no processo são a fratura e a deformação do cavaco na região de cisalhamento, o atrito entre a ferramenta e o cavaco e o atrito entre a ferramenta e a peça. O calor gerado é dissipado através do cavaco, da peça, da ferramenta e pelo fluido de corte. A **Figura 2-42** mostra o percentual do calor dissipado por cada um dos meios citados, sendo que a maior parte do calor (75 %) é transportada pelo cavaco (DINIZ *et al*, 1999; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

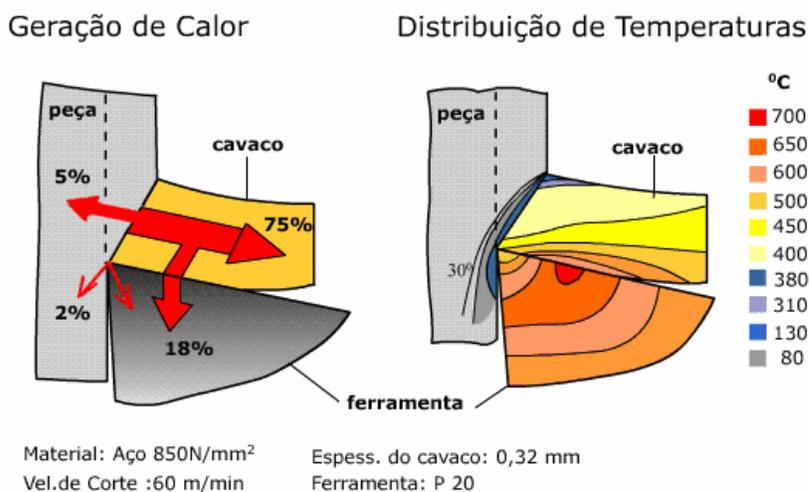


Figura 2-42 Distribuição da temperatura na interface ferramenta peça (CIMM, 2006).

A quantidade de calor gerada na usinagem aumenta com a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Esse aumento na temperatura acaba acelerando o desgaste na ferramenta de corte, e em consequência aumenta o coeficiente de atrito e a força de corte na usinagem (DINIZ *et al*, 1999).

No ferro fundido vermicular, por ter uma condutividade térmica menor que o ferro fundido cinzento, acaba ocorrendo um aumento na temperatura, sendo esse um dos causadores do fim de vida prematuro da ferramenta de corte.

## 2.5 Materiais para ferramentas de corte

A seleção de materiais para ferramentas de usinagem para uma determinada aplicação é um fator muito importante para o sucesso da fabricação. As ferramentas, durante a usinagem, estão sujeitas a: altas temperaturas, altas pressões de contato e atrito com o cavaco e a superfície já usinada da peça. Em função disso, a ferramenta deve apresentar as seguintes propriedades (STEMMER, 2005; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002):

- **Dureza:** principalmente em temperaturas elevadas para garantir resistência ao desgaste e resistência mecânica nas temperaturas de trabalho;
- **Tenacidade:** a ferramenta deve resistir a impactos e esforços cíclicos, comuns nas operações de usinagem;
- **Resistência ao desgaste:** especialmente ao desgaste por abrasão, isto é, resistência ao atrito, para garantir uma durabilidade compatível com o processo;
- **Estabilidade química:** para que o material da ferramenta não reaja com o material da peça ou contamine-o, através do desgaste por difusão.

Na **Figura 2-43** são mostrados os principais materiais utilizados para ferramentas de corte e suas tendências quanto à dureza, resistência à flexão, resistência ao desgaste, velocidade de corte e tenacidade.

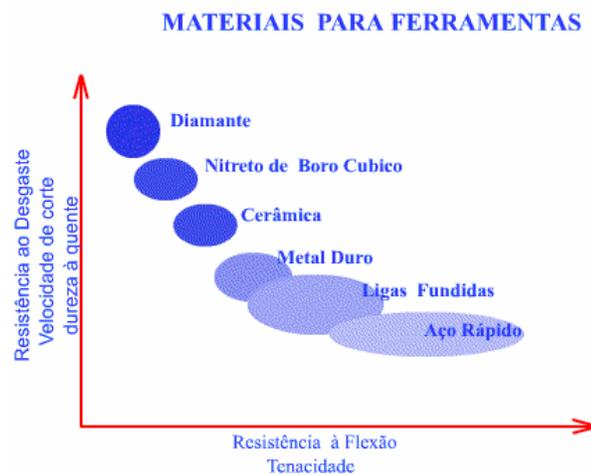


Figura 2-43 Propriedades das ferramentas de corte (CIMM, 2006).

Segundo Diniz *et al* (1999), para a seleção criteriosa do material da ferramenta, deve-se levar em conta uma série de fatores, além das propriedades que já foram citadas anteriormente. Dentre esses fatores, destacam-se:

- **Material a ser usinado:** a composição química e as propriedades do material a ser usinado influenciam, entre outras coisas, a solicitação sobre a ferramenta, o tipo de desgaste ao qual ela será exposta e o tipo de cavaco resultante do processo de usinagem;
- **Processo de usinagem:** alguns processos de usinagem são mais agressivos à ferramenta do que outros, expondo-a a desgastes mais elevados, choques (térmicos ou mecânicos), ou ainda à ação de fadiga. Ademais, alguns processos apresentam limitação quanto à forma, dimensões e velocidade de corte passível de ser obtida. Exemplos típicos são as operações de fresamento e furação com ferramentas de pequeno diâmetro, pois, como grande parte das máquinas não possui rotação suficiente

para atingir as altas velocidades de corte usadas na usinagem com metal-duro, é preciso o uso de ferramentas compostas de materiais, como o aço rápido.

- **Condição da máquina ferramenta:** diversos fatores relacionados à máquina e suas condições de conservação e funcionamento demandam cuidado na escolha da ferramenta de corte. A potência da máquina, rotação máxima e seu estado de conservação (ocorrência de vibrações, folgas) são fatores importantes. No caso de uma máquina sujeita a desbalanceamento, com baixa rotação e potência e onde se verifique folgas, se faz necessário o uso de ferramentas com maior tenacidade e que trabalhem a baixas velocidades de corte.
- **Custo do material da ferramenta:** a relação custo-benefício é um item importante a ser considerado na indústria moderna. Embora alguns novos materiais apresentem vida de ferramenta ou produtividade superior, muitas vezes não têm uma relação custo/benefício razoável.
- **Condições de usinagem:** a condição imposta ao processo através de seus parâmetros é um fator relevante a ser considerado na escolha da ferramenta. Operações de acabamento necessitam de ferramentas com elevada resistência ao desgaste. Já condições de desbaste necessitam de ferramentas com elevada tenacidade, em detrimento da resistência ao desgaste.

Na usinagem de ferros fundidos, pode ser utilizada uma grande variedade de materiais para ferramentas de corte. Dentre eles, os que se destacam com resultados de tempo de vida de ferramenta superiores são: os metais-duros, as cerâmicas e o CBN, sendo dada maior ênfase aos metais-duros revestidos e às cerâmicas.

Assim, a revisão bibliográfica será focada nestes últimos dois tipos de materiais utilizados para a realização dos ensaios na presente pesquisa.

### 2.5.1 Ferramentas de metal-duro

O metal-duro é o material de ferramenta mais largamente utilizado na indústria, sendo que a indústria automobilística consome cerca de 50% das ferramentas produzidas no mundo. Esse material apresenta melhor relação custo/benefício devido à grande variedade de tipos e possibilita a utilização de insertos intercambiáveis, tornando-se uma ferramenta versátil (WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

As ferramentas de metal-duro são compostas basicamente de carboneto de tungstênio e cobalto (**Figura 2-44**), e seu processo de fabricação é pela metalurgia do pó, que garante boa precisão dimensional das ferramentas. As ferramentas de metal-duro produzidas inicialmente, contendo apenas WC e Co, obtiveram resultados excelentes na usinagem, de ferro fundido

cinzento e materiais não ferrosos. Porém, na usinagem de aços, essa ferramenta apresentou baixa resistência à formação de cratera, devido ao forte atrito observado na superfície de saída, o que gerava altas temperaturas. Foram então adicionados novos elementos de liga às ferramentas de metal-duro. Dessa maneira, os componentes usados em metal-duro, conforme Stemmer, (2005) são:

- Carboneto de tungstênio (WC) – é solúvel no cobalto, o que gera ligações internas de alta resistência. Possui grande resistência ao desgaste, mas sua utilização na usinagem de aço é limitada em função da tendência de difusão de carbono, e de dissolução no cobalto e no ferro.
- Carboneto de titânio (TiC) – aumenta a resistência à difusão dos metais-duros. Em contrapartida, causa a queda da resistência das ligações internas, o que ocasiona a queda da resistência da ferramenta e fragiliza o material. Metais-duros com altos teores de TiC são usados na usinagem de aços com altas velocidades de corte.
- Carboneto de tântalo (TaC) – em pequenas porcentagens, restringe o tamanho de grão, aumentando a tenacidade e a resistência dos gumes dos metais-duros.
- Carboneto de nióbio (NbC) – possui efeito semelhante ao TaC. Ambos os carbonetos ocorrem no metal-duro na forma de Ta – (Nb) – C.

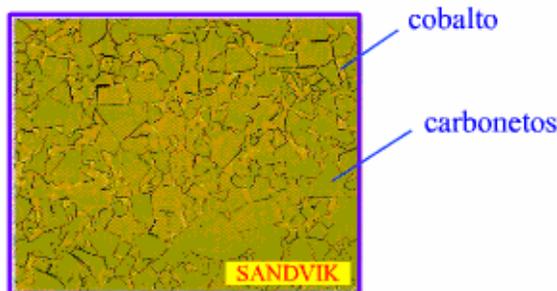


Figura 2-44 Ilustração da composição de uma ferramenta de metal-duro (CIMM, 2006).

A norma ISO 513/1975 classifica os metais-duros em 03 grupos, designados pelas letras P, M e K, e também por um código de cores (em ordem, azul, amarelo e vermelho). A classificação dentro de um grupo ou outro é feita de acordo com a aplicação do metal-duro, uma vez que a variedade de composições químicas e processos de fabricação torna difícil a padronização baseada em outras características (DINIZ *et al*, 1999; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

Para a usinagem de ferros fundidos, entre eles o ferro fundido vermicular, que apresentam cavacos mais curtos e que possuem maior resistência a quente, a classe de metal-duro mais recomendada é a do grupo K, constituída basicamente de WC e ligante Co, com pequenos

percentuais de carbonetos complexos. Em razão do alto teor de carboneto de tungstênio, esse grupo de metal-duro apresenta alta resistência à abrasão (WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

Com o objetivo de aprimorar as propriedades do metal-duro, foram desenvolvidas ferramentas de metal duro revestidas. Nessas ferramentas, aplica-se sobre o substrato de metal duro, com boa dureza e tenacidade, uma ou mais camadas de materiais que apresentem performance superior ao metal-duro em relação a alguma propriedade. A finalidade principal dessas camadas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, sendo que o núcleo permanece com as características do metal-duro mais simples (WC + Co) (DINIZ *et al*, 1999; STEMMER, 2005).

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

O CVD é o processo mais utilizado para a aplicação de revestimentos em metal-duro, pois permite uma boa difusão entre o revestimento e o substrato. É realizado em um forno com atmosfera protetora de hidrogênio, temperatura na faixa de 1000° C e pressão levemente negativa, o que facilita regular e controlar as camadas de revestimento depositadas sobre o substrato de metal-duro (STEMMER, 2005; DINIZ *et al*, 1999).

Os principais tipos de revestimentos utilizados atualmente na indústria são: TiN, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiCN, TiAlN. Cada um desses revestimentos tem características próprias como cor, dureza e aplicabilidade e serão apresentados a seguir:

**Carboneto de titânio (TiC):** Aplicado em camadas que variam de 4 a 8 µm, é geralmente a primeira (ou única) camada de revestimento, por possuir alta afinidade com o metal-duro, o que lhe garante uma boa adesão ao núcleo da ferramenta. Possui elevada dureza (3000 HV, a maior entre os materiais utilizados como cobertura), alta resistência ao desgaste por abrasão e baixa tendência de soldagem com o material da peça. Outra característica é um menor coeficiente de atrito e baixa condutividade térmica, que gera temperaturas mais baixas no gume da ferramenta, diminuindo a difusão (STEMMER, 2005; DINIZ, 1999; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

**Óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** Material de maior estabilidade química encontrado na natureza. Exatamente por isso, é usado como cobertura para garantir a estabilidade química do núcleo da ferramenta e evitar o desgaste causado pela difusão de átomos do material da peça para a ferramenta e vice-versa. Garante estabilidade térmica em temperaturas elevadas, possui alta resistência à abrasão, além da resistência à oxidação, diminuindo a formação do desgaste por cratera na ferramenta de corte. Possui elevada dureza, porém apresenta baixa resistência a choques térmicos e mecânicos (STEMMER, 2005; DINIZ *et al*, 1999).

**Nitreto de titânio (TiN):** Geralmente usado na camada externa de revestimento, conferindo à pastilha a coloração amarelada que, entre outras coisas, facilita a observação do desgaste. Reduz os esforços e temperaturas durante a usinagem, devido ao seu baixo coeficiente de atrito, além de ser mais estável quimicamente do que o TiC. A espessura da camada de TiN varia entre 5 e 7  $\mu\text{m}$  (STEMMER, 2005; DINIZ *et al*, 1999).

**Carbonitreto de titânio (TiCN):** Resistente ao desgaste de flanco como o TiC e estável quimicamente como o TiN, resistindo contra desgaste de cratera e oxidação. O TiCN apresenta também uma excelente adesão ao substrato da ferramenta de metal-duro.

**Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN):** Processo no qual, durante a deposição, alguns átomos de Ti são substituídos por átomos de Al. Essa mudança proporciona uma maior resistência à oxidação, resistência ao desgaste, maior estabilidade química, além de suportar a grandes solicitações térmicas na ferramenta (WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

A **Figura 2-45** representa uma ferramenta de metal-duro com revestimento em multicamadas. O uso desse tipo de revestimento possibilita a junção das características de cada revestimento, aumentando, dessa forma, a vida útil da ferramenta de corte.

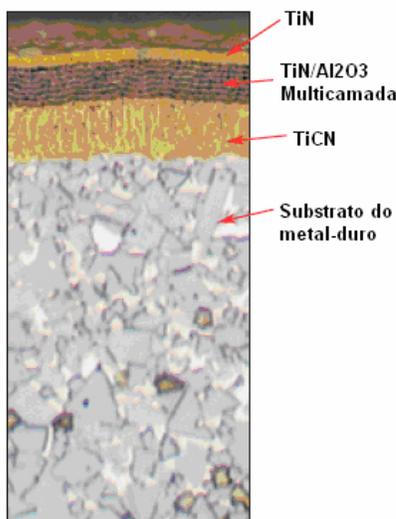


Figura 2-45 Revestimento multicamadas aplicado em uma ferramenta de Metal-Duro (SANDVIK, 2005).

### 2.5.2 Ferramentas de cerâmica

As cerâmicas de corte têm ganhado muita importância nos últimos anos na área de usinagem com geometria definida, possibilitando seu uso em diversos setores, como, por exemplo, na usinagem de discos de freio. Nesses últimos anos, com o aumento da aplicação, melhoraram-se as propriedades de tenacidade desse material, mas ainda o comportamento frágil da cerâmica, a dispersão das propriedades de resistência mecânica e as quebras são os

principais motivos para essas ferramentas não possuírem, até o momento, uma aplicação mais ampla (WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

Para Stemmer (2005), as ferramentas de corte cerâmicas possuem algumas características positivas, que são:

- Alta dureza a quente (até cerca de 1600° C), o que permite velocidades de corte de 5 a 10 vezes maior que a dos metais-duros;
- Elevada estabilidade química do óxido de alumínio, não gerando fenômenos como a oxidação ou a difusão;
- Descarta a possibilidade de descargas eletroquímicas, por ser a cerâmica um isolante elétrico;
- Alta resistência à compressão;
- Baixo coeficiente de atrito.

Essas características possibilitam operar com velocidades de corte maiores, aumentando a taxa de remoção de cavaco, melhorando a qualidade de superfície usinada. Outro ponto a se considerar é que a maior parte do calor gerado na usinagem é liberada pelo cavaco, ficando menos calor na peça e ferramenta de corte.

Em contrapartida, as ferramentas cerâmicas possuem algumas características que dificultam seu uso na usinagem, que são (STEMMER, 2005; DINIZ *et al*, 1999):

- A baixa condutividade térmica, sendo muito sensível a variações bruscas de temperatura. Em tal situação não se recomenda o uso de fluído refrigerante.
- A baixa tenacidade, o que facilita o surgimento de trincas e a quebra da ferramenta. Isso torna a ferramenta inadequada para cortes interrompidos, para o uso em máquinas pouco rígidas, e para onde há alguma vibração.

Os materiais de corte cerâmicos podem ser divididos em cerâmicas de corte óxidas, mistas e não óxidas à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Essa classificação se dá de acordo com a variação da composição de cada cerâmica (WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

As cerâmicas óxidas são constituídas basicamente por óxido de alumínio (cerca de 90% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que confere a cor branca aos insertos. A principal característica desse material é a alta dureza a quente e sua estabilidade química. As desvantagens das cerâmicas de óxido de alumínio são a alta sensibilidade às tensões e a baixa resistência a choques mecânicos e térmicos. São aplicadas no desbaste e acabamento de ferros fundidos cinzentos, nodulares e maleáveis, até uma dureza de aproximadamente 400 HB (STEMMER, 2005; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

As cerâmicas mistas são ferramentas de corte com menos de 90% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , porém são adicionado óxidos e carbonetos, especialmente carboneto de titânio e tungstênio, que

conferem a cor escura às pastilhas. A estrutura dessa ferramenta proporciona alta resistência de quina, alta resistência ao desgaste e aumenta a resistência a choques térmicos. São aplicadas na usinagem de ferros fundidos cinzentos, nodulares e maleáveis, até uma dureza de 700 HB (STEMMER, 2005; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

As cerâmicas não-óxidas à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) alcançaram grande importância como material de corte para a usinagem com geometria definida. Essas ferramentas apresentam maior tenacidade e resistência ao calor, maior dureza a quente e uma melhor resistência a choques térmicos em comparação com as cerâmicas óxidas. Sua principal desvantagem é que não possui boa estabilidade química. O principal campo de aplicação é na usinagem de ferro fundido cinzento, em que o cavaco formado é curto e não tende a causar difusão na superfície de saída da ferramenta (DINIZ *et al.*, 1999; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

## 2.6 Mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte

Durante a usinagem, a ferramenta é submetida a desgastes que dependem da forma da sollicitação e duração da sua utilização. O desgaste é relativamente rápido e se deve sobretudo às sollicitações térmicas e mecânicas elevadas (WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

Para se poder aumentar a vida das ferramentas, é indispensável conhecer as causas dos desgastes (STEMMER, 2005). Os principais fatores causadores de desgaste são mostrados na **Figura 2-46** e descritos logo em seguida:

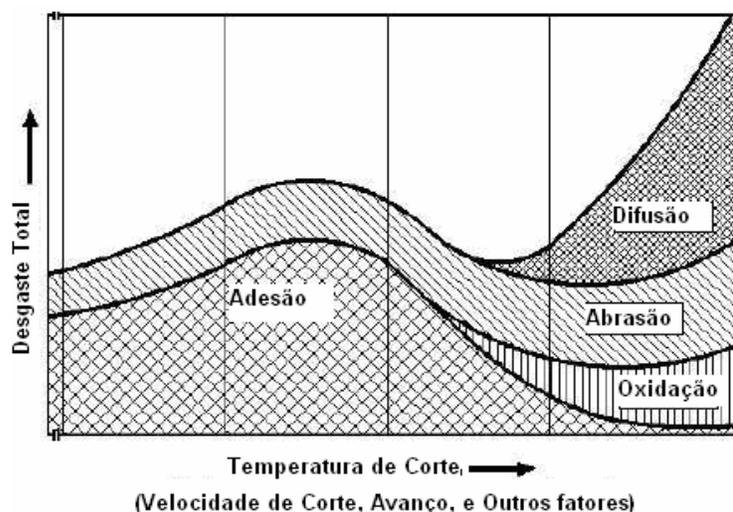


Figura 2-46 Principais fatores causadores de desgaste em ferramentas de corte (WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

**Abrasão:** É uma das principais causas de desgaste da ferramenta, na qual partículas da ferramenta são arrancadas à alta pressão e temperatura devido ao deslocamento com atrito

entre a ferramenta e a peça sendo usinada. Esse tipo de desgaste pode ser incentivado pela presença de partículas duras na peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. (STEMMER, 2005; DINIZ *et al*, 1999). Nos testes de torneamento de ferro fundido vermicular realizado por Xavier (2003), o maior causador de desgastes de flanco e de cratera nas ferramentas de metal-duro, cerâmica e de CBN foi o desgaste por abrasão.

**Adesão:** É a principal causa de formação de aresta postiça de corte. Sob alta pressão e temperatura, partículas provenientes da peça ou do cavaco caldeiam ao gume da ferramenta sendo removidas pelo movimento de corte e carregando junto consigo partículas da ferramenta de corte. (STEMMER, 2005; DINIZ *et al*, 1999).

**Difusão:** As moléculas que formam a estrutura da ferramenta se desprendem, fundindo-se e formando ligas menos resistentes e mais suscetíveis ao desgaste (STEMMER, 2005).

**Oxidação:** Quando o material da ferramenta apresenta afinidade com o oxigênio, sob altas temperaturas ocorre a formação de uma camada óxida em partes da ferramenta. Essa camada óxida pode ser removida pelo atrito entre a peça e a ferramenta, gerando a marca de desgaste (STEMMER, 2005; DINIZ *et al*, 1999).

**Choques mecânicos:** A ferramenta entra em contato de forma brusca com alguma outra parte da máquina-ferramenta ou da peça. Isso pode acarretar um lascamento ou quebra da ferramenta, ou até mesmo deformá-la (STEMMER, 2005).

**Choques térmicos:** a ferramenta sofre uma brusca variação de temperatura (em um curto intervalo de tempo), em geral por estar em uma alta temperatura e entrar em contato com uma peça de trabalho a uma temperatura muito mais baixa ou pelo uso de fluídos lubri-refrigerantes de forma intermitente (STEMMER, 2005).

A **Figura 2-47** representa a ação de alguns dos mecanismos de desgaste descritos acima:

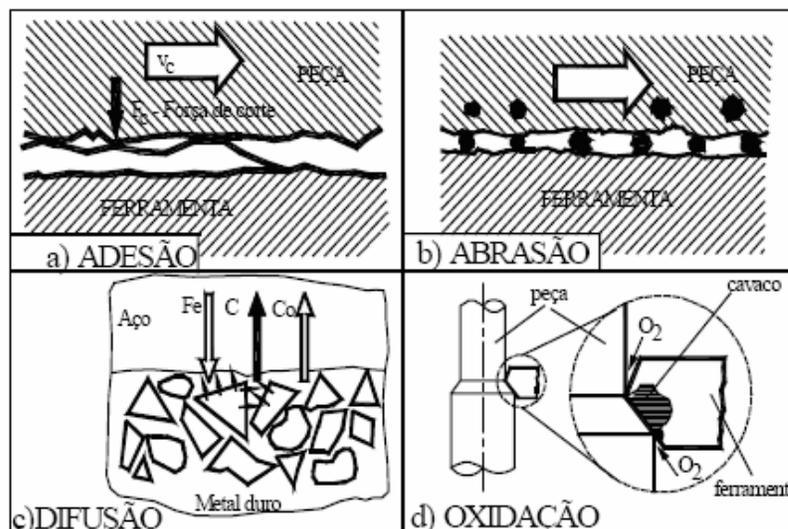


Figura 2-47 Representação da ação dos mecanismos de desgaste no contato entre a peça e a ferramenta (KONIG, 1997 citado por XAVIER, 2003).

O controle dessas causas de desgaste pode, muitas vezes, ser realizado pela seleção correta das condições de usinagem, principalmente do avanço e da profundidade de corte e também por outros fatores do processo de usinagem, como o uso de ferramentas revestidas e as características desse revestimento e a seleção do tipo do material da ferramenta a ser usada (DESCHAMPS, 2004).

Esses mecanismos levam a uma série de desgastes que limitam a vida útil de uma ferramenta. Dentre eles, pode-se citar: lascamento, desgaste de flanco e desgaste de cratera.

**Lascamento:** Representa uma falha acidental e prematura da ferramenta devido a solicitações térmicas ou mecânicas excessivas em seu gume. No lascamento, ao contrário dos outros tipos de desgaste, são retiradas de uma só vez partículas maiores da ferramenta. Esse tipo de desgaste ocorre com maior frequência em ferramentas com materiais mais frágeis, como cerâmicas e ferramentas com aresta de corte pouco reforçada (STEMMER, 2005; DINIZ *et al*, 1999).

**Desgaste de flanco (VB):** Ocorre na superfície de folga e no flanco principal da ferramenta e é atribuído ao atrito entre a ferramenta e a peça sendo usinada e às altas temperaturas envolvidas nos processos de usinagem. Esse tipo de desgaste causa a piora do acabamento superficial da peça, devido à modificação da forma original da aresta de corte (DINIZ *et al*, 1999). A **Figura 2-48** representa o desgaste de flanco em uma ferramenta de corte.

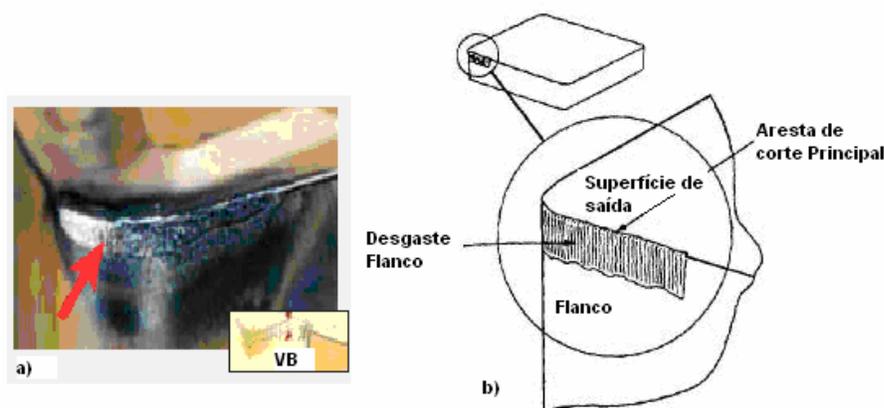


Figura 2-48 Representação do desgaste de flanco em uma ferramenta de corte ((a) SANDVIK, 2004 e (b) AMORIM, 2003).

**Desgaste de cratera (KT):** Forma-se na superfície de saída da ferramenta, em geral em virtude do atrito da ferramenta com o cavaco sendo retirado da peça. Quando o desgaste de cratera encontra o desgaste de flanco, gera o colapso da ferramenta de corte. Outro ponto a ser levado em consideração é que a cratera gerada pode constituir uma região de concentração de

tensões, sendo um causador de quebras de ferramentas (DINIZ *et al*, 1999; AMORIM, 2003).

A **Figura 2-49** representa o desgaste de cratera em uma ferramenta de corte.

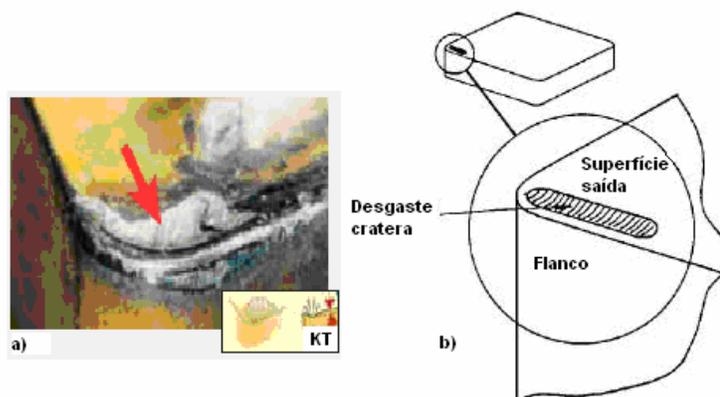


Figura 2-49 Representação do desgaste de cratera em uma ferramenta de corte ((a) SANDVIK, 2004 e (b) AMORIM, 2003).

Na usinagem, os diferentes tipos de desgaste dependem da temperatura e da velocidade de corte. Enquanto o desgaste abrasivo é quase constante à variação de temperatura, o desgaste adesivo é mais forte em temperaturas mais baixas. Em altas temperaturas, os desgastes de difusão e de oxidação estão presentes (REUTER *et al*, 1999b; GASTEL *et al*, 2000; REUTER *et al*, 2002).

Como já visto, o ferro fundido vermicular é 33% mais abrasivo e 15 % mais adesivo que o ferro fundido cinzento. O efeito combinado desses desgastes reduz em aproximadamente 50% a vida da ferramenta de corte (REUTER *et al*, 1999b; REUTER *et al*, 2002).

O desgaste por difusão entre o ferro fundido cinzento e o vermicular foi estudado por Reuter *et al* (1999b), em que os ferros fundidos foram mantidos em contato com ferramentas de CBN em um forno com temperaturas variando de 700° C a 1050° C por 6 horas e em uma atmosfera contendo 99,99% de hélio puro. Essas temperaturas são as mesmas encontradas na usinagem dos ferros fundidos com altas velocidades de corte. Elementos como boro, titânio, tungstênio foram encontrados dispersos nos ferros fundidos, advindos das ferramentas de corte de CBN. A difusão ocorreu na temperatura mais alta para ambos os ferros fundidos, dessa forma, mostrando que não há uma diferença significativa entre eles.

Investigações por meio de gravimetria térmica mostraram a oxidação na fase ligante e nos grãos de CBN das ferramentas. Um ganho de massa no inserto devido à oxidação foi visto em temperaturas acima de 750° C em uma atmosfera contendo oxigênio. Aquecendo as ferramentas acima de 950° C com uma faixa de aquecimento de 300° K/h, os insertos tiveram um ganho de massa de 0,75 %. Os resultados apontam a oxidação da fase ligante do CBN na forma de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) chamado de rutilo e a presença de microtrincas nos locais

da oxidação. Essas microtrincas podem ser as responsáveis pelo início das altas taxas de desgaste (REUTER *et al*, 1999b; GASTEL *et al*, 2000; REUTER *et al*, 2002). A oxidação da fase ligante e as microtrincas podem ser observadas na **Figura 2-50**.

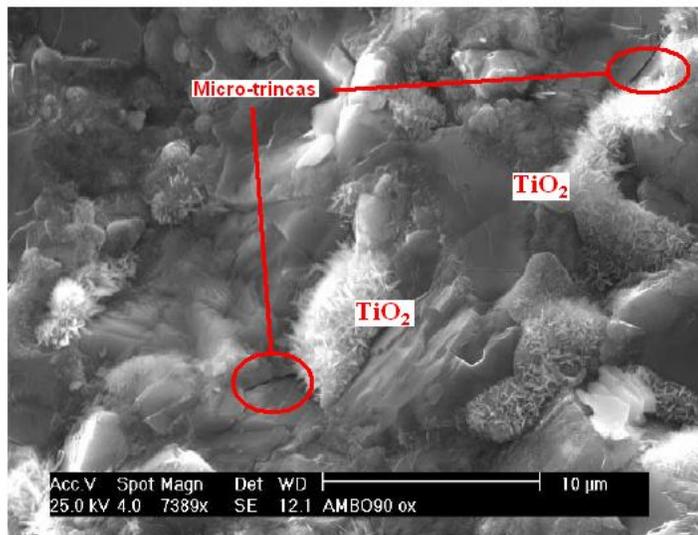


Figura 2-50 Oxidação da fase ligante na forma de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) e o surgimento de microtrincas no CBN (REUTER *et al*, 1999b, GASTEL *et al*, 1999, REUTER *et al*, 2002).

Quanto ao mecanismo de desgaste, que ocorre em ferramentas de corte cerâmicas, são poucos os trabalhos encontrados na literatura que abordam esse assunto. Entretanto, pode-se citar algumas pesquisas que estudaram os mecanismos de desgaste em cerâmicas de óxido de alumínio mistas na usinagem de aços alta liga. Esses resultados auxiliarão na discussão dos resultados obtidos com cerâmicas, na usinagem de ferro fundido vermicular.

Scuor *et al* (2005), realizou experimentos de usinagem de aço com uma ferramenta cerâmica de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) comercial e analisou o seu mecanismo de desgaste. Foi observada a ocorrência de desgaste de cratera devido ao fluxo do cavaco sobre a ferramenta de corte. Neste caso, o mecanismo de desgaste é devido ao comportamento plástico da alumina, induzido pelas altas temperaturas e forças de corte. Houve também ocorrência de desgaste de flanco e pequenos lascamentos na ferramenta, atribuídos às solicitações térmicas que ultrapassaram o limite de resistência à tração da ferramenta. A **Figura 2-51** mostra o desgaste ocorrido na ferramenta de óxido de alumínio utilizada por Scuor *et al* (2005).

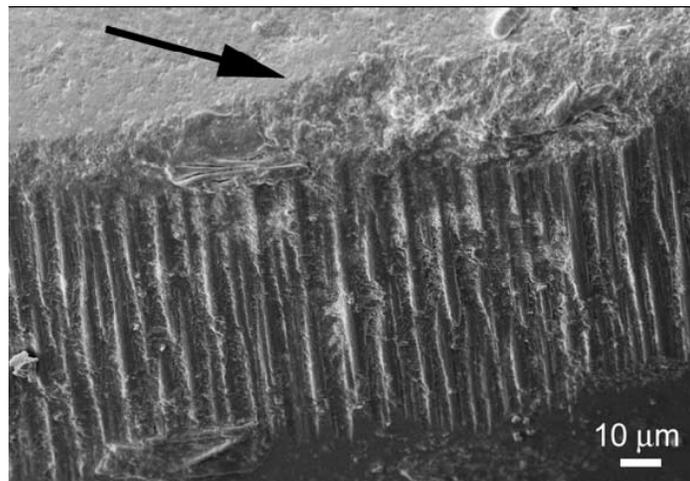


Figura 2-51 Imagem de MEV mostrando a deformação plástica no flanco e pequenos lascamentos indicados pela seta (Scuor *et al*, 2005).

Já Kumar *et al* (2006), usinando aço inox classe 410 com ferramentas cerâmica de óxido de alumínio reforçada com SiC (wiskers), observou que os principais mecanismos de desgaste apresentados foram adesão, abrasão, difusão, deformação plástica e fraturas. O desgaste de flanco foi devido ao atrito entre a ferramenta e a peça em altas temperaturas causando abrasão e adesão. Já no desgaste de cratera os mecanismos de desgaste presentes foram adesão, difusão e abrasão influenciados pela alta temperatura na região de contato entre cavaco e ferramenta e pela afinidade química entre ferramenta e material da peça.

## 2.7 Critérios de fim de vida para as ferramentas de corte

Devido ao caráter progressivo do desgaste de ferramentas de corte, é necessário, para evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos por operação inadequada da máquina-ferramenta, que se defina até quando uma ferramenta de corte pode ser útil, e quando essa começa a perder suas características operacionais, ou seja, quando a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída. À medida que a ferramenta vai se desgastando, ocorrem variações no processo de usinagem. A temperatura se eleva e a força de corte e potência consumida da máquina aumentam, alterando a superfície usinada e piorando o acabamento superficial (AMORIM, 2003; STEMMER, 2005).

A forma de dizer até quando uma ferramenta vai ser útil é determinada pela norma ISO 3685 (1993). A mesma estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo no qual uma ferramenta de corte pode trabalhar, até que seja necessária a sua substituição. Esse período, denominado de “*tempo de vida da ferramenta de corte*” ( $T$ ), é determinado através do tempo de trabalho necessário para que se desenvolva um defeito crítico (AMORIM, 2003).

Segundo Amorim (2003), a norma ISO 3685 estabelece os seguintes critérios para determinar o fim de vida da ferramenta de corte de metal-duro:

- Desgaste de flanco médio,  $VB = 0,3$  mm.
- Desgaste de flanco máximo,  $VB_{Max} = 0,6$  mm, no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco.
- Profundidade da cratera,  $KT = 0,06 + 0,3f$ , (em que  $f$  representa o avanço).
- Distância frontal entre cratera e flanco,  $KF = 0,02$ mm.
- Falha catastrófica.

Esses mesmos critérios de desgaste de flanco médio e máximo utilizados para metal-duro são válidos para ferramentas de cerâmica e aço rápido.

Para Amorim (2003), a norma ISO 3685 também cita a rugosidade superfície usinada e o crescimento repentino das forças de usinagem como critério de fim de vida de ferramenta em operações de acabamento. No caso específico da rugosidade média, os valores indicados são: 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5  $\mu\text{m}$ , a serem definidos de acordo com a necessidade de cada fabricante.

## 3 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

### 3.1 Considerações iniciais

O presente trabalho tem por objetivo verificar a influência que variações de nodularidade no ferro fundido vermicular têm sobre sua usinabilidade. Para isso, foram produzidas e estudadas três ligas de ferro fundido vermicular com composições diferentes, e variando principalmente a nodularização da grafita. Com essas três ligas foram fabricados corpos de prova de geometria cilíndrica e denominados de VER-1, VER-2 e VER-3.

Para pesquisar a usinabilidade dessas três ligas optou-se, pela realização de experimentos de usinagem pelo processo de torneamento de longa duração. O torneamento foi escolhido por ser um processo mais barato, de fácil execução e que se assemelha, no que tange à vida da ferramenta, ao processo de mandrilamento, que apresenta ainda grandes problemas para a usinagem do ferro fundido vermicular.

Os parâmetros de corte utilizados para a usinagem das três ligas de ferro fundido vermicular e o critério de fim de vida das ferramentas foram definidos com base em trabalhos vistos na literatura, recomendações dos fabricantes e a partir da experiência dos pesquisadores do laboratório, em função dos estudos práticos preliminares que realizaram.

Para a medição do desgaste de flanco das ferramentas de corte durante os ensaios de usinagem, valeu-se de um microscópio da marca Nikon com resolução de mesa de 0,001 mm, disponível no laboratório do GRUCON-UFSC.

Antes da realização dos ensaios de usinagem, foi feita uma pré-usinagem dos corpos de prova, sendo removida uma camada de aproximadamente 3 mm de espessura da sua superfície externa. Esse procedimento é importante, pois reduz a possibilidade de que falhas de fundição e efeitos de uma má solidificação da liga afetem a vida da ferramenta de corte durante a realização dos experimentos.

#### 3.1.1 Máquina ferramenta

Para realização dos ensaios, foi utilizado um torno da marca IMOR fabricado pelas indústrias ROMI S A com rotação máxima de 2000 rpm, garantida por um conversor de frequência. Tal equipamento está disponível no Laboratório do USICON da Universidade Federal de Santa Catarina. A máquina-ferramenta utilizada pode ser visualizada na **Figura 3-1**.



Figura 3-1 Máquina-ferramenta da marca IMOR utilizada nos ensaios de torneamento.

### 3.1.2 Sistema de fixação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fixados em uma placa com três castanhas e um contraponto. Para garantir a fixação utilizando o contraponto, foi necessário acoplar, com interferência, ao corpo de prova uma bucha com um furo de centro. Esse tipo de fixação garantiu a estabilidade e rigidez dos corpos de prova para a realização dos ensaios com segurança. O sistema de fixação dos corpos de prova pode ser visto na **Figura 3-2**.

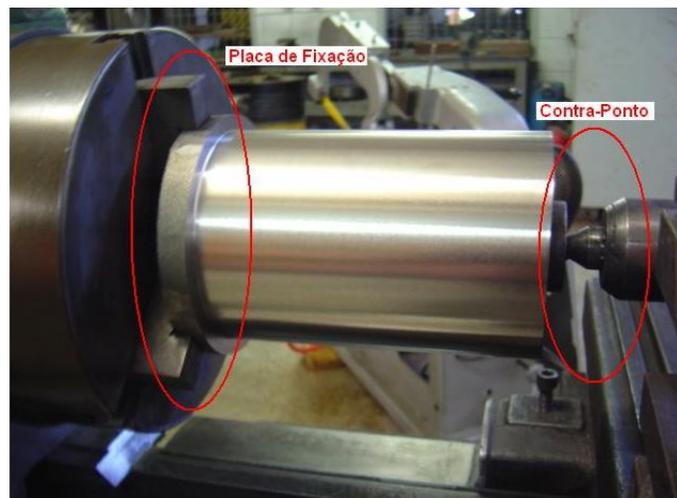


Figura 3-2 Sistema de fixação dos corpos de prova com três castanhas e contraponto.

### 3.1.3 Suportes para fixação das ferramentas de corte

Para a fixação das pastilhas de corte à máquina-ferramenta, foram utilizados dois suportes de ferramenta, fornecidos pela empresa Sandvik, um com o código DCLNR 2525M12 e outro com o código CRSNR 2525M09, especialmente usado para a fixação das pastilhas de corte produzidas pelo IPEN, como mostra a **Figura 3-3**. Durante os ensaios de usinagem, os suportes ficaram fixos à máquina-ferramenta, sendo apenas retirada a pastilha de corte para a medição do seu desgaste, evitando assim variações nos resultados e na profundidade de corte.



Figura 3-3 Suportes para a fixação das pastilhas de corte.

### 3.1.4 Microscópio para a medição do desgaste nas ferramentas de corte

Para realizar a medição do desgaste, utilizou-se um microscópio da marca Nikon, modelo Measurescope, com resolução da mesa micrométrica de 0,001 mm. O ponto de referência para a medição do desgaste foi o gume principal de ferramenta de corte.

Esse equipamento encontra-se no laboratório do USICON-UFSC e pode ser visto na **Figura 3-4**.



Figura 3-4 Microscópio utilizado para a medição do desgaste das ferramentas de corte.

### 3.1.5 Microscópio eletrônico de varredura

Para identificar a causa do desgaste nas ferramentas de corte, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Phillips modelo XL-30, disponível no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina. No MEV, um feixe fino de elétrons de alta energia incide na superfície da amostra onde, ocorrendo uma interação, parte do feixe é refletida e coletada por um detector que converte esse sinal em imagem. Ocorre também a emissão de raios-X que fornecem a composição química dos elementos presentes em uma

região da superfície (Maliska, 2006). Mediante essas imagens, é possível identificar o mecanismo causador do desgaste nas ferramentas de corte.

Na **Figura 3-5** está ilustrado o microscópio eletrônico de varredura, juntamente com seus componentes básicos.

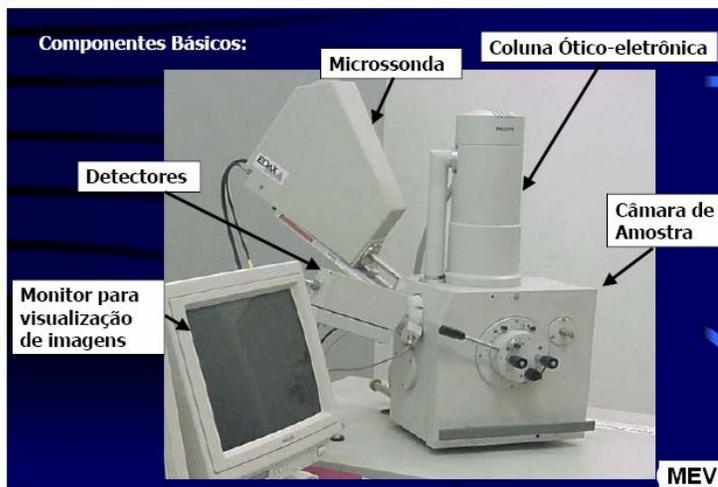


Figura 3-5 Ilustração de um Microscópio Eletrônico de Varredura (LABMAT-UFSC, 2006).

### 3.1.6 Geometria dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fundidos pela Fundição Tupy Ltda e sua geometria foi definida em função da facilidade e qualidade da fixação na máquina-ferramenta, redução de vibrações durante a usinagem e maior garantia na homogeneidade da microestrutura.

Os mesmos foram produzidos na geometria cilíndrica e vazados (**Figura 3-6**), com comprimento máximo (L) de 205 mm, diâmetro externo (D) de 145 mm e diâmetro interno (d) de 90 mm. A **Figura 3-7** mostra essas dimensões dos corpos de prova.



Figura 3-6 Corpos de prova produzidos pela Fundição Tupy para a realização dos ensaios.

Foram produzidas três composições de corpos de prova, denominadas de acordo com a variação da nodularidade na sua microestrutura. Desse modo, as denominações são as

seguintes: **VER-1** para a nodularidade de 6%, **VER-2** para a nodularidade de 26% e **VER-3** para a nodularidade de 36%.

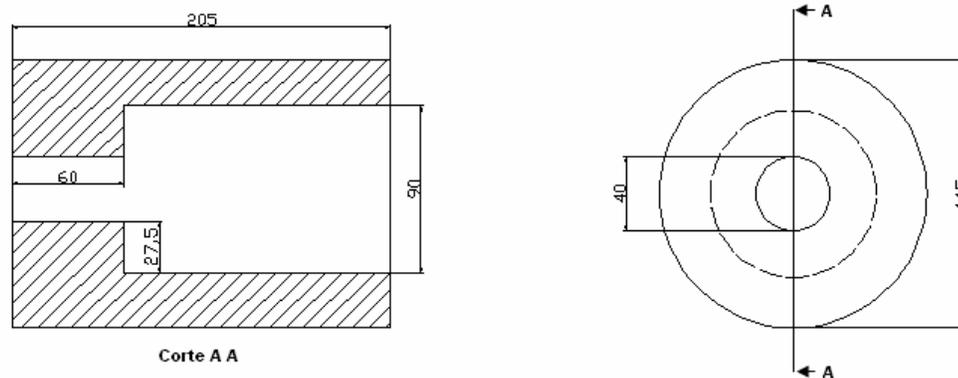


Figura 3-7 Geometria dos corpos de prova padrão para as três composições de nodularidade.

### 3.1.7 Metodologia dos ensaios de usinagem

Como já citado anteriormente, para se avaliar a influência da nodularidade sobre a usinabilidade do ferro fundido vermicular, optou-se pela realização dos experimentos através de ensaios de torneamento por ser um processo de fácil execução, mais barato e que possibilita fazer aproximações ao processo de mandrilamento, nos quais se encontram os maiores problemas na usinagem do ferro fundido vermicular.

Antes dos experimentos foi feita uma pré-usinagem dos corpos de prova sendo removida uma camada de cerca de 3 mm de espessura na superfície externa dos corpos de prova, evitando que falhas de fundição da liga não afetassem o desempenho da ferramenta de corte durante a realização dos experimentos.

A realização dos experimentos ocorreu no Laboratório do USICON da Universidade Federal de Santa Catarina na seguinte ordem:

- 1º Ensaio das ferramentas de metal-duro e de cerâmicas no corpo de prova VER-1;
- 2º Ensaio das ferramentas de metal-duro e de cerâmicas no corpo de prova VER-2;
- 3º Ensaio das ferramentas de metal-duro e de cerâmicas no corpo de prova VER-3.

Para aumentar a precisão nos resultados dos experimentos foi efetuada uma nova série de ensaios, em que foi utilizado um segundo gume de cada ferramenta de corte, na mesma ordem de realização citada anteriormente.

Para cada passe de usinagem, a ferramenta era retirada do suporte e se realizavam os procedimentos de medição de seu desgaste até que o mesmo tenha atingido o seu limite máximo de  $VB = 0,3$  mm no flanco da ferramenta, determinando seu fim de vida. Esse limite de desgaste foi pré-definido com base em trabalhos passados vistos na literatura. Após cada

medição, o assento da pastilha no suporte era limpo e a mesma era presa para a realização do passe seguinte.

Depois dos experimentos realizados, todas as ferramentas foram analisadas com o intuito de avaliar o mecanismo de desgaste ocorrido na usinagem do ferro fundido vermicular com diferentes nodularidades de grafita.

### 3.1.8 Critério de fim de vida para as ferramentas de corte

Com base na literatura, foi escolhida como critério de fim de vida das ferramentas a marca de desgaste no flanco médio medido com o auxílio de um microscópio óptico. O critério adotado foi um desgaste VB de 0,3 mm, de modo a evitar experimentos muito longos e grande consumo de material. A marca de desgaste é ilustrada na **Figura 3-8**. O desgaste no flanco da ferramenta também foi constatado e analisado ao longo dos experimentos.

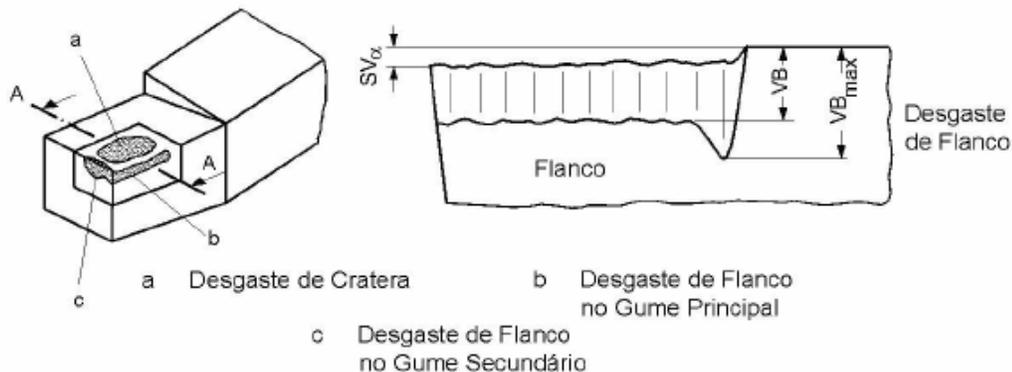


Figura 3-8 Marca de desgaste no flanco de uma ferramenta de corte de geometria definida.

### 3.1.9 Parâmetros de corte utilizados

Os parâmetros de corte utilizados para os experimentos de usinagem foram definidos com base em trabalhos vistos na literatura, recomendações dos fabricantes e na experiência dos pesquisadores do laboratório, adquirida em trabalhos preliminares realizados.

Os valores para a velocidade de corte foram definidos de acordo com o material da ferramenta de corte, não variando seu valor ao longo dos ensaios. Os demais parâmetros, profundidade de corte e avanço, se mantiveram os mesmos para as quatro ferramentas utilizadas na pesquisa. A **Tabela 3-1** mostra os parâmetros de corte que foram utilizados para a realização dos experimentos de usinagem.

Tabela 3-1 Parâmetros de corte utilizados para os experimentos de usinagem.

<b>Material</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>f (mm)</b>	<b>ap (mm)</b>
<b>Metal-Duro</b>	160	0,2	0,5
<b>Cerâmicas</b>	200	0,2	0,5

### 3.1.10 Análise estatística dos resultados

Para a verificação da validade dos dados obtidos, os mesmos foram submetidos à análise estatística, utilizando a análise de variância para comparação entre as diferentes nodularidades do material. Como suporte para a análise foi utilizado o ANOVA, disponível com o Microsoft Excel.

Para realizar essas verificações da validade dos dados obtidos também foram utilizadas as informações e formulações disponíveis na literatura (MONTGOMERY, 1996; MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

## 4 MATERIAIS UTILIZADOS

### 4.1 Caracterização das ligas de ferro fundido vermicular e ferramentas utilizadas

Antes do início dos ensaios de usinagem, é importante se ter o conhecimento do material e das ferramentas que se está utilizando. Para isso, foram feitos alguns ensaios de caracterização, para identificar as propriedades mecânicas, físicas e microestruturais do ferro fundido vermicular a ser utilizado.

As ferramentas de corte de metal-duro revestido, as cerâmicas óxidas com carboneto de nióbio produzidas pelo IPEN e as cerâmicas de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) revestidas com nitreto de titânio (TiN) também foram caracterizadas e serão apresentadas neste capítulo.

#### 4.1.1 Análise da microestrutura do ferro fundido vermicular

A análise da microestrutura das ligas de ferro fundido vermicular utilizadas foi realizada no Laboratório Metalúrgico e Mecânico da empresa Tupy Fundições Ltda, sediada na cidade de Joinville/SC.

Foram retiradas amostras de cada uma das três composições de corpo de prova, como ilustrado na **Figura 4-1**. Tais amostras foram embutidas, lixadas e, por fim, polidas, de forma que a microestrutura pudesse ser analisada e fotografada.



Figura 4-1 Amostras embutidas para a análise da microestrutura dos corpos de prova.

Para a aquisição das fotos, foi usado um microscópio óptico da marca Nikon com um sistema digital de aquisição de imagens acoplado. A partir das imagens obtidas, foi avaliada a forma da grafita, a porcentagem de nodularização da grafita, além da quantidade de perlita e ferrita na matriz metálica. Para a quantificação da porcentagem de grafita e perlita, as amostras foram submetidas a ataque de Nital 3%. O resultado da análise das imagens é exibido na **Tabela 4-1**.

Tabela 4-1 Caracterização do material para as diferentes estruturas através das imagens obtidas.

Material	Grafita Vermicular	Grafita Nodular	Forma grafita	Perlita	Ferrita
VER-1	94%	6%	III e IV	98%	2%
VER-2	74%	26%	III e IV	96%	4%
VER-3	64%	36%	III e IV	95%	5%

As micrografias de cada corpo de prova estão representadas nas Figuras 4.2 a 4.4, que mostram o ferro fundido vermicular com e sem o ataque de Nital 3%.

A priori, olhando para as imagens das três composições, não foi detectada a presença de nenhuma inclusão. Na seqüência desse capítulo, serão analisadas imagens atacadas com Nital, em uma concentração maior, para tentar identificar a possível presença de inclusões, como, por exemplo, de cementita.

Na **Figura 4-2** (A), observa-se a grafita na forma vermicular e nodular e a matriz metálica, enquanto no lado (B), pode-se ver a grafita vermicular e nodular e que a matriz metálica é quase exclusivamente perlítica com pouca ferrita. Essa é a micrografia do corpo de prova VER-1, que possui nodularização da grafita de aproximadamente 6%.

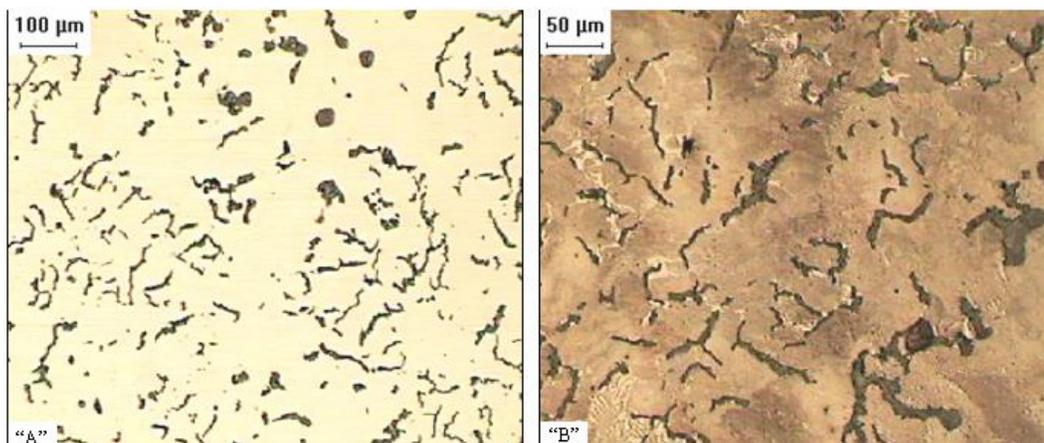


Figura 4-2 Micrografia do ferro fundido vermicular, VER-1: (A) sem ataque de Nital 3% e (B) com ataque de Nital 3%.

Na **Figura 4-3** (A), observa-se a grafita na forma vermicular e nodular e a matriz metálica, enquanto no lado (B), pode-se ver a grafita vermicular e nodular e que a matriz metálica é quase exclusivamente perlítica com uma quantidade maior de ferrita. Essa é a micrografia do corpo de prova VER-2 com nodularização da grafita de aproximadamente 26%.

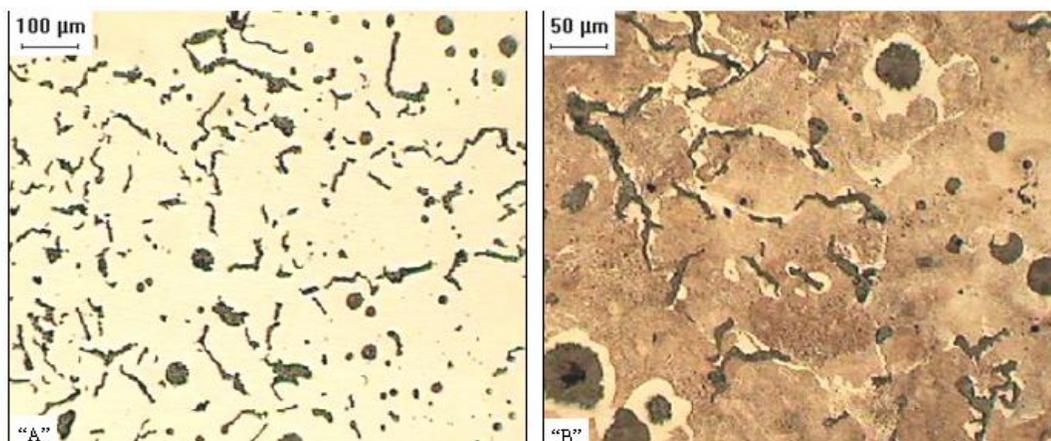


Figura 4-3 Micrografia do ferro fundido vermicular, VER-2: (A) sem ataque de Nital 3% e (B) com ataque de Nital 3%.

Na **Figura 4-4** (A), observa-se a grafita na forma vermicular e nodular e a matriz metálica, enquanto no lado (B), pode-se ver a grafita vermicular e nodular e que a matriz metálica é quase exclusivamente perlítica com uma quantidade de ferrita superior aos corpos de prova (VER-1) e o (VER-2). Essa é a micrografia do corpo de prova VER-3 com nodularização de aproximadamente 36%.

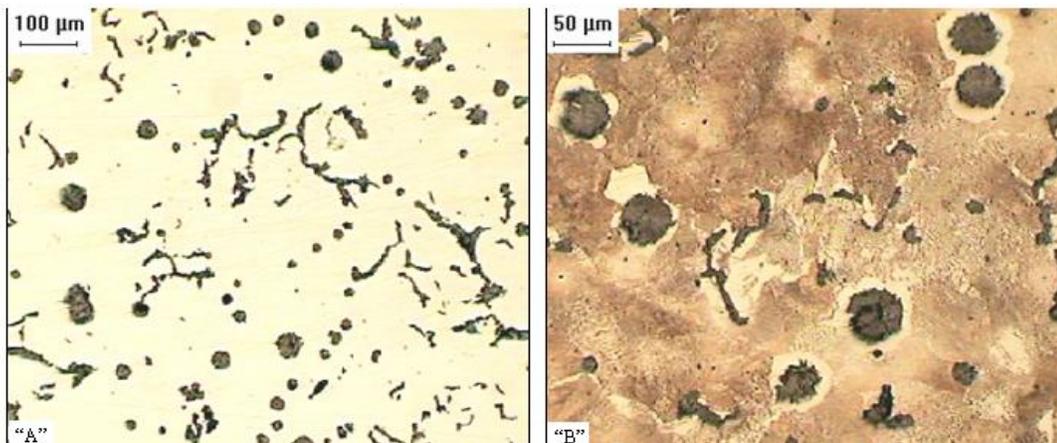


Figura 4-4 Micrografia do ferro fundido vermicular, VER-3: (A) sem ataque de Nital 3% e (B) com ataque de Nital 3%.

Após a caracterização da microestrutura de cada composição de corpo de prova, as amostras foram atacadas com Nital em uma concentração maior, com o objetivo de identificar possíveis carbonetos formados durante o resfriamento da liga. As imagens de cada liga serão dispostas a seguir.

Na **Figura 4-5** está representada a microestrutura do corpo de prova VER-1. Nessa liga foi constatado que houve a formação de carbonetos durante a fundição, isto é cerca de 1% distribuídos no núcleo da amostra, e entre eles a cementita ou carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). A formação desses carbonetos pode ser explicada pela diminuição da inoculação para a

obtenção de uma liga com uma quantidade baixa de grafita nodular, acabou ocorrendo à precipitação de carbonetos, que podem influenciar significativamente na usinabilidade do ferro fundido vermicular.

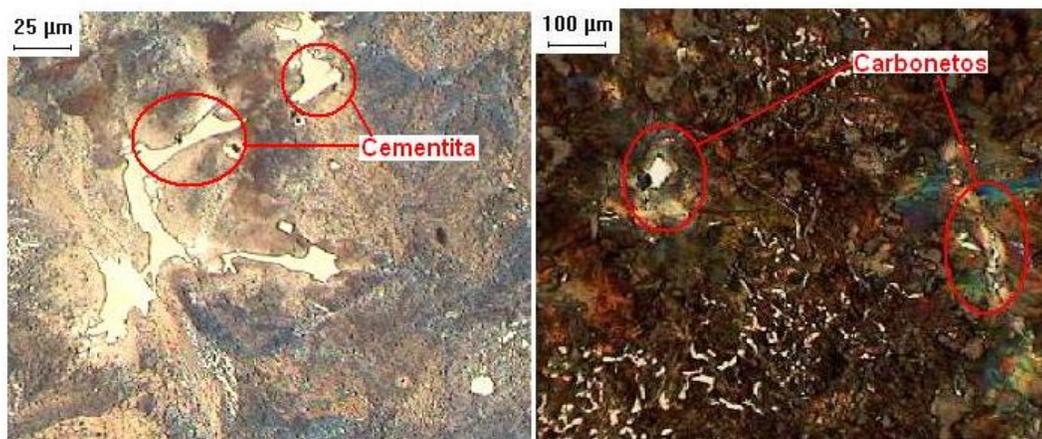


Figura 4-5 Segregação de carbonetos de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ou cementita na liga VER-1.

Nas ligas VER-2 e VER-3, não foi constatada a presença de precipitações, como pode ser visto na **Figura 4-6 (A) e (B)**. É possível também distinguir com clareza a ferrita que envolve a grafita nodular.

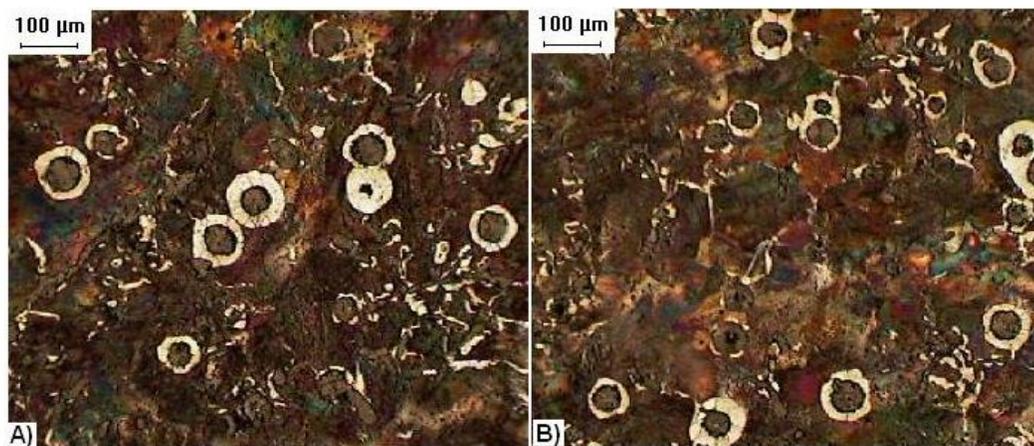


Figura 4-6 Microestrutura do corpo de prova VER-2 (A) e VER-3 (B).

Com o intuito de verificar o tipo de carbonetos precipitados na amostra, foi feita uma análise no MEV do corpo de prova VER-1 e analisado através do EDS. Inicialmente foi identificado um precipitado na amostra e feita uma análise pontual sobre a mesma onde se observou a presença de ferro em maior quantidade, carbono e silício em menor quantidade. Isso indica que a inclusão precipitada é de cementita ou carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), como mostra a **Figura 4-7**.

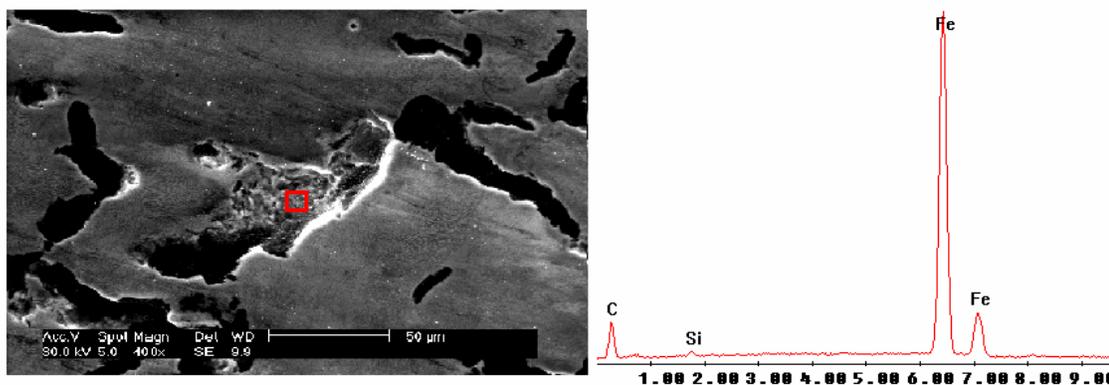


Figura 4-7 Análise por EDS de um precipitado na liga VER-1.

Observou-se também nas amostras das ligas VER-2 e VER-3, que a ferrita envolve as grafitas nodulares, o que tende a aumentar a aderência do material. Para identificar se era mesmo ferrita em volta das grafitas nodulares foi analisada uma amostra da liga VER-2 através de EDS. A **Figura 4-8** mostra que na grafita tem-se basicamente carbono, enquanto num ponto fora do contorno da grafita nodular, tem-se quase que só ferro o que confirma se tratar de ferrita o que envolve o nódulo de grafita.

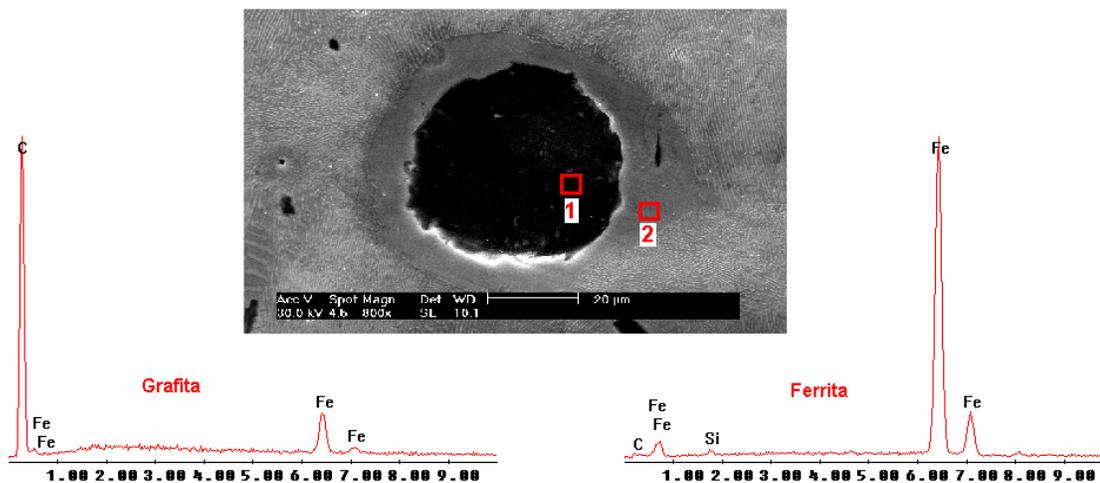


Figura 4-8 Ferrita envolvendo a grafita nodular na liga VER-3.

#### 4.1.2 Determinação da dureza do material

A caracterização do material pela medição da dureza, como segue, foi realizada no Laboratório Metalúrgico e Mecânico da empresa Tupy Fundições Ltda. As medições da dureza da superfície e do núcleo da parede de cada tipo de corpo de prova foram na escala Brinell (HB) e as medições da microdureza da perlita foram na escala Vickers (HV).

As amostras utilizadas para a realização das medições de dureza foram retiradas de um corpo de prova da cada uma das três ligas. As amostras foram recortadas ao longo do

comprimento dos corpos de prova, onde posteriormente foram recortadas em amostras menores para se fazer as medições, como mostra **Figura 4-9**.

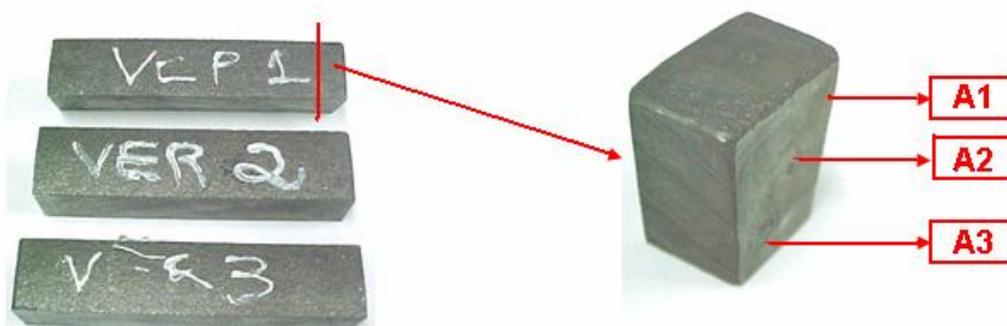


Figura 4-9 Regiões de medição da dureza da superfície dos corpos de prova.

Para a medição da dureza Brinell, foi utilizado um Durômetro Wolpert, com uma esfera de 05 mm de diâmetro e uma carga de 750 Kgf. Já para medição da microdureza da perlita em Vickers, usou-se um Microdurômetro Zwick, com uma pirâmide de diamante de base quadrada e uma carga de 0,5 Kgf. Os resultados das medições de dureza da superfície, núcleo e microdureza da perlita nas três ligas de ferro fundido vermicular são apresentados na **Tabela 4-2** e **Tabela 4-3**. A medição no ponto **A1** foi realizada próxima a superfície externa da amostra, a medição **A2** foi realizada no centro da amostra e a medição **A3** foi realizada próxima a superfície interna da amostra.

Tabela 4-2 Dureza da superfície e do núcleo dos corpos de prova (HB 5/750).

Amostras	Dureza da Superfície (HB)	Dureza do Núcleo (HB)		
		A1	A2	A3
<b>VER-1</b>	263	263	252	255
<b>VER-2</b>	246	244	236	234
<b>VER-3</b>	244	234	241	239

Observando as ligas estudadas, nota-se que há uma correlação entre a dureza Brinell (HB) da superfície das amostras e a microdureza da perlita e que a dureza está inversamente proporcional à nodularidade, pois na liga VER-1 com 6% de nodularidade tem-se as durezas mais elevadas, decrescendo até a liga VER-3 com 36% de nodularidade e menores durezas, tanto na superfície quanto na microdureza da perlita. A medição da microdureza da perlita foi realizada em 05 pontos distintos ao longo da amostra e feita uma média desses valores medidos.

Tabela 4-3 Microdureza da perlita dos corpos de prova (0,5 Kgf).

Amostras	Microdureza da perlita (HV)					Média (HV)
	1	2	3	4	5	
<b>VER-1</b>	332	322	332	332	322	328
<b>VER-2</b>	314	314	289	314	314	309
<b>VER-3</b>	289	297	297	297	297	295

#### 4.1.3 Determinação das propriedades mecânicas

Para determinar as propriedades mecânicas, valeu-se de uma Máquina Universal de Ensaio Kratos, disponível no Laboratório Metalúrgico e Mecânico da empresa Tupy Fundições Ltda. Os corpos de prova foram preparados seguindo a norma NBR 6916. Os resultados estão dispostos na **Tabela 4-4**. Observando os resultados em termos de propriedades mecânicas, mostra que, apesar de muito próximos, para a liga com menor nodularidade se tem maior resistência mecânica. Percebe-se também que as propriedades mecânicas são proporcionais à dureza nas diferentes ligas de ferro fundido vermicular. Esses valores foram obtidos em um ensaio único para cada amostra de corpo de prova.

Tabela 4-4 Propriedades mecânicas das três variações de vermicular.

Amostras	Ensaio Mecânico		
	Limite de Resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
<b>VER-1</b>	535	448	1,45
<b>VER-2</b>	530	394	2,08
<b>VER-3</b>	497	377	1,50

#### 4.2 Ferramentas de corte

Para a realização dos ensaios de usinagem, foram utilizadas três ferramentas de metal-duro do mesmo substrato e geometria, porém com revestimentos diferentes, provenientes da Sandvik Coromant e da Sumitomo e cinco ferramentas de cerâmica, conforme **Tabela 4-5**. Quatro dessas cerâmicas foram produzidas pelo IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), na mesma geometria, contudo com diferentes substratos, sendo que uma delas foi

revestida pela empresa Balzers do Brasil com o revestimento denominado Futura Top de TiAlN (Nitreto de titânio alumínio).

Tabela 4-5 Codificação das ferramentas de corte

<b>Fabricante</b>	<b>A</b> <b>Sandvik</b>	<b>B</b> <b>Sumitomo</b>	<b>Cerâmica não comercial</b> <b>fabricada pelo IPEN</b>
<b>Ferramenta Metal-Duro</b>	MD-3005 MD-3215	MD-AC700	
<b>Ferramenta de Cerâmica</b>		CER-NS260	CER-AN CER-AN Revestida CER-A0,5YN CER-A1YN

A quinta cerâmica é proveniente da Sumitomo e possui a mesma geometria das ferramentas de metal-duro. As ferramentas foram identificadas de acordo com a numeração e o material do tipo de pastilha e codificadas segundo a **Tabela 4-5**.

#### 4.2.1 Ferramentas de metal-duro

As ferramentas de metal-duro foram fabricadas com o mesmo substrato K10, apresentando uma geometria CNMG 120408, de acordo com a norma ISO 1832-1985. A diferença entre elas está no revestimento utilizado e na forma da quina da ferramenta.

A ferramenta MD-3005 foi revestida pelo processo CVD com 03 camadas, sendo a externa de TiN, que possui baixo coeficiente de atrito e cor amarelada, a camada intermediária de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que protege termicamente o material pela sua baixa condutividade, e a camada interna é de TiCN de alta dureza e que fornece mais resistência ao desgaste da ferramenta.

A ferramenta MD-3215 também foi revestida pelo processo CVD, mas apresenta apenas duas camadas de revestimento, sendo a camada externa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e a interna de TiCN. Tal ferramenta, além da proteção térmica e resistência ao desgaste, oferece resistência ao microlascamento por possuir um acabamento menos poroso na superfície externa que fica em contato com o material da peça. Esse tipo de revestimento está representado na **Figura 4-10**.

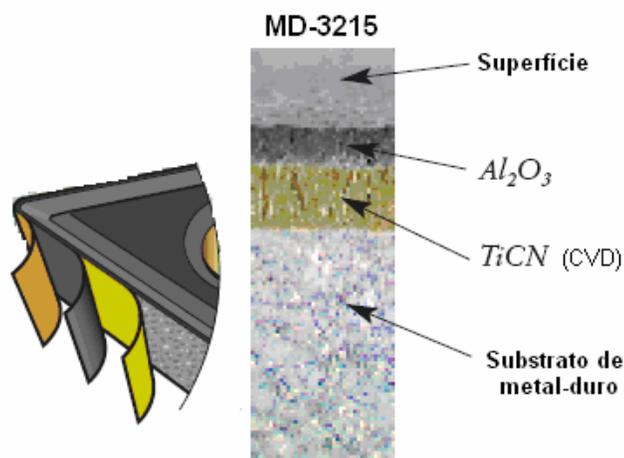


Figura 4-10 Revestimento com cobertura menos porosa da ferramenta MD-3215.

A ferramenta MD-AC700 apresenta apenas duas camadas de revestimento ( $Al_2O_3$  e TiCN), que proporcionam proteção térmica e resistência ao desgaste. As ferramentas de metal-duro utilizadas na pesquisa são mostradas na **Figura 4-11**.

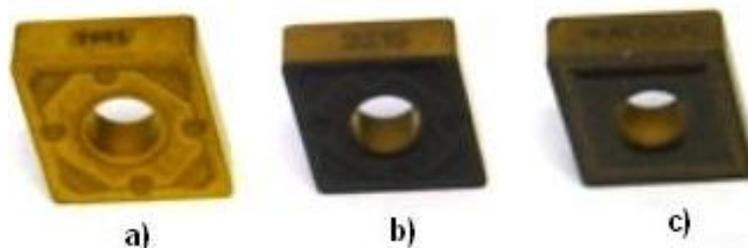


Figura 4-11 Ferramentas de metal-duro utilizadas nos ensaios: (a) Ferramenta MD-3005, (b) Ferramenta MD-3215 e (c) Ferramenta MD-AC700.

Além da diferença de revestimento, as ferramentas diferem na forma da quina. As ferramentas MD-3005 e MD-3215 possuem quina alisadora que combina os chanfros e raio, enquanto a MD-AC700 não apresenta essa combinação, possuindo uma quina convencional. As diferenças entre as quinas podem ser vistas na **Figura 4-12**.

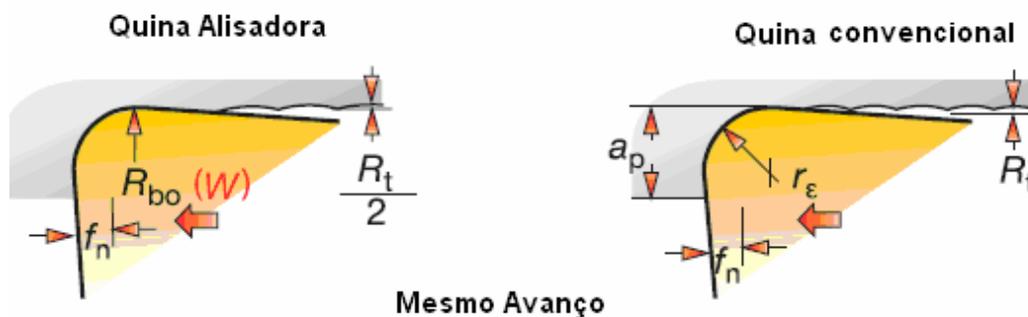


Figura 4-12 Esquema do raio de quina das ferramentas de corte de metal-duro.

#### 4.2.2 Ferramentas de cerâmica

A ferramenta de cerâmica produzida pela Sumitomo possui a geometria ISO CNMG 120408 com substrato de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) e na pesquisa foi denominada de CER-NS260. A mesma tem duas camadas de revestimento, sendo uma de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e outra de nitreto de titânio ( $\text{TiN}$ ), fornecendo um aumento na dureza e maior resistência ao desgaste. A ferramenta CER-NS260 pode ser visualizada na **Figura 4-13**.

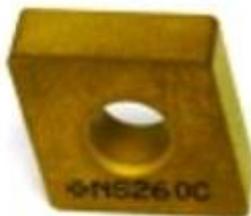


Figura 4-13 Ferramenta de Cerâmica CER-NS260.

As ferramentas produzidas pelo IPEN possuem geometria ISO RNGN 090300 (redondas) com substrato de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e adicionado 20% de carboneto de nióbio ( $\text{NbC}$ ), 0,5 e 1% de óxido de ítria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), cuja formulação é  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{NbC}$ , CER- $\text{Al}_2\text{O}_3:0,5\text{Y}_2\text{O}_3:\text{NbC}$  e CER- $\text{Al}_2\text{O}_3:1\text{Y}_2\text{O}_3:\text{NbC}$  e foram denominadas neste trabalho de CER-AN, CER-A0,5YN e CER-A1YN, respectivamente. Na **Figura 4-14**, pode ser vista a geometria de uma dessas ferramentas cerâmicas e a sua microestrutura composta por  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NbC}$  e  $\text{Y}_2\text{O}_3$ .

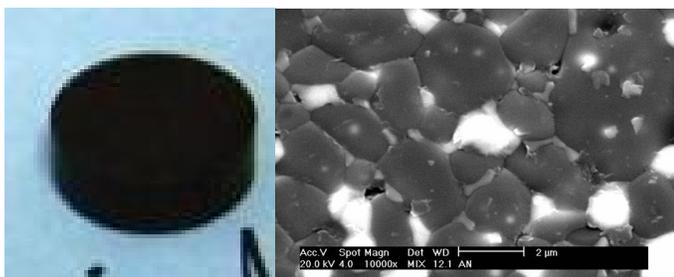


Figura 4-14 Imagem de MEV e geometria de uma ferramenta cerâmica fabricada pelo IPEN.

Essas ferramentas produzidas pelo IPEN foram sinterizadas em uma temperatura de  $1500^\circ\text{C}$  durante 15 min, sendo que a principal característica atribuída a tais ferramentas é o aumento na resistência ao desgaste. Na **Tabela 4-6**, foram comparadas algumas propriedades das ferramentas de corte produzidas pelo IPEN com as propriedades de ferramentas comerciais à base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Tabela 4-6 Comparação entre as propriedades das cerâmicas produzida pelo IPEN e as comerciais (IPEN, 2006; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

	Compósitos				
	IPEN			Óxido	Não Óxido
	CER-A N	CER-A05YN	CER-A1YN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +30%Ti(CN)	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> +10%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Tenacidade (Mpa*m <sup>1/2</sup> )	4,1	3,6	3,5	4,5	7
Dureza Vickers (Gpa)	18,9	18,2	17,1	19,3	17,5
Módulo elasticidade (Gpa)	326	355	370	400	*

Uma segunda ferramenta CER-AN, de mesma composição, foi revestida com nitreto de titânio alumínio (TiAlN), denominado de Futura Top, pela empresa Balzers do Brasil S. A, e utilizada nos ensaios de usinagem do ferro fundido vermicular.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão exibidos os resultados obtidos em relação à influência da variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular, durante a realização dos ensaios de torneamento de longa duração. Os ensaios foram feitos em três etapas distintas, primeiro usinagem da liga VER-1, seguida pelas ligas VER-2 e VER-3.

A apresentação e a discussão dos resultados se darão na forma de gráficos e a análise do desgaste das ferramentas de corte se fará por meio de imagens obtidas através de microscopia ótica.

### 5.1 Análise da usinabilidade das ligas com ferramentas de metal-duro

Neste subcapítulo serão mostrados os resultados obtidos no torneamento da liga VER-1 de ferro fundido vermicular com as ferramentas de metal-duro MD-AC700, MD 3005 e MD 3215.

#### 5.1.1 Análise da usinabilidade da liga VER-1

Em termos de microestrutura, a liga VER-1 apresentou uma matriz perlítica (98% de perlita e 2% de ferrita) com 94% de grafita vermicular e **6% de grafita nodular**. A análise metalográfica indicou também a presença de 1% de carbonetos precipitados na matriz metálica (principalmente cementita). Nos ensaios de dureza, a liga VER-1 foi a que teve os valores mais altos, tanto de dureza na superfície (263 HB), como na microdureza da perlita (332 HV). Em termos de propriedades mecânicas, a liga VER-1 também apresenta, apesar de próximos com as outras ligas, os valores mais elevados, sendo: LR= 535 MPa e LE= 448 Mpa. Os resultados em termos de dureza e propriedades mecânicas se mostram coerentes, pois a dureza da superfície se correlaciona com a microdureza da perlita e os valores de resistência mecânica estão proporcionais à dureza.

Essas características apresentadas pela liga VER-1 de baixa nodularidade, porém com os maiores valores de dureza e resistência mecânica, podem ser associadas à presença dos carbonetos duros segregados na matriz metálica. A ocorrência de carbonetos na liga deve-se à diminuição da inoculação para sua produção. A inoculação é o processo pelo qual se adiciona elementos à liga fundida com a finalidade de influenciar a forma, o tamanho e até mesmo a distribuição da grafita na matriz metálica, que nesse caso foi diminuída para se obter uma liga com a menor quantidade possível de grafita nodular, o que aumentou, desse modo, a possibilidade de formação de carbonetos segregados.

Após a análise metalográfica, foram realizados os ensaios de usinabilidade da liga VER-1, à velocidade de corte igual a 160 m/min, um avanço de 0,2 mm/rotação, profundidade de corte de 0,5 mm e três ferramentas de metal-duro com características e fabricantes diferentes.

Na usinagem da liga VER-1 com baixa nodularidade, as ferramentas tiveram um tempo médio de vida de 27,5 minutos. Esse valor é uma média dos tempos obtidos pelas três ferramentas de metal-duro ensaiadas. A **Figura 5-1** mostra a curva média de dois gumes ensaiados para cada ferramenta, utilizando como critério de fim de vida um desgaste VB de 0,3 mm.

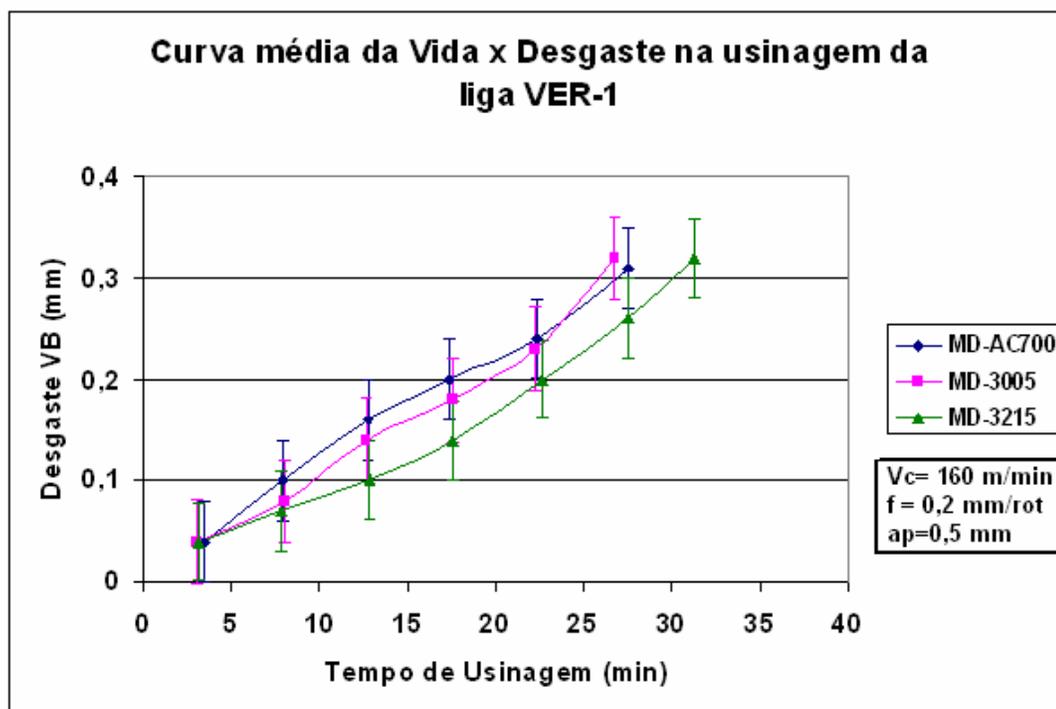


Figura 5-1 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-1 com ferramentas de metal-duro.

Observando a Figura 5.1, é possível identificar um comportamento semelhante entre as ferramentas MD-AC-700 e MD-3005 que obtiveram um tempo de vida de 27 e 26,5 minutos, respectivamente. Já a ferramenta MD-3215 teve um comportamento mais estável, alcançando-se um tempo de vida de 29 minutos. Esse tempo é cerca de 10 % maior do que o obtido pelas ferramentas citadas anteriormente. Ainda analisando a Figura 5.1, pode-se perceber um aumento na taxa de desgaste das três ferramentas quase que linear o que indica o enfraquecimento progressivo do gume das ferramentas e a perda do seu revestimento.

Para a comparação dos resultados obtidos nessa liga, utilizou-se os resultados obtidos por Xavier (2003), que utilizou em sua pesquisa os mesmos tipos de ferramentas de corte, exceto a MD-3215, em uma liga contendo baixa nodularização da grafita, em torno de 8%. Nos

referidos experimentos Xavier (2003) obteve tempos de 33 e 43 minutos com as ferramentas denominadas por ele de MD-A e MD-B, respectivamente. Esses tempos de usinagem são em média 40% superiores aos obtidos na usinagem da liga VER-1. Tal diferença elevada deve-se à variação existente entre a dureza e propriedades mecânicas existentes nas ligas, sendo que a liga utilizada por Xavier (2003) possuía as seguintes características: dureza de 236 HB, LR = 506 MPa e LE = 386 MPa).

Para avaliar se as médias entre as ferramentas na usinagem da liga VER-1 são diferentes, foi feita uma análise de variância com confiabilidade de 95%. O teste indica que os tempos de vida das ferramentas são diferentes, porque a condição em que  $F > F_{crit}$  foi cumprida ( $F = 3409 > F_{crit} = 5,05$  entre as ferramentas MD-AC700 e MD-3005,  $F = 885,5 > F_{crit} = 5,05$  entre as ferramentas MD-AC700 e MD-3215 e  $F = 452,12 > F_{crit} = 5,05$  entre as ferramentas MD-3005 e MD-3215).

Para caracterizar o desgaste das ferramentas utilizadas na liga VER-1, foi realizada uma análise de imagens obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). A **Figura 5-2** apresenta as imagens obtidas das três ferramentas utilizadas no experimento.

Observando a Figura 5.2, pode-se dizer que o desgaste ocorreu predominantemente no flanco da ferramenta e a sua causa principal foi a abrasão. Como citado por Stemmer (2005) e Diniz *et al* (1999) e constatado nesta pesquisa, a ação da abrasão se dá em função do atrito na interface peça/ferramenta, do material aderido e das altas temperaturas, que com o passar do tempo vão removendo o revestimento da ferramenta e intensificando a ação sobre o substrato, tanto no flanco como na face da ferramenta. A característica abrasiva e adesiva do material também deve ser levada em consideração na hora de avaliar as causas do desgaste abrasivo na ferramenta de corte. Além das ranhuras verticais de desgaste características da abrasão, pode-se identificar no flanco da ferramenta MD-AC700 (Figura 5.2 (A)) que houve remoção do substrato, lascamento no gume e há aderência de material da peça sobre o gume e flanco da ferramenta de corte. Na ferramenta MD-3005 (Figura 5.2 (B)), observa-se melhor as ranhuras de desgaste abrasivo e, além disso, há remoção do substrato no flanco e lascamentos no gume. E, por fim, na ferramenta MD-3215 (Figura 5.2 (C)), verificou-se também que houve fraturas no gume e presença de material depositado sobre o flanco indicando aderência. Na ferramenta MD-3215, a quantidade de material aderido é bem maior que a observada na ferramenta MD-AC700 na usinagem da liga VER-1.

Dessa forma o desgaste ocorrido nas ferramentas deve-se principalmente à maior dureza e presença de carbonetos duros (cementita) na liga VER-1, que acabaram aumentando a abrasividade do cavaco e, em consequência disso, aumentando a temperatura na região de corte influenciando na usinagem.

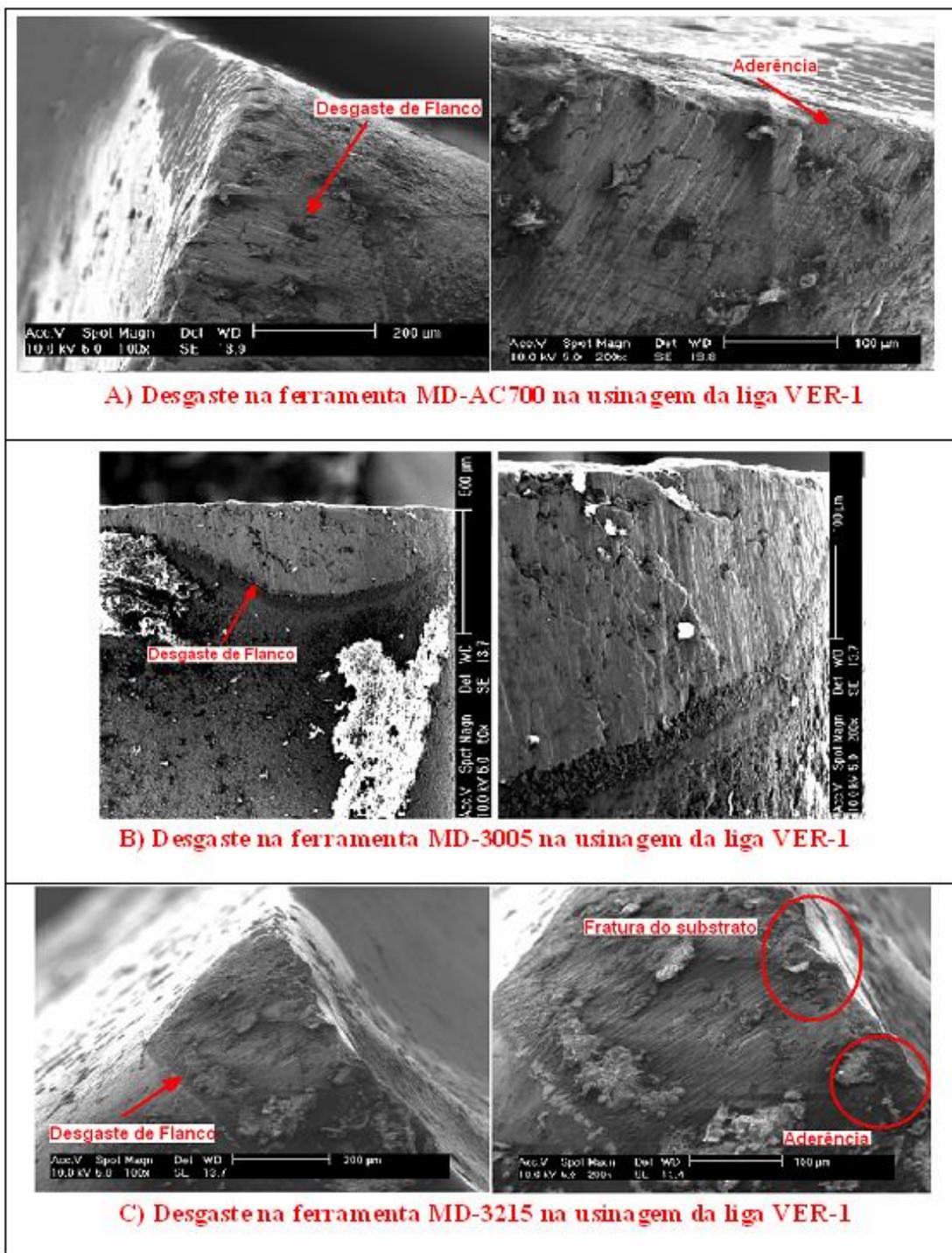


Figura 5-2 Desgaste nas ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-1.

Quanto ao desgaste com menos aderência na ferramenta MD-3005, pode ser associado ao revestimento de TiN, que lhe confere maior proteção contra o desgaste abrasivo, diminuindo o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça. O desgaste ocorrido nas ferramentas é semelhante ao encontrado por Xavier (2003) na usinagem de ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro.

### 5.1.2 Análise da usinabilidade da liga VER-2

Com relação à microestrutura, a liga VER-2 apresentou uma matriz metálica perlítica (96% de perlita e 4% de ferrita) com 74% de grafita vermicular e **26% de grafita nodular**. Nessa liga não foi constatada a presença de carbonetos precipitados, apresentando, em termos de propriedades mecânicas, valores menores do que os da liga VER-1. A diminuição da dureza da superfície para 246 HB e microdureza da perlita para 314 HV está relacionada ao aumento de ferrita na liga, conforme também observado por Reuter et al (2001), que constatou que o aumento da quantidade de perlita na liga induz a um aumento do limite de resistência e dureza. Conseqüentemente, aumentando a quantidade de ferrita, tem-se uma diminuição da quantidade de perlita na liga, porém a ferrita está principalmente envolvendo as grafitas nodulares que aumenta a adesividade da liga. Em termos de propriedades mecânicas, a liga VER-2 apresenta valores de LR = 530 MPa e LE = 394 MPa. Os valores de dureza e microdureza da perlita se mostram coerentes, havendo uma correlação entre eles, e as propriedades mecânicas são proporcionais à dureza.

Para os ensaios de usinabilidade da liga VER-2, foram utilizadas as mesmas condições de corte e ferramentas de metal-duro da liga VER-1.

Assim na usinagem da liga VER-2 com nodularidade de 26%, as ferramentas obtiveram um tempo médio de vida de 31 minutos. Esse tempo é uma média dos tempos das três ferramentas utilizadas no experimento. A **Figura 5-3** mostra a curva média de dois gumes ensaiados para cada ferramenta, usando como critério de fim de vida um desgaste VB de 0,3 mm. O procedimento adotado foi realizar a usinagem utilizando, primeiramente, um gume de cada ferramenta e, em seguida, retomar os experimentos usando um segundo gume de cada ferramenta para confirmar os experimentos.

Analisando a Figura 5.3, pode-se notar um comportamento semelhante entre as ferramentas MD-AC700 e MD-3005 até uns 15 minutos de usinagem da liga VER-2, e após isso ocorre uma intensificação na taxa de desgaste. Já a ferramenta MD-3215 apresenta um comportamento diferente com uma taxa de desgaste mais elevada desde o início dos experimentos. Dessa forma, a ferramenta MD-3215 foi a que mostrou o pior resultado entre as três ferramentas, cerca de 26 minutos, enquanto as ferramenta MD-AC700 e MD-3005 tiveram um tempo de usinagem de 35 e 31 minutos, respectivamente. Essa diferença de aproximadamente 25% da ferramenta MD-3215 para com as outras duas pode estar relacionada ao arrancamento do revestimento da ferramenta ou até mesmo alguma variação na microestrutura do corpo de prova utilizado no experimento que não condiz com a restante do lote produzido.

Os resultados obtidos na usinagem da liga VER-2 com as três ferramentas de metal-duro foram comparados com os obtidos por Xavier (2003). Apesar de serem ligas diferentes, foram utilizadas as mesmas condições de corte e duas das três ferramentas ensaiadas (MD-AC700 E MD-3005).

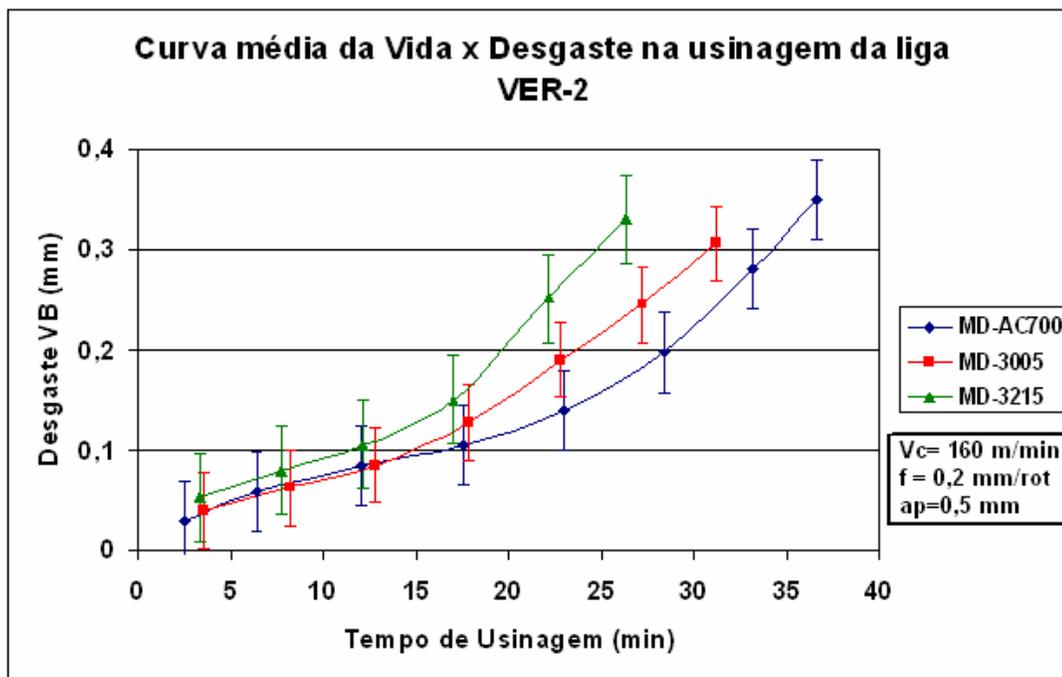


Figura 5-3 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-2 com ferramentas de metal-duro.

Comparando os resultados, a ferramenta MD-AC700 foi 6% superior ao resultado de 33 minutos obtido por Xavier (2003) com a ferramenta MD-B (similar a MD-AC700). Já a ferramenta MD-3005 teve um tempo de vida inferior em 28% ao resultado de 43 minutos obtido com a ferramenta MD-A (similar a MD-3005) e, por fim, a ferramenta MD-3215 teve um tempo de vida inferior, em torno de 35% comparado ao resultado das ferramentas MD-A e MD-B de Xavier. Vale ressaltar aqui o bom resultado da ferramenta MD-AC700, que foi melhor do que o resultado obtido por Xavier (2003) na usinagem da liga VER-2, teoricamente bem mais difícil de usar do que a liga utilizada por Xavier, em função das propriedades mecânicas e nodularidade maiores.

Para verificar se as médias entre as ferramentas na usinagem da liga VER-2 são diferentes, foi feita uma análise de variância com confiabilidade de 95%. O teste indica que os tempos de vida das ferramentas são diferentes, pois a condição  $F > F_{crit}$  foi cumprida ( $F = 139,16 > F_{crit} = 4,28$  entre as ferramentas MD-AC700 e MD-3005,  $F = 74,25 > F_{crit} = 4,28$  entre as ferramentas MD-AC700 e MD-3215 e  $F = 193,02 > F_{crit} = 4,28$  entre as ferramentas MD-

3005 e MD-3215). Para caracterizar o desgaste das ferramentas ensaiadas na liga VER-2, foi realizada uma análise de imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV). A **Figura 5-4** traz as imagens ampliadas das três ferramentas de metal-duro usadas no experimento.

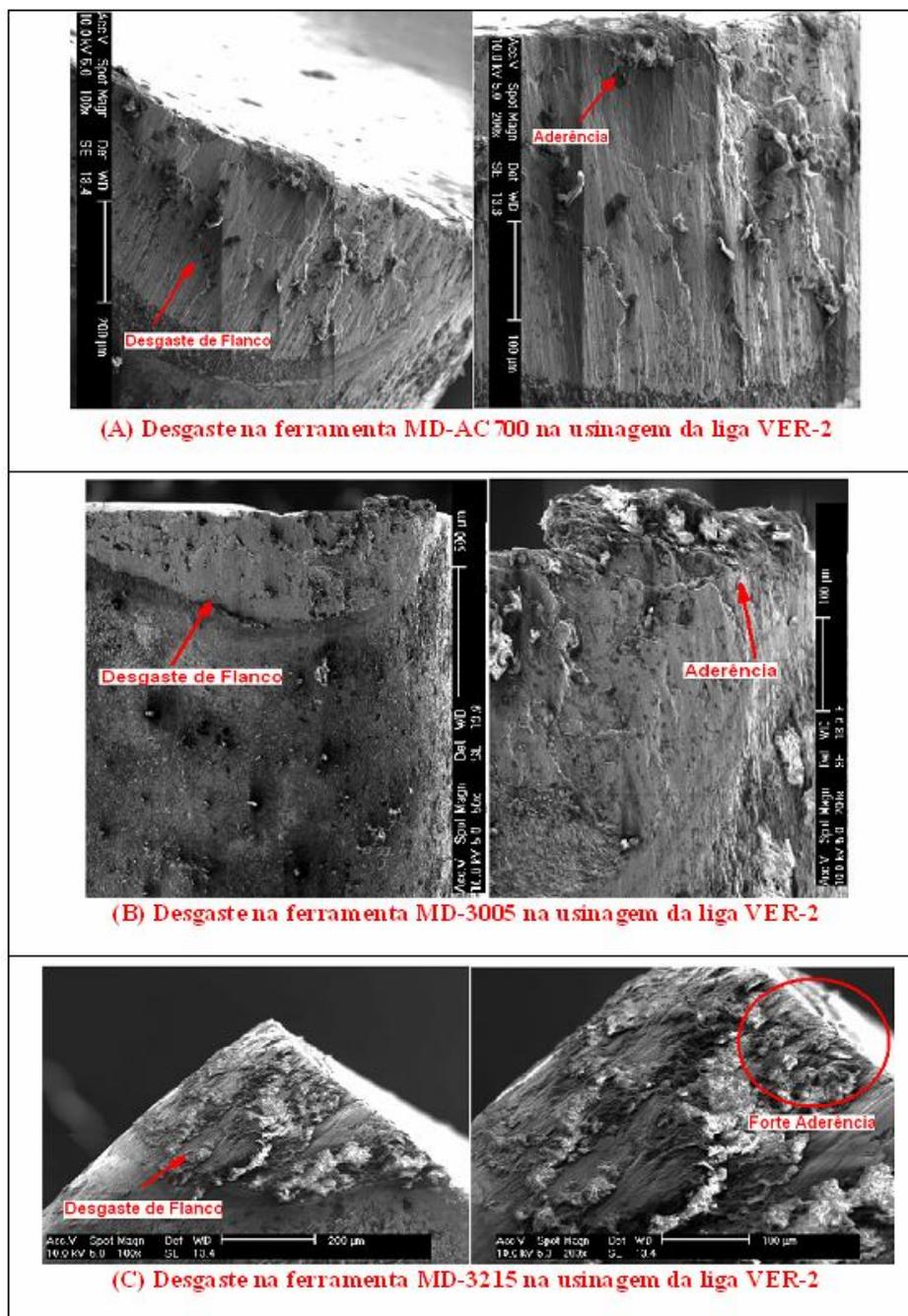


Figura 5-4 Desgaste nas ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-2.

Analisando a Figura 5.4, pode-se concluir que a causa principal do desgaste de flanco nas ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-2 foi a abrasão. A abrasão foi identificada pelas ranhuras verticais de desgaste presentes em cada ferramenta.

Na Figura 5.4 (A), além do desgaste abrasivo, pode-se identificar também algumas pequenas fraturas e aderência de material sobre o gume da ferramenta MD-AC700. Na Figura 5.4 (B), é possível identificar também a abrasão e, além disso, verifica-se que houve aderência de material da peça deformado sobre o gume e a face da ferramenta, bem como fraturas do substrato no gume da ferramenta MD-3005. Na Figura 5.4 (C), além da abrasão e da remoção do substrato na face da ferramenta, fica evidente a aderência do material usinado sobre o gume e a face da ferramenta MD-3215. O desgaste descrito acima ocorrido nas ferramentas é semelhante ao encontrado por Xavier (2003), que, na usinagem de ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, observou a ação do desgaste por abrasão e aderência.

Nas três ferramentas foi observada uma forte aderência além da abrasão, o que também indica a possibilidade de ter ocorrido um desgaste por adesão (ou *attrition*). Ademais a elevada aderência vista na ferramenta MD-3215, assim como seu desempenho aquém das outras duas ferramentas, pode ser relacionado a algum problema com o revestimento da ferramenta, que não mostrou o desempenho esperado ou até mesmo alguma variação na microestrutura do corpo de prova utilizado.

Na usinagem da liga VER-2, tem-se uma diminuição da abrasividade do cavaco devido à diminuição da dureza resultante da diminuição da perlita na liga e não constatação da presença de carbonetos, mas, em contrapartida, tem-se a influência do aumento da nodularidade na formação do cavaco. Isso faz com que ocorra um aumento da adesão do cavaco sobre a ferramenta, ficando mais difícil de ser quebrado, dificultando a usinagem.

### 5.1.3 Análise da usinabilidade da liga VER-3

Com relação à microestrutura, a liga VER-3 apresentou uma matriz metálica perlítica (95% de perlita e 5% de ferrita) com 64% de grafita vermicular e **36% de grafita nodular**. Nessa liga não foi constatada a presença de carbonetos segregados, apresentando em termos de propriedades mecânicas, valores menores do que os das ligas VER-1 e VER-2. A diminuição da dureza da superfície para 244 HB e microdureza da perlita para 297 HV está associada ao aumento de ferrita na liga, conforme observado por Reuter et al (2001). Em termos de propriedades mecânicas, a liga VER-3 apresenta valores de LR = 497 MPa e LE = 377 MPa. Os valores de dureza e microdureza da perlita se mostram coerentes, havendo uma correlação entre eles e as propriedades mecânicas estão proporcionais à dureza. Mantendo-se as mesmas condições de corte utilizadas nas liga anteriores, foram realizados os ensaios de usinagem da liga VER-3, com as três ferramentas de metal-duro.

Nesse caso na usinagem da liga VER-3 com um aumento significativo da nodularidade para 36%, as ferramentas obtiveram um tempo médio de vida de 34 minutos. Esse tempo é

uma média dos tempos das três ferramentas usadas no experimento. A **Figura 5-5** mostra a curva média de dois gumes ensaiados para cada ferramenta, utilizando como critério de fim de vida um desgaste VB de 0,3 mm.

Analisando a Figura 5.5, pode-se observar que o comportamento do desgaste das ferramentas é semelhante até um tempo de usinagem em torno de 17 minutos, após isso, a ferramenta MD-3215 tem uma intensificação na taxa de desgaste. Considera-se que esse resultado é provavelmente devido ao enfraquecimento e perda do revestimento, comprometendo o substrato, cujas propriedades mecânicas são inferiores as do revestimento.

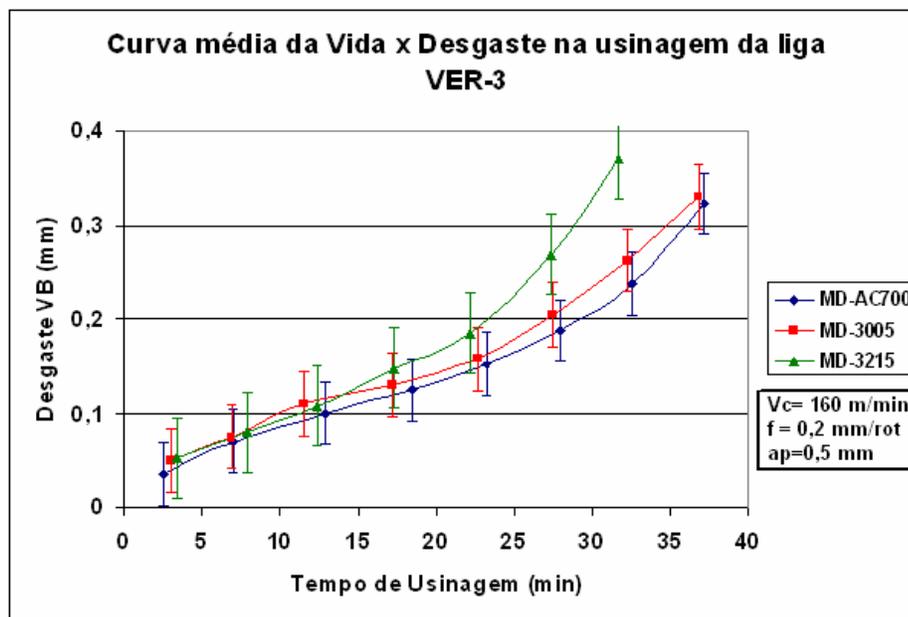


Figura 5-5 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-3 com ferramentas de metal-duro.

O melhor resultado, observando a Figura 5.5, é obtido com a ferramenta MD-AC700, que teve um tempo médio de vida de 37 minutos, seguido pela ferramenta MD-3005, com 35 minutos (tempo 6% inferior), e, por fim, a ferramenta MD-3215, com um tempo de 30 minutos (cerca de 15% inferior à ferramenta MD-3005 e 20% inferior à ferramenta MD-AC700).

Como realizado na liga VER-2, foram comparados os resultados da usinagem da liga VER-3 com 36% de nodularidade com os resultados obtidos por Xavier (2003), mesmo sendo as ligas diferentes e com variações de nodularidade tem-se o fator ferramenta de corte e condições de corte que são semelhantes. A ferramenta MD-AC700, nessas condições de ensaio, teve um tempo de vida 12% maior do que o obtido por Xavier (2003) com a ferramenta MD-B (igual à ferramenta MD-AC700). Já a ferramenta MD-3005 teve um tempo de vida 16% inferior ao obtido por Xavier com a ferramenta MD-A (igual à ferramenta MD-

3005), e, por fim, a ferramenta MD-3215 foi a que teve o menor tempo de vida, 30% menor comparado à ferramenta MD-A e 20% menor comparado à ferramenta MD-B utilizadas por Xavier. O resultado da ferramenta MD-AC700 na usinagem da liga VER-3 novamente é superior aos resultados obtidos por Xavier com a mesma ferramenta, mesmo a liga VER-3 possuindo propriedades mecânicas superiores.

Para caracterizar o desgaste das ferramentas ensaiadas na liga VER-3, foi realizada uma análise de imagens obtidas através de MEV. A **Figura 5-6** traz as imagens ampliadas do desgaste ocorrido nas três ferramentas de metal-duro.

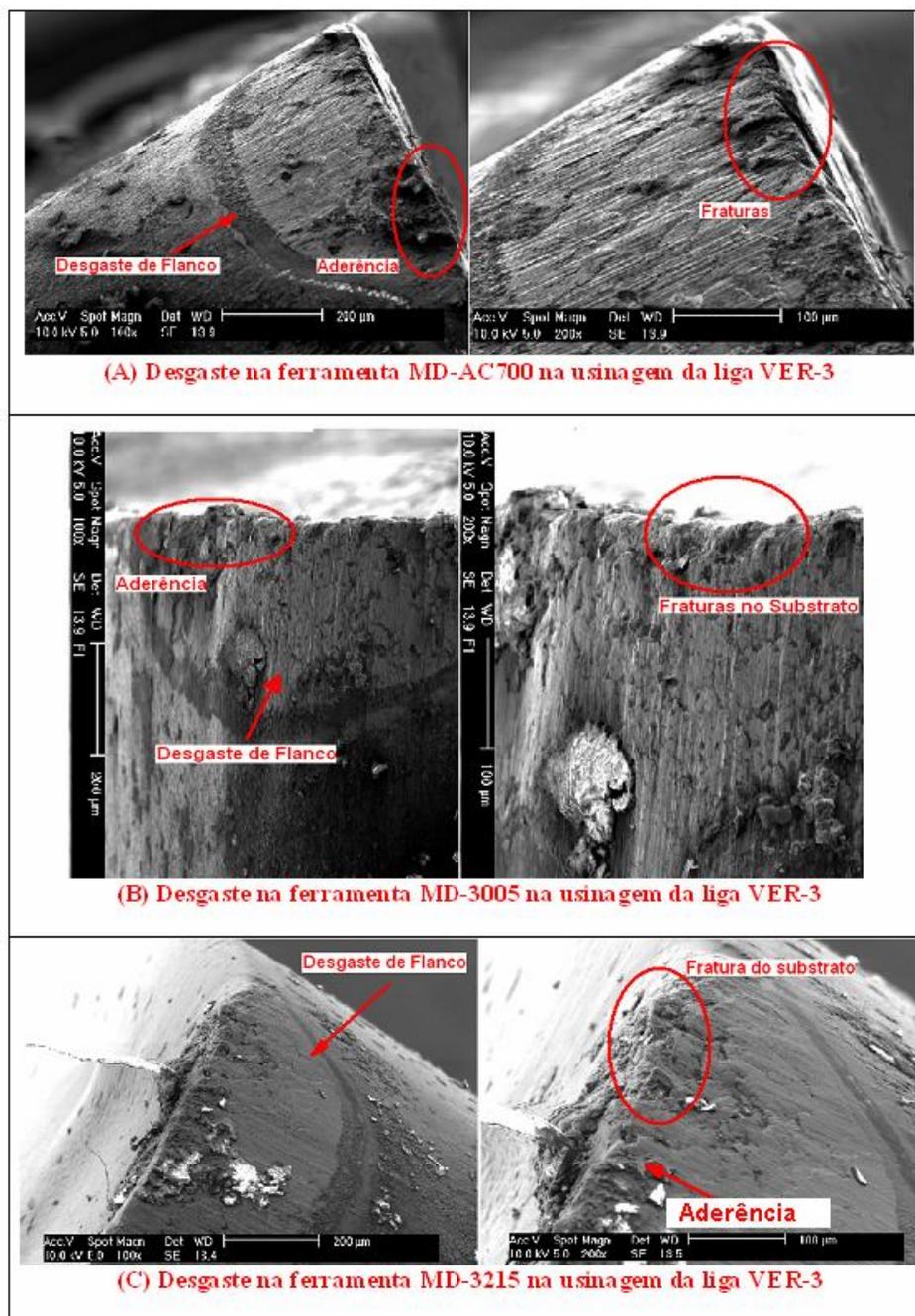


Figura 5-6 Desgaste nas ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-3.

Para constatar se as médias entre as ferramentas na usinagem da liga VER-3 são diferentes, foi feita uma análise de variância com confiabilidade de 95%. O teste indica que os tempos de vida das ferramentas são diferentes, pois a condição  $F > F_{crit}$  foi cumprida ( $F = 771,577 > F_{crit} = 3,78$  entre as ferramentas MD-AC700 e MD-3005,  $F = 112,83 > F_{crit} = 4,28$  entre as ferramentas MD-AC700 e MD-3215 e  $F = 106,44 > F_{crit} = 4,28$  entre as ferramentas MD-3005 e MD-3215).

Analisando a Figura 5.6, pode-se dizer que a causa principal do desgaste de flanco nas ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-3 foi a abrasão. A abrasão foi identificada pelas ranhuras verticais características desse tipo de desgaste presentes no flanco de cada ferramenta.

Na Figura 5.6 (A), é possível observar um forte desgaste por abrasão e o gume da ferramenta bastante avariado por pequenas fraturas, atingindo inclusive o substrato. Visualmente pode-se também identificar a presença de material aderido sobre a face da ferramenta, indicando desgaste por adesão (ou *attrition*).

Na Figura 5.6 (B) também ocorre um forte desgaste por abrasão com avarias no gume da ferramenta por pequenas fraturas no substrato. Visualmente pode-se identificar material da peça aderido no gume e face da ferramenta, indicando também o desgaste por adesão.

E, por fim, na Figura 5.6 (C) identificam-se, além do desgaste por abrasão, fraturas no gume da ferramenta e aderência tanto na face como na superfície de saída da ferramenta, indicando também a possibilidade de ter ocorrido desgaste por adesão (ou *attrition*).

O desgaste ocorrido nas ferramentas é semelhante ao encontrado por Xavier (2003), que na usinagem de ferro fundido vermicular também observou o mecanismo de desgaste como abrasão, porém em menor intensidade.

Na usinagem da liga VER-3, constata-se uma intensificação no desgaste por abrasão nas ferramentas de corte, indicando um aumento da temperatura na região de contato entre peça e ferramenta. O aumento da temperatura está ligado ao aumento da nodularidade da liga. A maior nodularização aumenta a adesão do cavaco tornando-o mais difícil de quebrar, isso gera um aumento do tempo de contato do cavaco com a ferramenta, levando a um aumento na temperatura de corte, dificultando a usinagem.

Nesse caso, o revestimento em cada ferramenta tem um papel importante no resultado final, como é o caso das ferramentas MD-AC700 e MD-3005, que obtiveram os melhores resultados na usinagem da liga VER-3.

#### 5.1.4 Comparativo da usinabilidade entre as ligas VER-1, VER-2 e VER-3

Em termos microestruturais, a liga VER-1 possui a menor quantidade de grafita nodular (6%) quando comparada à liga VER-2 (26%) e à liga VER-3 (36%). Quanto à matriz metálica, nas três ligas é perlítica, com variação na quantidade de ferrita (2%, 4%, 5% para as ligas VER-1, VER-2 e VER-3, respectivamente). Além da variação na grafita e ferrita, a liga VER-1 possui mais uma diferença importante para com as outras ligas, que é a presença de 1% de carbonetos precipitados na matriz metálica, o que lhe conferiu propriedades superiores, mas que, em contra-partida, diminuiu a usinabilidade e aumentou a abrasividade do cavaco sobre as ferramentas de metal-duro.

Com relação à dureza da superfície e microdureza da perlita, os maiores valores foram vistos na liga VER-1, diminuindo entre as ligas VER-2 e VER-3. Em termos de propriedades mecânicas, a diferença entre as ligas é pequena, sendo que o maior valor encontrado foi na liga VER-1, decrescendo entre as outras duas ligas.

As diferenças, em termos microestruturais observadas entre as ligas, contrariam pesquisadores como Sergeant e Evans, (1978); Guessier, Duran, Krause, (2004); Dawson et al, (2004), que dizem que o aumento da nodularização da grafita na microestrutura do ferro fundido vermicular aumenta a resistência à tração e rigidez, diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica. Porém, essa diferença maior na liga VER-1 pode ser explicada em função da presença de carbonetos precipitados e maior quantidade de perlita. Já a diminuição das propriedades, em termos de dureza e resistência nas ligas VER-2 e VER-3, pode ser explicada pela eliminação dos carbonetos e pelo aumento de ferrita na matriz metálica.

Verificando os tempos médios de usinagem das três ferramentas, o melhor resultado foi obtido na usinagem da liga VER-3, cerca de 34 minutos. Já na usinagem da liga VER-2, o tempo médio de usinagem das três ferramentas cai para 31 minutos, em torno de 10% menor. Na usinagem da liga VER-1, o tempo médio das três ferramentas cai para 27,5 minutos, 13% menor do que o obtido na liga VER-2 e 24% menor do que o tempo obtido na usinagem da liga VER-3. Na **Figura 5-7**, é apresentada uma comparação do resultado individual de cada ferramenta na usinagem da cada uma das ligas de ferro fundido vermicular.

Analisando a Figura 5.7, nota-se que, na usinagem da liga VER-3, foram obtidos os melhores resultados em termos de vida de ferramenta, sendo que a ferramenta MD-AC700 obteve 37 minutos de usinagem, seguida pela ferramenta MD-3005, com 35 minutos (tempo 6% menor ao da ferramenta MD-AC700), e pela ferramenta MD-3215, com 30 minutos (tempo 19% menor ao da ferramenta MD-AC700).

Na usinagem da liga VER-2, a ferramenta MD-AC700 novamente obteve o melhor tempo de vida com, 35 minutos, posteriormente a ferramenta MD-3005, com 31 minutos (tempo

11% menor ao da ferramenta MD-AC700), e, por fim, a ferramenta MD-3215, com 26 minutos (tempo 25% menor ao da ferramenta MD-AC700).

Já na usinagem da liga VER-1, foram obtidos os menores e mais próximos tempos de vida de ferramenta, com a ferramenta MD-3215 obtendo um tempo de 29 minutos, seguida pela ferramenta MD-AC700, com 27 minutos (tempo 7% menor ao da ferramenta MD-3215) e pela ferramenta MD-3005, com 26,5 minutos (tempo 10% menor ao da ferramenta MD-3215). Esses tempos de vida mais baixos estão associados aos carbonetos e à maior dureza observada na liga VER-1.

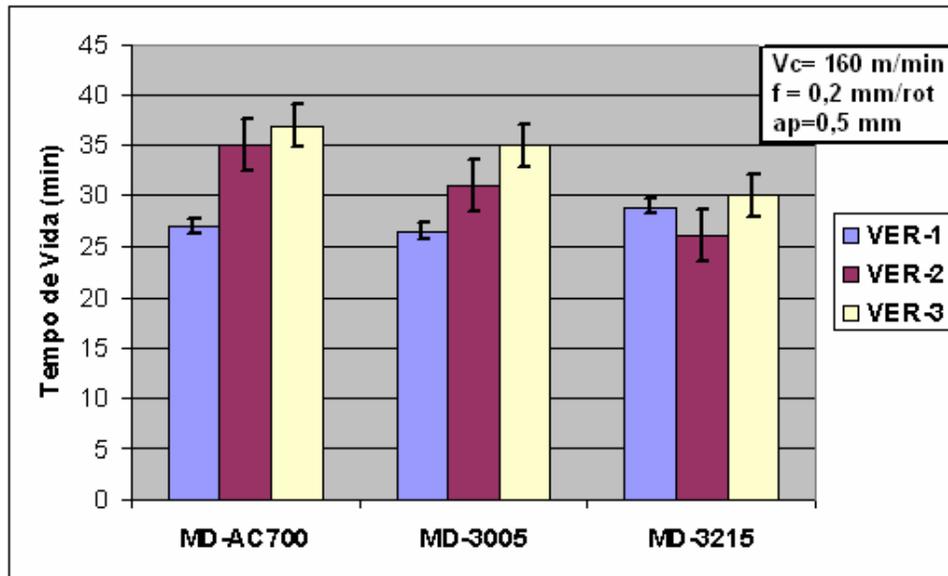


Figura 5-7 Comparativo da usinabilidade entre as ligas VER-1, VER-2 e VER-3.

No geral, a ferramenta MD-AC700 pode ser considerada a melhor ferramenta na usinagem das três ligas de ferro fundido vermicular, seguida pela ferramenta MD-3005. Já a ferramenta MD-3215 não mostrou resultados muito expressivos principalmente na usinagem da liga VER-2. Algumas prováveis causas para esse desempenho aquém das outras ferramentas podem ser o arrancamento do revestimento da ferramenta ou até mesmo alguma variação na microestrutura do corpo de prova utilizado no experimento que não condiz com a restante do lote produzido. As diferenças nos resultados das ferramentas de metal-duro no geral estão relacionadas a variações na temperatura e variações no tipo de revestimento. Outro fator que justifica a o melhor desempenho da ferramenta MD-AC700 pode ter sido devido que as ferramentas MD-3005 e MD-3215 possuíam aresta alisadora, o que gera maior calor em função do maior contato (atrito) com a peça, acelerando o desgaste nestas ferramentas.

Quanto ao desgaste ocorrido nas ferramentas, foi provocado, sobretudo por abrasão tanto na usinagem da liga VER-1, como na VER-2 e na VER-3. Além da abrasão, foi observada de

forma significativa a aderência de material da peça nas ferramentas e fraturas em seu gume e face. A aderência observada nestas ferramentas é um forte indicativo da presença de desgaste por adesão (ou *attrition*).

Na liga VER-1, tem-se um cavaco mais abrasivo atuando sobre as ferramentas devido à presença de carbonetos precipitados e maior dureza da liga. Com a eliminação dos carbonetos e a diminuição da dureza nas ligas VER-2 e VER-3, há o fator aumento da nodularidade atuando sobre a usinagem. Agora tem-se uma intensificação do desgaste, pois a nodularização aumenta a adesão do cavaco tornando-o mais difícil de quebrar, isso gera um aumento do tempo de contato do cavaco com a ferramenta, implicando a elevação na temperatura de corte, fator esse essencial para o desgaste por abrasão.

O desgaste ocorrido nas ferramentas de metal-duro na usinagem das três ligas condiz com o observado na literatura para a usinagem desse tipo de material.

## **5.2 Análise da usinabilidade das ligas com ferramentas de cerâmica**

Neste subcapítulo, serão primeiramente apresentados os resultados da usinagem das três ligas de ferro fundido vermicular com uma ferramenta comercial de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), revestida com óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e nitreto de titânio ( $\text{TiN}$ ) respectivamente. Serão também exibidos os resultados de ferramentas cerâmicas mistas de óxido de alumínio com carboneto de nióbio e óxido de ítria produzidas pelo IPEN, utilizadas na usinagem das ligas VER-1 e VER-3.

### **5.2.1 Análise da usinabilidade das ligas com a ferramenta CER-NS260 comercial**

Para a realização dos experimentos com a ferramenta cerâmica CER-NS260, foi utilizada velocidade de corte de 200 m/min e mantidos avanço de 0,2 mm e profundidade de corte de 0,5 mm usados nos experimentos anteriores com as ferramentas de metal-duro.

Os resultados obtidos com a ferramenta CER-NS260, na usinagem das três ligas, encontra-se na **Figura 5-8**. As curvas na Figura são uma média de dois gumes utilizados para cada liga ensaiada, de modo a garantir maior precisão nos resultados.

Analisando a Figura 5.8, pode ser constatado que não houve uma variação grande nos resultados da ferramenta CER-NS260 em termos de tempo de usinagem. Na usinagem das ligas VER-1 e VER-2, a ferramenta obteve um tempo de 6 minutos de usinagem, e na liga VER-3, um tempo de 5 minutos.

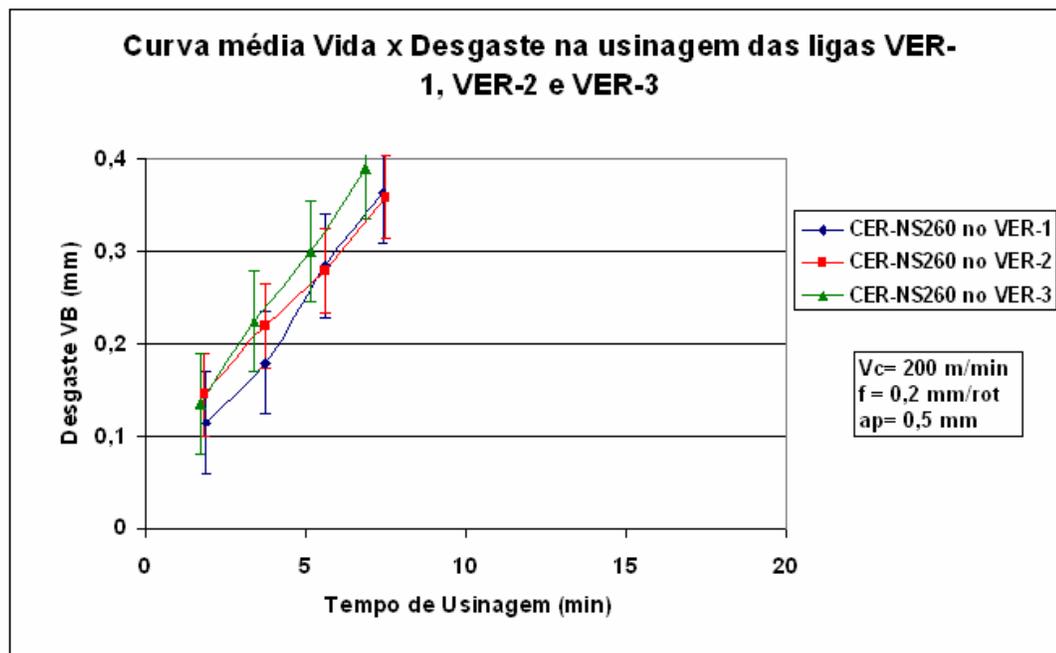


Figura 5-8 Curva de vida x desgaste na usinagem das ligas VER-1, VER-2 e VER-3 com ferramentas CER-NS260.

A taxa de desgaste da ferramenta também mostra um comportamento semelhante entre as três ligas, iniciando após os primeiros minutos de usinagem com um desgaste VB entre 0,12 e 0,15 mm e atingindo o desgaste de 0,3 mm após alguns passes. Foi observado também, para as três ligas de ferro fundido vermicular, que após o primeiro passe de usinagem no momento da medição do desgaste, o revestimento já não mais estava recobrendo o gume da ferramenta.

Xavier (2003), em seus experimentos, também utilizou dessa mesma classe de ferramenta cerâmica e das mesmas condições de corte para a realização de seus experimentos de torneamento em ferro fundido vermicular. As propriedades do material utilizado por Xavier estão enunciadas no subcapítulo 2.3.4, informações essas usadas também para a comparação dos resultados obtidos com as ferramentas de metal-duro na usinagem das ligas VER-1, VER-2 e Ver-3. Em comparação com o tempo de 10 minutos obtido por Xavier (2003), os resultados na usinagem das três ligas com a CER-NS260 são em média 60% inferiores. Outros pesquisadores, como Leuze (2000) e Reuter (2000), obtiveram resultados melhores que os da ferramenta CER-NS260, no entanto usinando uma liga de ferro fundido vermicular com nodularidade de 8% e diferenças em termos de condições de corte.

Para constatar se as médias entre as ferramentas na usinagem das ligas VER-1, VER-2 e VER-3 são diferentes, foi feita uma análise de variância com confiabilidade de 95%. O teste indica que não há diferença significativa entre os tempos de vida da ferramenta CER-NS260, pois a condição  $F < F_{crit}$  foi cumprida ( $F = 3,448 < F_{crit} = 18,512$  entre as ligas VER-1 e

Ver-2,  $F = 4,076 < F_{crit} = 18,512$  entre as ligas VER-1 e VER-3 e  $F = 3,416 < F_{crit} = 18,512$  entre as ligas VER-2 e VER-3).

Para caracterizar o desgaste da ferramenta CER-NS260 na usinagem das três ligas, foi realizada uma análise de imagens obtidas através de MEV. A **Figura 5-9** traz as imagens ampliadas do desgaste ocorrido em tal ferramenta.

Analisando as imagens, pode-se perceber que o desgaste da ferramenta CER-NS260 na usinagem das três ligas é semelhante, onde ocorreu desgaste de flanco e de cratera no gume e face da ferramenta.

Nas imagens da Figura 5.9 (A), (B) e (C), vê-se no interior das crateras e na região desgastada mais afastada do gume que houve um desgaste por abrasão. É importante salientar também que o aspecto do desgaste na face e no flanco da ferramenta é bastante diferente quando comparado aos anteriores das ferramentas de metal-duro. Isso por si só indica que há a presença de desgaste por difusão. O aspecto mais liso do desgaste e a cratera formada também indicam a presença da difusão. Esse desgaste se dá quando ocorre a remoção do revestimento da ferramenta, e a mesma fica com o substrato exposto e suscetível a ação de reações triboquímicas causadas pelo aumento da temperatura na região de corte. Para se ter certeza se ocorreu mesmo o desgaste por difusão, seria necessária uma investigação mais detalhada por meio de uma análise química por EDS.

As características das três ligas, de mais abrasiva em função dos carbonetos e maior dureza da liga VER-1, e pelo aumento do tempo de adesão do cavaco na ferramenta por causa da maior nodularidade das ligas VER-2 e VER-3, influenciaram diretamente no tempo de vida e forma do desgaste da ferramenta CER-NS260.

Xavier (2003), na usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta cerâmica de nitreto de silício, observou o mesmo comportamento de desgaste associando a abrasão e a difusão.

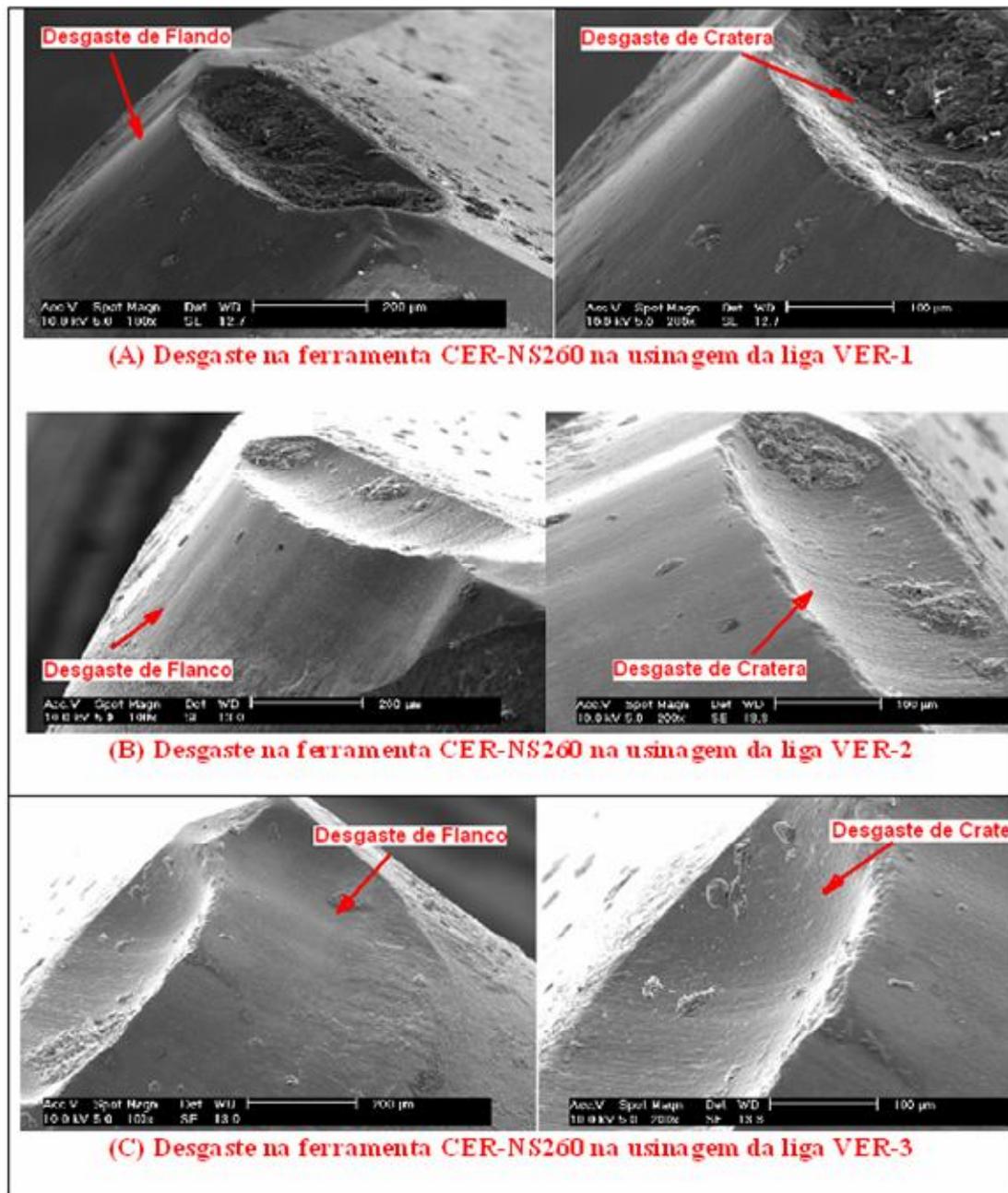


Figura 5-9 Desgaste da ferramenta CER-NS260 na usinagem das ligas VER-1, VER-2 e VER-3.

Comparando os resultados obtidos com a ferramenta CER-NS260 com os resultados das ferramentas de metal-duro, observa-se uma redução bastante significativa na vida da cerâmica, cerca de 6 vezes menor que a do metal-duro. O mecanismo de corte entre as ferramentas também difere um do outro, sendo que na cerâmica tem-se um desgaste maior por difusão enquanto que nos metais-duros tem um desgaste predominantemente abrasivo.

## **5.2.2 Análise da usinabilidade das ligas com as cerâmicas produzidas pelo IPEN**

Atualmente, as cerâmicas têm grande importância como material de corte de geometria definida, sendo principalmente as cerâmicas à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (Nitreto de silício), pelas suas características de resistência a choques térmicos e tenacidade, e as cerâmicas óxidas mistas à base de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio), que possuem características como baixo coeficiente de atrito entre inserto e cavaco, além de alta resistência ao desgaste.

Na usinagem de ferro fundido vermicular, as cerâmicas ainda mostram resultados inferiores aos obtidos com ferramentas como metal-duro, em especial em velocidades de corte mais baixas. Por isso, são necessárias mais pesquisas relacionadas às ferramentas cerâmicas com o objetivo de melhorar seu desempenho na usinagem de materiais mais abrasivos com ferro fundido vermicular.

Em virtude disso, neste trabalho foram testadas algumas composições novas de cerâmica óxida mista à base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carboneto de nióbio (NbC) e óxido de ítria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), produzidas pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). As ferramentas foram produzidas na geometria redonda e não estão disponíveis ainda para fins comerciais. Os experimentos foram realizados nas ligas VER-1 e VER-3 com quatro composições de ferramentas, sendo uma delas revestida com nitreto de titânio-alumínio (TiAlN). O revestimento foi aplicado pela empresa Balzers do Brasil S.A. Os parâmetros de corte foram os mesmos utilizados para a ferramenta CER-NS260, sendo velocidade de 200m/min, avanço de 0,2mm e profundidade de corte de 0,5mm, com o intuito de comparar os resultados obtidos, com os da ferramenta comercial CER-NS260.

Vale aqui ressaltar a dificuldade encontrada na realização dos ensaios. Devido à geometria das ferramentas ser redonda, o posicionamento das mesmas no suporte após a medição do desgaste torna-se mais difícil. A referência utilizada para o posicionamento foi a marca deixada pelo suporte na ferramenta de corte. Porém, mesmo com as dificuldades de medição e fixação das ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN, os resultados foram bastante expressivos e confiáveis.

### **5.2.2.1 Análise da usinabilidade da liga VER-1 com as cerâmicas produzidas pelo IPEN**

Na usinagem da liga VER-1, foram obtidos resultados expressivos com as ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN. A liga utilizada possuía como principal característica a nodularidade de 6% e propriedades mecânicas superiores em função dos carbonetos segregados e da maior dureza da superfície e microdureza da perlita presentes na liga. Tais características tornam o cavaco da liga VER-1 mais abrasivo, dificultando a usinagem desse material.

Nos experimentos, as ferramentas obtiveram um tempo médio de usinagem significativo de 13,3 minutos. Esse tempo representa a média dos resultados obtidos entre quatro ferramentas cerâmicas ensaiadas. Na **Figura 5-10**, são apresentadas as curvas médias em termos de tempo de usinagem e desgaste de flanco de dois gumes ensaiados para cada ferramenta cerâmica utilizada. O critério de fim de vida adotado para as ferramentas é o mesmo adotado para os ensaios anteriores de um  $VB = 0,3$  mm.

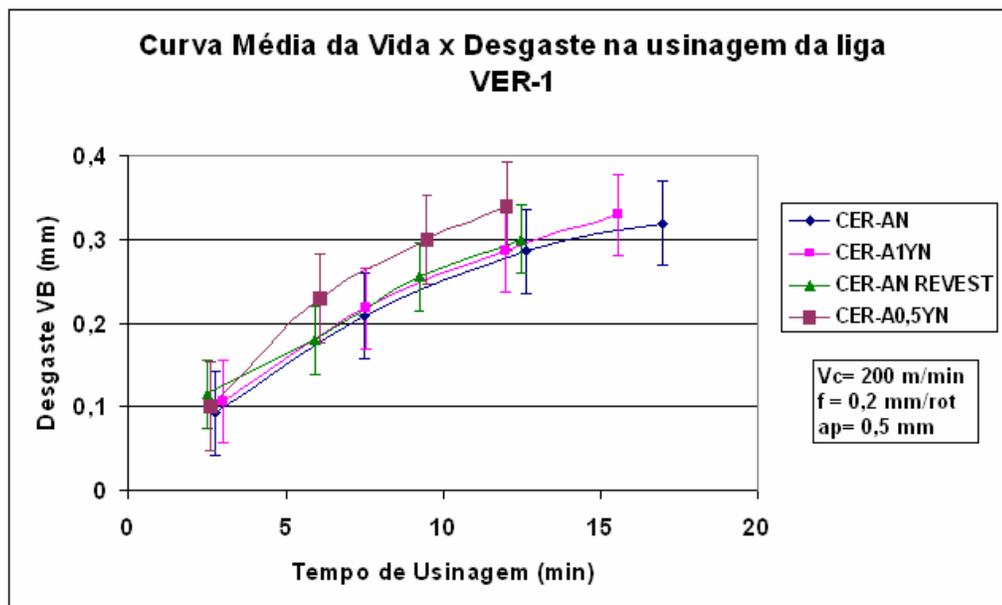


Figura 5-10 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-1 com ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN.

Analisando a Figura 5.10, pode-se observar um comportamento do desgaste semelhante entre as ferramentas CER-AN, CER-AN Revestida e CER-A1YN. Já a ferramenta CER-A0,5YN possui uma taxa de desgaste maior que as outras ferramentas, apesar de inicialmente todas as ferramentas mostrarem um desgaste de aproximadamente 0,1 mm.

O melhor resultado, em termos de tempo de vida, foi obtido pela ferramenta CER-AN, com 16 minutos. A Ferramenta CER-A1YN obteve um tempo de 14 minutos (12% menor que a CER-AN) e a ferramenta CER-AN Revestida obteve um tempo de 13 minutos (19% menor que a CER-AN). Já a ferramenta CER-A0,5YN foi a que obteve o menor tempo de vida entre as quatro, com um tempo de 10 minutos, cerca de 37% inferior ao obtido pela ferramenta CER-AN.

Como não foram encontrados trabalhos na bibliografia que abordam a usinagem de ferro fundido vermicular com ferramentas à base de óxido de alumínio, os resultados, em termos de tempo de usinagem médio entre as quatro ferramentas (tempo de 13,3 minutos), foi comparado com os resultados obtidos por Xavier (2003) utilizando cerâmicas de nitreto de silício (o maior tempo obtido por Xavier foi de 10 minutos com a ferramenta CER-B).

Nesse caso, as cerâmicas produzidas pelo IPEN mostraram um ganho no tempo de usinagem de 25% comparando ao resultado obtido por Xavier. A maior diferença foi obtida com a ferramenta CER-AN, com um ganho de 38%, e o pior resultado foi obtido com a ferramenta CER-A0,5YN, que se igualou ao resultado obtido por Xavier (2003).

Vale assinalar que os resultados obtidos pelas cerâmicas produzidas pelo IPEN foram expressivos mesmo usinando a liga VER-1, que apresenta características que diminuem sua usinabilidade.

Para verificar se as médias entre as ferramentas na usinagem da liga VER-1 são diferentes, foi feita uma análise de variância com confiabilidade de 95%. O teste indica que os tempos de vida das ferramentas CER-AN, CER-AN Revestida e CER-A1YN são diferentes do tempo de vida da ferramenta CER-A0,5YN, pois a condição  $F > F_{crit}$  foi atendida ( $F = 10,782 > F_{crit} = 10,127$  entre as ferramentas CER-AN e CER-A0,5YN,  $F = 18,132 > F_{crit} = 10,127$  entre as ferramentas CER-AN Revestida e CER-A0,5YN e  $F = 16,188 > F_{crit} = 10,127$  entre as ferramentas CER-A1YN e CER-A0,5YN).

O teste aponta também que os tempos de vida das ferramentas CER-AN, CER-AN Revestida e CER-A1YN podem ser considerados como sendo iguais, onde a condição  $F < F_{crit}$  foi atendida ( $F = 6,687 < F_{crit} = 10,127$  entre as ferramentas CER-AN e CER-AN Revestida,  $F = 1,419 < F_{crit} = 10,127$  entre as ferramentas CER-AN e CER-A1YN e  $F = 9,048 < F_{crit} = 10,127$  entre as ferramentas CER-A1YN e CER-AN Revestida).

Para caracterizar o desgaste das ferramentas ensaiadas na liga VER-1, foi efetuada uma análise de imagens obtidas através de MEV. A **Figura 5-11** mostra as imagens ampliadas do desgaste ocorrido nas quatro ferramentas de cerâmica produzidas pelo IPEN.

Em geral, os mecanismos de desgaste das ferramentas na usinagem da liga VER-1 foram a abrasão, a aderência, fraturas e possivelmente difusão.

Na Figura 5.11 (A), verifica-se um desgaste abrasivo no flanco da ferramenta CER-AN, causado pelo aumento da abrasividade na liga VER-1, em função dos carbonetos e maior dureza. Outro fator que pode ter causado a abrasão foi um desgaste por adesão, onde o arrancamento de grãos da própria ferramenta cerâmica é que promove a abrasão. Ocorreu também na ferramenta desgaste de cratera, o que indica ter havido reações triboquímicas entre a ferramenta e o material mais abrasivo da peça, induzidas pelo aumento na temperatura. Essa característica do desgaste indica ter ocorrido difusão. Entre o desgaste de cratera e o de flanco, observa-se também que houve perda do gume da ferramenta devido à cratera se formar muito próxima do gume da ferramenta.

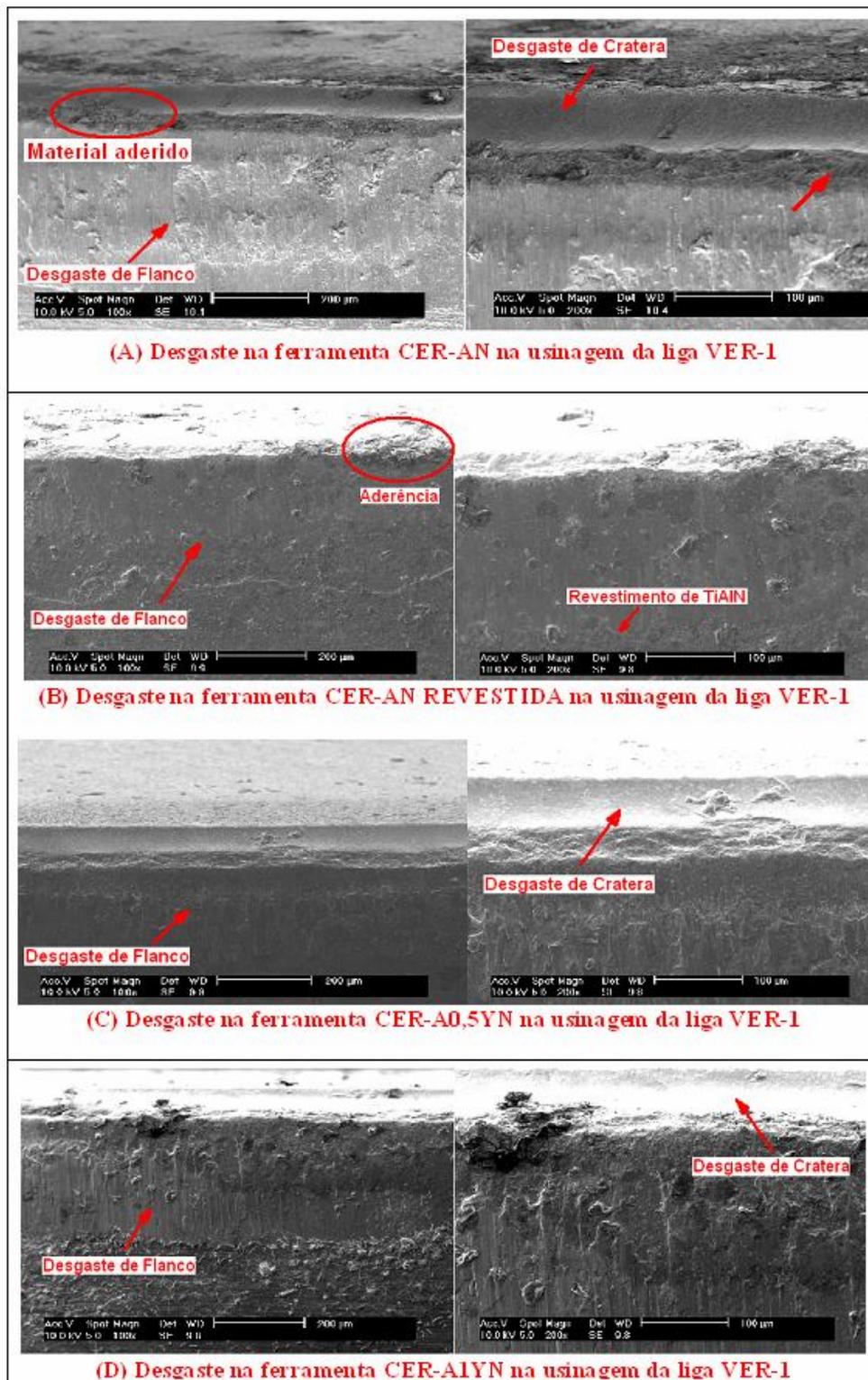


Figura 5-11 Desgaste nas ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN na usinagem da liga VER-1.

Na ferramenta CER-AN Revestida (Figura 5.11 (B)), os mecanismos de desgaste foram os mesmos ocorridos na ferramenta CER-AN. Houve também a aderência de material da peça no gume da ferramenta. O menor tempo de usinagem na liga VER-1 em relação à ferramenta

CER-AN e desgastes semelhantes mostra que o revestimento aplicado na ferramenta CER-AN revestida não teve o rendimento esperado. Isso leva a crer que o revestimento de TiAlN não teve uma boa aderência ao substrato da ferramenta, sendo removido logo nos primeiros passes de usinagem.

Nas ferramentas CER-A0,5YN (Figura 5.11 (C)) e CER-A1YN (D), o desgaste não difere das demais ferramentas, sendo abrasivo no flanco, desgaste de cratera possivelmente provocado por difusão e fraturas com forte aderência causando o arrancamento do gume da ferramenta.

Os mecanismos de desgaste nas cerâmicas de óxido de alumínio com carboneto de nióbio e óxido de ítria são semelhantes aos observados por autores como Scour et al (2004) e Kumar et al (2005) que usinaram aço ligado, porém o desgaste nas cerâmicas ocorreu de forma menos intensa.

#### **5.2.2.2 Análise da usinabilidade da liga VER-3 com as cerâmicas produzidas pelo IPEN**

Na usinagem da liga VER-3, foram obtidos resultados novamente expressivos quando comparados aos obtidos pela cerâmica comercial na usinagem da mesma liga. A principal característica da liga VER-3 é a nodularidade de 36%, que interfere diretamente na formação do cavaco, aumentando o seu tempo de contato com a ferramenta, aumentando a temperatura e, conseqüentemente, dificultando a usinagem.

Na usinagem da liga VER-3, as ferramentas obtiveram um tempo médio de usinagem de 9,5 minutos. Esse tempo representa a média dos resultados obtidos entre quatro ferramentas cerâmicas ensaiadas. Na **Figura 5-12**, são apresentadas as curvas médias em termos de tempo de usinagem e desgaste de flanco de dois gumes ensaiados para cada ferramenta cerâmica utilizada.

Analisando a Figura 5.12, observa-se uma mesma tendência no comportamento de desgaste entre as quatro ferramentas de corte na usinagem da liga VER-3. Inicialmente, todas as ferramentas apresentaram um desgaste de aproximadamente 0,09 mm, logo aos primeiros dois minutos crescendo em função do tempo de usinagem.

O melhor resultado, em termos de tempo de usinagem na liga VER-3, foi obtido pela ferramenta CER-NA, com 11 minutos. A Ferramenta CER-AN Revestida obteve um tempo de 10 minutos (9% menor que a CER-AN) e a ferramenta CER-A1YN obteve um tempo de 9 minutos (18% menor que a CER-AN). Já a ferramenta CER-A0,5YN foi a que obteve o menor tempo de vida entre as quatro, com um tempo de 8 minutos, cerca de 27% inferior que o obtido pela ferramenta CER-AN.

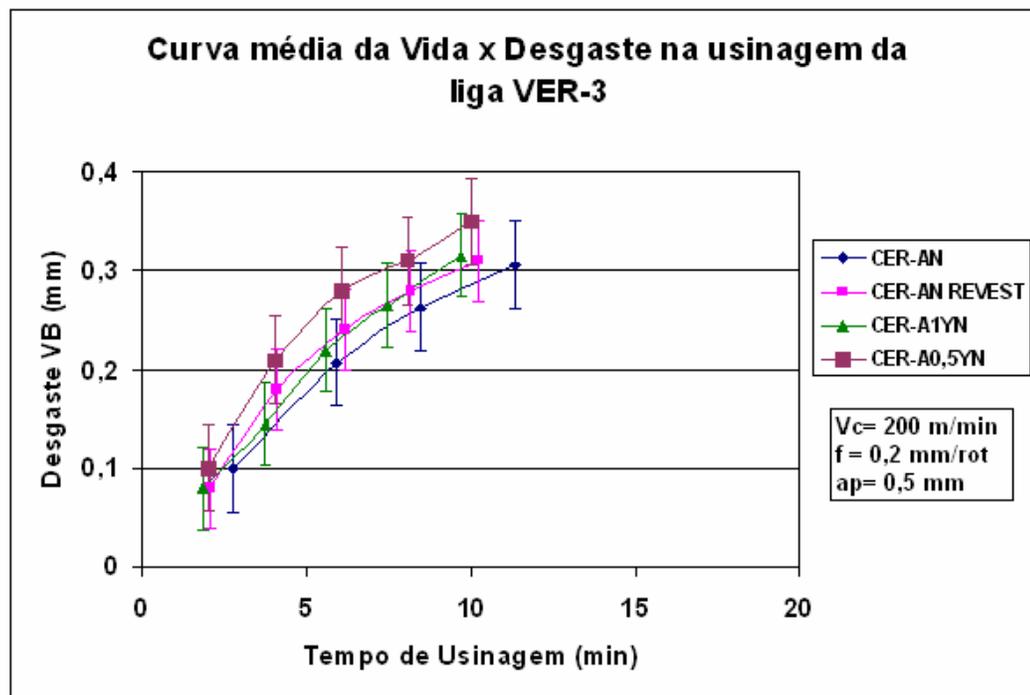


Figura 5-12 Curva de vida x desgaste na usinagem da liga VER-3 com ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN.

Os resultados, em termos de tempo de usinagem médio entre as quatro ferramentas (tempo de 9,5 minutos), foi comparado com os resultados obtidos por Xavier (2003) utilizando cerâmicas de nitreto de silício. Essa comparação foi realizada, pois não se encontraram na literatura trabalhos que abordassem a usinagem de ferro fundido vermicular com cerâmicas óxidas mistas e nem a usinagem de liga com nodularidade acima de 20%.

Em comparação com os resultados obtidos por Xavier (2003), as cerâmicas produzidas pelo IPEN se mostraram semelhantes, com um tempo de usinagem 5% inferior. A maior diferença foi obtida com a ferramenta CER-AN, com um ganho de 10%, e o pior resultado foi obtido pela ferramenta CER-A0,5YN, com um tempo de usinagem 20% menor do que o obtido por Xavier (2003).

Para identificar se as médias entre as ferramentas na usinagem da liga VER-3 são diferentes, foi feita uma análise de variância com confiabilidade de 95%. O teste indica que os tempos de vida das quatro ferramentas são iguais, com exceção das ferramentas CER-AN e CER-A0,5YN, que possuem os tempos de vida diferentes, porque a condição  $F < F_{crit}$  não foi atendida ( $F = 6,668 < F_{crit} = 7,708$  entre as ferramentas CER-AN Revestida e CER-A1YN,  $F = 1,705 < F_{crit} = 7,708$  entre as ferramentas CER-AN Revestida e CER-A0,5YN,  $F = 0,783 < F_{crit} = 7,708$  entre as ferramentas CER-AN Revestida e CER-AN,  $F = 1,161 < F_{crit} = 7,708$  entre as ferramentas CER-AN Revestida e CER-AN,  $F = 1,161 < F_{crit} = 7,708$  entre as ferramentas CER-A1YN e CER-A0,5YN,  $F = 3,920 < F_{crit} = 7,708$  entre as

ferramentas CER-AN e CER-A1YN e, por fim, as ferramentas CER-AN e CER-A0,5YN, que são diferentes  $F = 15,562 > F_{crit} = 10,127$ ).

Para caracterizar o desgaste das ferramentas ensaiadas na liga VER-3, foi realizada uma análise de imagens obtidas através de MEV. A **Figura 5-13** traz as imagens ampliadas do desgaste ocorrido nas quatro ferramentas de cerâmica produzidas pelo IPEN.

No geral, os mecanismos de desgaste das ferramentas na usinagem da liga VER-3 foram a abrasão, a aderência, fraturas e possivelmente difusão.

Analisando a Figura 5.13 (A), pode-se notar uma intensificação no desgaste por abrasão no flanco da ferramenta CER-AN. O aumento da nodularidade na liga VER-3 afeta o tempo de adesão do cavaco sobre a ferramenta de corte. Nesse caso, ocorre o aumento da temperatura, que, associada ao aumento da dificuldade de quebrar o cavaco, acaba intensificando o desgaste na ferramenta. Observa-se também um desgaste de cratera, indicando que pode ter havido difusão. Na face da ferramenta ocorre aderência de material o que gera o enfraquecimento e arrancamento do gume da ferramenta e microquebras.

Na ferramenta CER-AN Revestida (Figura 5.13 (B)), verifica-se o arrancamento do revestimento na superfície de saída da ferramenta. Os desgastes de cratera e de flanco são semelhantes aos ocorridos na ferramenta CER-AN, e há uma remoção do gume da ferramenta possivelmente causado pela remoção do revestimento da ferramenta e a exposição do substrato às solicitações da maior aderência e temperatura.

Nas Figuras 5.13 (C) e 5.13 (D), o desgaste nas ferramentas é semelhante, observando-se uma intensificação no desgaste abrasivo. Há também o desgaste de cratera o que indica a possível ocorrência de difusão. A remoção do gume em função da aderência e as fraturas no substrato também são intensificadas. Ocorre também um desgaste abrasivo mais profundo no flanco das duas ferramentas de corte. Esse desgaste pode ter sido causado por vibrações ocorridas durante a realização dos ensaios.

O desgaste ocorrido nas ferramentas na usinagem da liga VER-3 se assemelha ao ocorrido nas ferramentas utilizadas por Scuor *et al* (2005) e Kumar *et al* (2006).

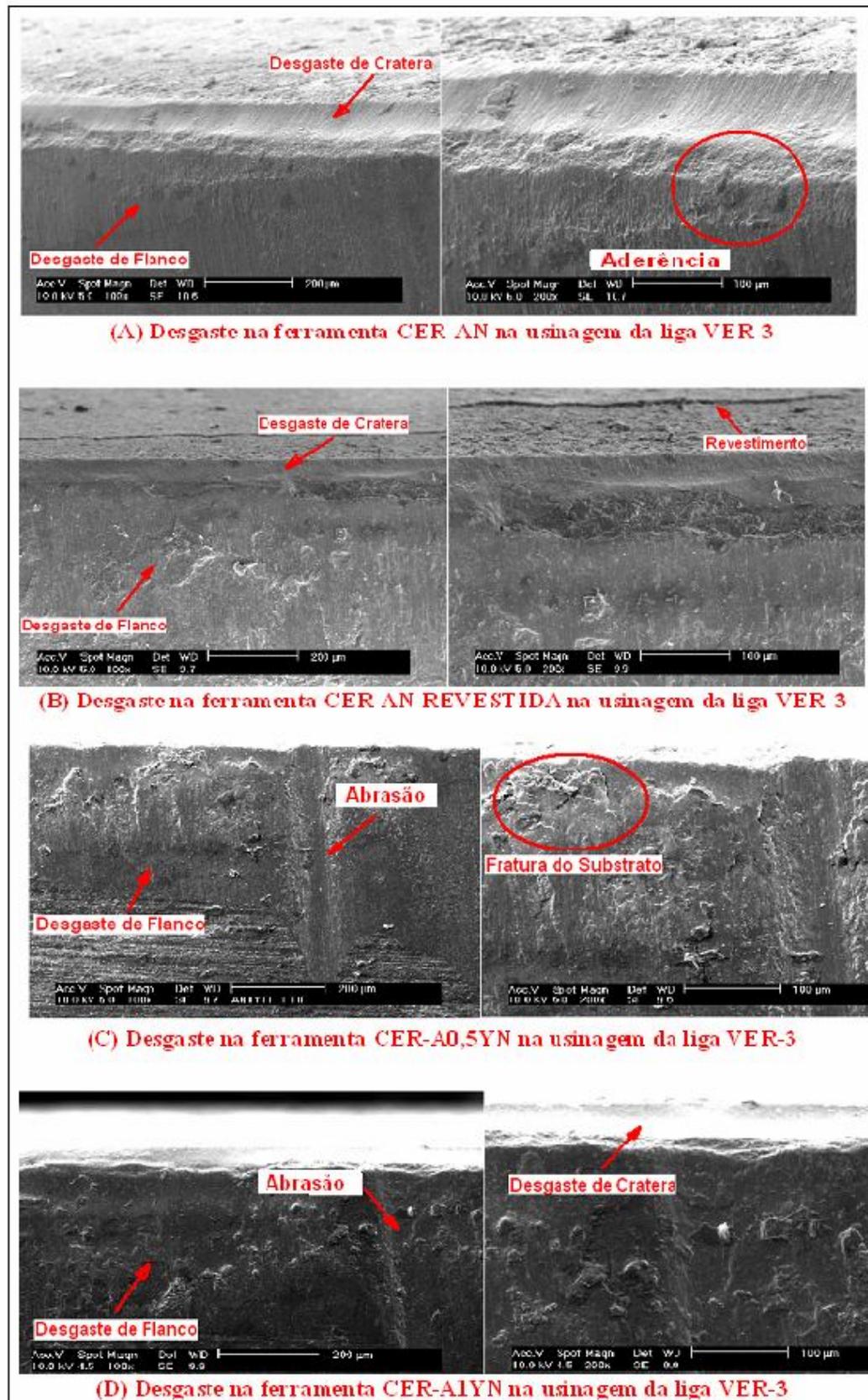


Figura 5-13 Desgaste nas ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN na usinagem da liga VER-3.

### 5.2.3 Comparativo da usinabilidade das ligas com as ferramentas cerâmicas

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

Comparando os tempos médios de usinagem obtidos pelas quatro ferramentas, verificou-se que os maiores tempos de vida foram obtidos na usinagem da liga VER-1 (média de 13,3 minutos). Esse tempo é em média 28% superior aos obtidos na usinagem da liga VER-3 (média de 9,5 minutos). A **Figura 5-14** mostra uma comparação entre os tempos de usinagem obtidos pelas ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN e pela ferramenta comercial (CER-NS260) na usinagem das ligas de ferro fundido vermicular.

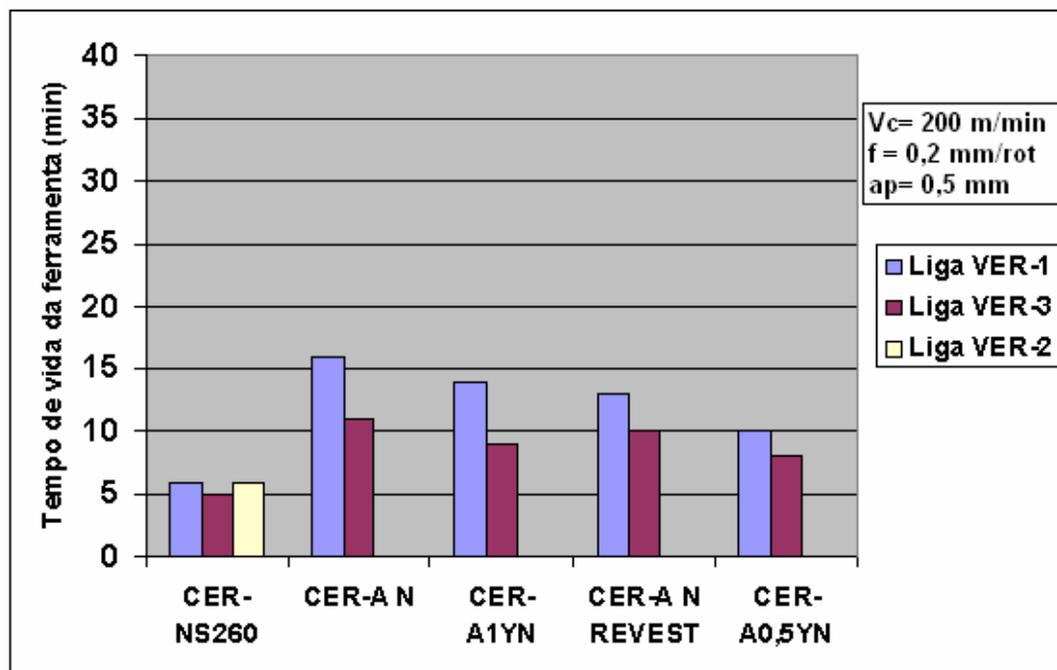


Figura 5-14 Comparativo da usinabilidade entre as ligas VER-1 e VER-3 com as ferramentas cerâmicas.

Os resultados das ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN se tornam muito expressivos quando comparados aos resultados obtidos com a ferramenta comercial CER-NS260. Esse resultado se faz importante, pois em ambas as ligas as ferramentas cerâmicas do IPEN apresentaram resultados superiores em média 80% comparado a cerâmica comercial CER-NS260. Na usinagem da liga VER-1, teve-se um aumento médio no tempo de usinagem de 120% e na usinagem da liga VER-3, teve-se um aumento médio de 60%. Esses resultados expressivos mostram a importância do estudo de novos materiais para ferramentas principalmente voltados à usinagem do ferro fundido vermicular.

Analisando a Figura 5.14, tem-se que os melhores resultados de todas as ferramentas foram obtidos na usinagem da liga VER-1, em que a ferramenta CER-AN obteve expressivos 16 minutos de usinagem. Seu desempenho também foi melhor na usinagem da liga VER-3 obtendo 11 minutos de usinagem. Já a ferramenta CER-A0,5YN foi a que obteve os piores resultados dentre as quatro ferramentas, tanto na usinagem da liga VER-1 (10 minutos) como na usinagem da liga VER-3 (8 minutos). As ferramentas CER-AN Revestida e CER-A1YN obtiveram resultados semelhantes entre si, e comparadas à ferramenta CER-AN, a diferença entre os resultados também não foi muito significativa.

Em termos de desgaste, as ferramentas cerâmicas de óxido de alumínio com carboneto de nióbio e óxido de ítria se mostraram bem mais estáveis quimicamente e mais resistentes ao desgaste que a ferramenta CER-NS260.

O desempenho superior dessas ferramentas em relação à ferramenta CER-NS260 se deve principalmente à combinação de propriedades do óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), do carboneto de nióbio (NbC) e do óxido de ítria ( $Y_2O_3$ ), que conferem a essas ferramentas resistência ao desgaste em altas temperaturas, maior dureza, maior módulo de elasticidade e tenacidade a fraturas. A combinação dessas propriedades garantiu que as ferramentas resistissem às solicitações mecânicas e térmicas impostas pelas ligas de ferro fundido vermicular.

Fazendo uma comparação com os resultados das ferramentas de metal-duro as cerâmicas do produzidas pelo IPEN já tiveram um desempenho bem melhor, porém a diferença em termos de tempo de vida é em média de 120% menor. Em termos de mecanismo de desgaste foi semelhante sendo abrasão, porém nas cerâmicas a abrasão foi causada pelos próprios grãos arrancados por adesão.

### **5.3 Avaliação do cavaco gerado na usinagem das ligas VER-1 e VER-3**

Com o objetivo de verificar o tipo e mecanismo de formação do cavaco na usinagem do ferro fundido vermicular, foram colhidas amostras da liga com menor nodularização da grafita (VER-1) e da liga com maior nodularização (VER-3). As amostras obtidas são das

ferramentas de metal-duro e da ferramenta cerâmica comercial (CER-NS260). Os cavacos foram analisados a partir de imagens adquiridas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e podem ser visualizados na **Figura 5-15**.

Analisando as imagens, não se identifica grandes diferenças entre os cavacos gerados na usinagem da liga VER-1 e os gerados na usinagem da liga VER-3.

Percebe-se também que os cavacos formados são do tipo cisalhado e possuem o formato de arco. Na usinagem com as ferramentas de metal-duro e de cerâmicas, eles apresentaram um comportamento dúctil, com deformação plástica.

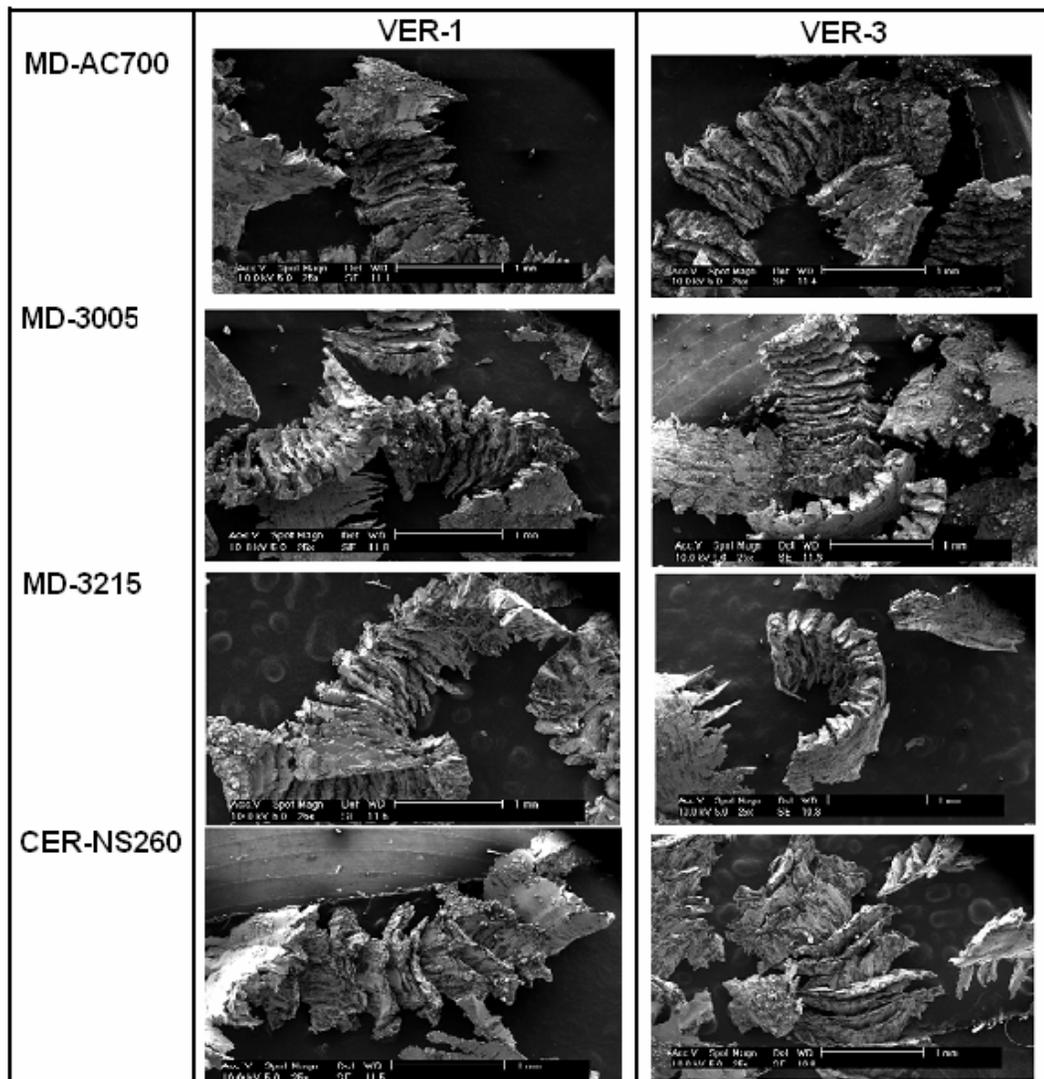


Figura 5-15 Imagem dos cavacos gerados nos ensaios das ligas VER-1 e VER-3 com as ferramentas de metal-duro e a cerâmica de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Esse comportamento mais dúctil, com deformação plástica do cavaco, também foi visto por Reuter *et al* (1999b) em seu estudo no qual compararam o mecanismo de formação do cavaco do ferro fundido vermicular com o cinzento e o nodular. O comportamento observado

é semelhante ao verificado na usinagem do ferro fundido nodular e diferente quando comparado ao ferro fundido cinzento, que apresenta fratura mais frágil do cavaco.

Segundo Marwanga *et al* (2000), o processo de formação de cavaco nos ferros fundidos nodulares é influenciado basicamente pela morfologia da grafita e a interação da grafita com a matriz do material (ferrita/perlita). Os nódulos de grafita presentes no material sofrem uma deformação compressiva e são alongados na direção de cisalhamento.

O que foi dito por Marwanga com relação ao ferro fundido nodular pode ser associado ao ferro fundido vermicular, já que o processo de formação do cavaco é semelhante. Na mudança da liga com menos nódulos de grafita para a liga com maior quantidade de nódulos de grafita, pode-se ver a deformação dos nódulos da grafita e seu alongamento na direção de cisalhamento, confirmando, desse modo, a severa deformação plástica do ferro fundido vermicular durante a usinagem. Esse fato sugere que, na usinagem da liga VER-3, o material fica muito mais tempo em contato com a ferramenta de corte, o que é característico do aumento na nodularidade. Tal comportamento da grafita, observado na usinagem com as ferramentas de metal-duro e de cerâmica, pode ser constatado na **Figura 5-16** obtida por MEV.

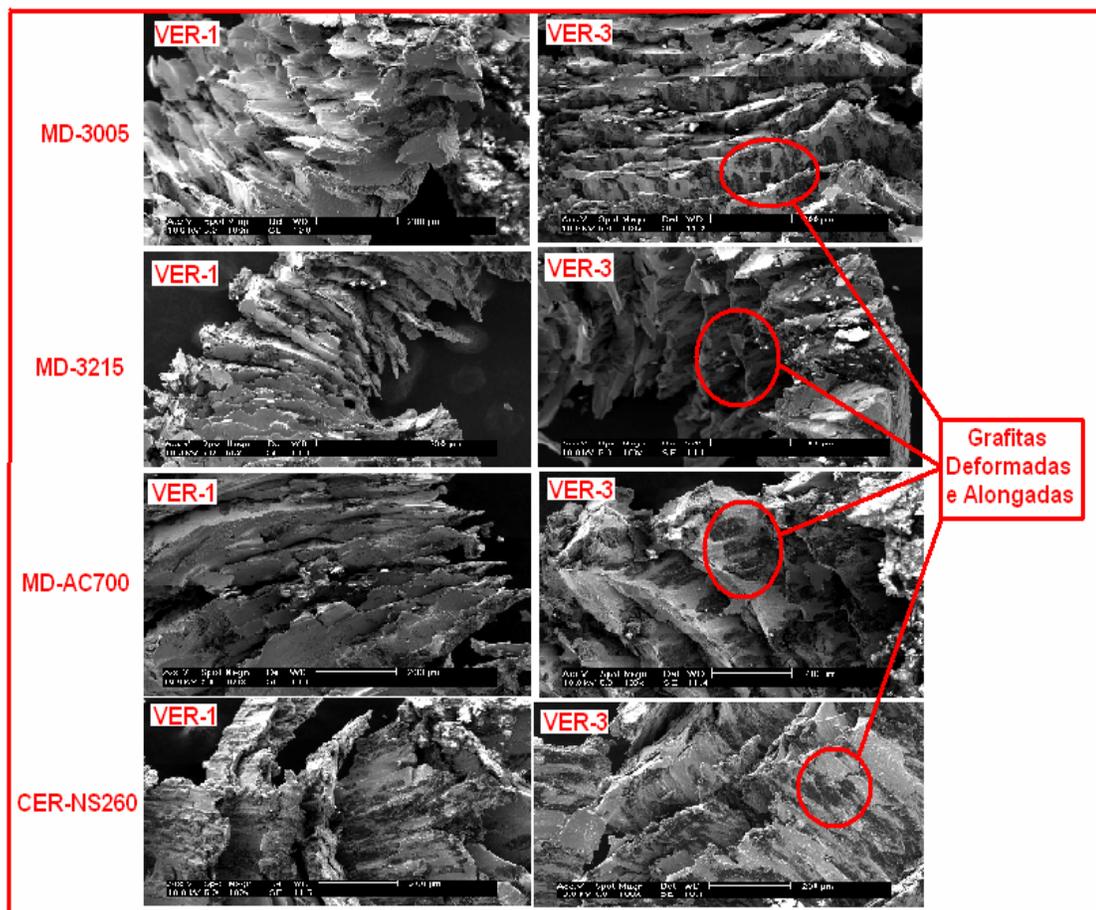


Figura 5-16 Comportamento da grafita nodular na usinagem das ligas VER-1 e VER-3.

Observa-se também nas figuras anteriores, a capacidade do ferro fundido vermicular de interromper a propagação de trincas no plano de cisalhamento primário, contrário do que se observa na usinagem do ferro fundido cinzento.

#### 5.4 Comparativo geral da usinabilidade das ligas VER-1, VER-2 e VER-3

Em termos de microestrutura, as três ligas apresentaram algumas características diferentes que influenciaram os resultados de usinagem, principalmente o das ferramentas de metal-duro. Na liga VER-1, apesar da menor nodularidade, possuía a maior dureza e maior resistência, que foram associadas à presença de carbonetos segregados na liga. Essas características aumentaram a abrasividade do cavaco sobre as ferramentas, intensificando o desgaste por abrasão nas mesmas, sobretudo nas de metal-duro e cerâmicas do IPEN. Nas ligas VER-2 e VER-3, a nodularidade é maior, porém a dureza e resistência das ligas diminuem. A diminuição na dureza está associada ao aumento de ferrita nas ligas. A característica do desgaste nas ferramentas na usinagem dessas ligas muda, pois ocorre a eliminação dos carbonetos e a nodularidade é bem maior. Nesta condição o cavaco tende a ficar mais tempo em contato com a ferramenta, aumentando as solicitações térmicas sobre as ferramentas.

Os melhores resultados com as ferramentas de metal-duro foram constatados na usinagem de liga VER-3 com a ferramenta MD-AC700, seguidos pelos resultados constatados na usinagem da liga VER-2 com a ferramenta MD-AC700. Já na usinagem da liga VER-1, foram obtidos os piores resultados das ferramentas. Essa comparação entre as ferramentas pôde ser observada na **Figura 5-1**.

No geral, a ferramenta MD-AC700 foi a que obteve os melhores resultados e MD-3215 a que obteve os piores resultados, especialmente na usinagem da liga VER-2. Esse comportamento inesperado na usinagem da liga VER-2 pode estar relacionado ao arrancamento do revestimento da ferramenta ou até mesmo alguma variação na microestrutura do corpo de prova utilizado no experimento que não condiz com a restante do lote produzido.

O desgaste nas ferramentas foi gerado por abrasão principalmente na usinagem da liga VER-1. Na usinagem das ligas com maior nodularidade, além da abrasão, ocorrem fraturas nos substratos das ferramentas, possivelmente causadas pelas solicitações térmicas oriundas do maior tempo de contato do cavaco com a ferramenta. Observo-se também o desgaste por aderência o que indica a presença de desgaste por adesão (ou *attrition*). O desgaste abrasivo em ferramentas de metal-duro na usinagem de ferro fundido vermicular também foi verificado em trabalhos como o de Xavier (2003).

No que tange às ferramentas cerâmicas, ficou clara a superioridade das ferramentas cerâmicas de óxido de alumínio com carbonetos de nióbio e óxido ítria produzidas pelo IPEN sobre a ferramenta comercial de nitreto de silício revestida. O melhor resultado obtido com as cerâmicas foi constatado utilizando a ferramenta CER-AN sem revestimento na usinagem da liga VER-1.

Tanto para as ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN, como para a CER-NS260, os melhores resultados foram obtidos na liga VER-1. Nesse caso, o desgaste nessas ferramentas está relacionado diretamente à variação da nodularidade entre as ligas e que o fator tempo de contato entre cavaco ferramenta foi o responsável pelo aumento na taxa de desgaste das ferramentas de corte cerâmicas.

No geral, a ferramenta CER-AN obteve os melhores resultados, tanto na liga VER-1 como na VER-2, e a ferramenta CER-NS260 foi a que obteve os piores tempos de vida na usinagem das três ligas de ferro fundido vermicular dentre todas as ferramentas.

O desgaste visto nas ferramentas cerâmicas indica que ocorreu abrasão causada pelas próprias partículas do substrato arrancadas pelo desgaste por adesão, fraturas de substrato e possivelmente difusão. O aumento da nodularidade faz com que ocorra um aumento no tempo de contato do cavaco com a ferramenta, gerando maiores temperaturas e deixando o substrato da ferramenta suscetível a reações triboquímicas, favorecendo o desgaste por difusão. Xavier (2003) também observou que além, do desgaste por abrasão nas ferramentas de cerâmica, ocorreu possivelmente o desgaste por difusão.

Fazendo uma comparação entre todas as ferramentas, é evidente o desempenho superior das ferramentas de metal-duro sobre as ferramentas de cerâmica na usinagem das três ligas de ferro fundido vermicular ensaiadas.

Outro resultado expressivo é o desempenho obtido pelos novos compósitos cerâmicos desenvolvidos pelo IPEN, principalmente quando comparados ao resultado obtido com a ferramenta comercial CER-NS260. Embora, com os excelentes resultados das cerâmicas, ainda cabem maiores esforços em pesquisa para tornar seus resultados comparáveis aos obtidos pelo metal-duro no torneamento de ferro fundido vermicular.

O comportamento inverso entre as ferramentas observado na Figura 5.17, se deve pelo fato das cerâmicas serem mais duras que as ferramentas de metal-duro, suportando maior desgaste por abrasão, porém não os demais tipos de desgaste, enquanto as ferramentas de metal-duro não resistem à abrasividade igual às cerâmicas. Outro fator é interação química que há entre as cerâmicas e o ferro causando assim desgaste por difusão.

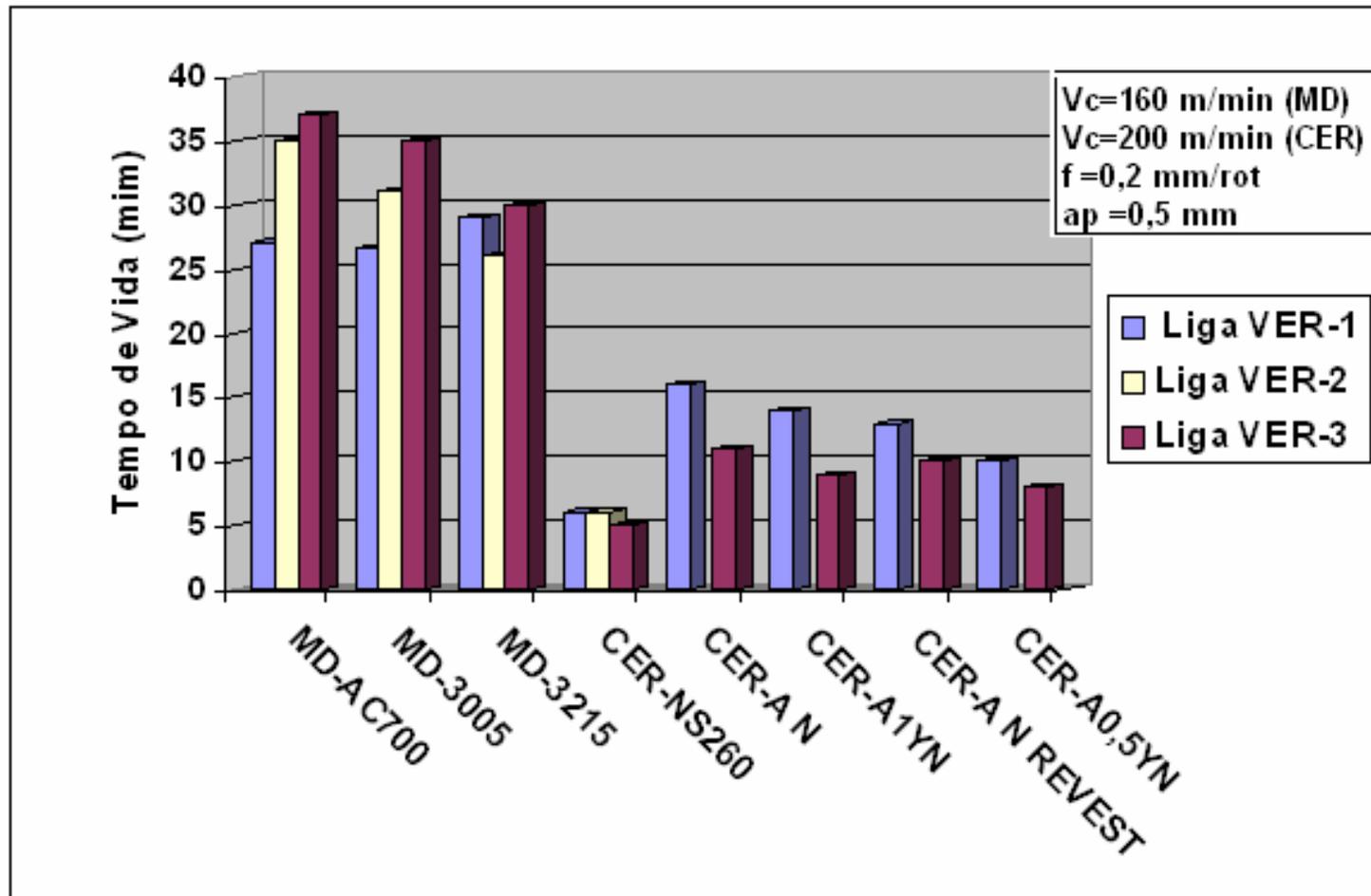


Figura 5-1 Comparativo geral dos resultados obtidos na usinagem das ligas VER-1, VER-2 e VER-3 com ferramentas de metal-duro e cerâmica.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Depois de concluídos os experimentos de usinagem e realizadas as devidas análises, foi possível tirar algumas conclusões com respeito às ligas e ferramentas utilizadas na presente pesquisa. Junto às conclusões serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros oriundas de questionamentos surgidos durante a pesquisa que não puderam ser solucionados.

### 6.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos e no conhecimento adquirido mediante uma revisão e análise aprofundada de trabalhos anteriores, é possível destacar às seguintes conclusões:

- Em termos de microestrutura, na liga VER-1, a baixa nodularização da grafita (6%) em uma matriz perlítica com 2% de ferrita, aliada à maior dureza da superfície, maior microdureza da perlita e presença de carbonetos segregados (cementita), influenciaram na usinagem. Essas características da liga tendem a aumentar a abrasividade do cavaco sobre as ferramentas de corte, causando o desgaste e por consequência diminuindo a usinabilidade da liga.
- Nas ligas VER-2 e VER-3, tem-se o aumento na nodularidade (26% e 36%, respectivamente), porém com diminuição da dureza e da microdureza da perlita das ligas em função do aumento da ferrita e da eliminação dos carbonetos segregados. Nesse caso, o desgaste é em função do aumento da nodularidade nas ligas. Quanto maior é a nodularidade, maior será o tempo de contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. A dificuldade na quebra do cavaco gera maiores temperaturas na região de corte, podendo causar tanto desgaste por abrasão, como desgaste por difusão nas ferramentas de corte, principalmente nas de cerâmica.
- Em termos de usinabilidade utilizando ferramentas de metal-duro, os melhores resultados foram obtidos na usinagem da liga VER-3 (37 minutos) com a ferramenta MD-AC700. Os piores resultados foram obtidos na usinagem da liga VER-1, em que todas as ferramentas obtiveram resultados semelhantes (~27,5 minutos).
- A ferramenta que obteve os melhores resultados na usinagem das três ligas foi a MD-AC700, seguida pela MD-3005. Já a ferramenta MD-3215 não apresentou um bom desempenho, especialmente na usinagem da liga VER-2. Esse comportamento pode estar relacionado ao arrancamento do revestimento da ferramenta ou até mesmo alguma variação na microestrutura do corpo de prova utilizado no experimento que não condiz com a restante do lote produzido. Outro fator que justifica a o melhor desempenho da ferramenta MD-AC700 pode ter sido devido que as ferramentas MD-

3005 e MD-3215 possuíam aresta alisadora, o que gera maior calor em função do maior contato (atrído) com a peça, acelerando o desgaste nestas ferramentas.

- Conclui-se também que o principal mecanismo de desgaste nas ferramentas de metal-duro foi a abrasão, sendo que, em algumas ferramentas, a aderência de material da peça sobre a ferramenta estava presente, além de algumas fraturas no substrato. Esse tipo de desgaste ocorrido nas ferramentas é típico da ação abrasiva do cavaco sobre a ferramenta, visto principalmente na usinagem da liga VER-1. A presença de aderência nas ferramentas também é um fator que indica a presença de desgaste por adesão (ou *attrition*).
- Na usinagem das ligas com a ferramenta CER-NS260, os tempos de usinagem foram semelhantes (cerca de 6 minutos), porém bastante inferiores aos obtidos com as ferramentas de metal-duro. Vale ressaltar que a velocidade de corte utilizada nos experimentos foi diferente entre metal-duro (160 m/min) e cerâmicas (200 m/min).
- A ferramenta cerâmica CER-NS260 teve uma alta taxa de desgaste e crescente em função do tempo. Observou-se nessa ferramenta a ação não só da abrasão, mas também a ocorrência de forte desgaste de cratera, indicando que pode ter havido desgaste por difusão. O revestimento da ferramenta também não suportou o desgaste excessivo, sendo removido logo no primeiro passe de usinagem. O desgaste excessivo pode ser atribuído a fatores como a abrasividade e o maior tempo de contato do cavaco sobre a ferramenta e a maior afinidade química entre a ferramenta e o ferro gerando um desgaste por difusão.
- Outra conclusão importante é o excelente desempenho obtido pelas ferramentas cerâmicas produzidas pelo IPEN quando comparadas à ferramenta cerâmica CER-NS260 comercial, mostrando a importância da pesquisa na busca de novos materiais de ferramenta.
- Os melhores resultados obtidos pelas cerâmicas do IPEN foram na usinagem da liga VER-1, com um tempo médio de usinagem de 13,25 minutos, tempo esse 28% superior ao obtido na usinagem da liga VER-3, que foi de 9,5 minutos. O tempo obtido na usinagem da liga VER-1 é em média 120% superior ao obtido com a CER-NS260 e o tempo obtido na usinagem da liga VER-3 é em média 60% superior ao obtido com a CER-NS260, mostrando a superioridade das cerâmicas produzidas pelo IPEN.
- A ferramenta que se destacou foi a CER-AN, com um tempo de vida de 16 minutos na usinagem da liga VER-1 e um tempo de 11 na usinagem da liga VER-3. Já a

ferramenta CER-A0,5YN foi a que obteve os menores tempos de vida, de 10 minutos na usinagem da liga VER-1 e de 8 minutos na usinagem da liga VER-3.

- Nas cerâmicas óxidas mistas produzidas pelo IPEN, a taxa de desgaste foi mais constante com o passar do tempo, apresentando um desgaste de menor intensidade que o da ferramenta CER-NS260, porém os mecanismos de desgaste ocorridos são semelhantes. O desgaste por abrasão estava presente nas ferramentas, bem como fraturas no substrato e possivelmente o desgaste por difusão. O menor desgaste nas ferramentas, produzidas pelo IPEN se deve à combinação de propriedades do óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), do carboneto de nióbio (NbC) e do óxido de ítria ( $Y_2O_3$ ), que conferem a essas ferramentas maior resistência ao desgaste em altas temperaturas, maior dureza, maior módulo de elasticidade e maior tenacidade à fratura.
- Quanto à inversão dos resultados entre as ferramentas de metal-duro e de cerâmica se deve a maior dureza e resistência das cerâmicas ao desgaste abrasivo, diferente do metal-duro que não tem a mesma resistência, porém as cerâmicas são mais sensíveis a desgaste como aderência e difusão.
- Observando os cavacos gerados na usinagem das ligas VER-1 e VER-3 com as ferramentas de metal-duro e de cerâmica CER-NS260, conclui-se que os cavacos não mostraram uma variação significativa, são cisalhados no formato de arco e deformados plasticamente. Na usinagem da liga VER-3 nota-se que nódulos de grafita são deformados e alongados na direção de cisalhamento, confirmando a severa deformação plástica do material e indicando que o cavaco gerado fica mais tempo em contato com a ferramenta de corte.
- Os cavacos também mostram a capacidade que o ferro fundido vermicular tem de interromper a propagação de trincas no plano de cisalhamento primário, contrário do que se observa na usinagem do ferro fundido cinzento, onde a trinca se propaga pelas grafitas facilitando o corte.
- Com base nos resultados, o metal-duro com menores velocidades de corte ainda é a melhor alternativa para a usinagem de ferro fundido vermicular, apresentando um desempenho 100% maior que as cerâmicas.
- Por último é importante salientar que os resultados e conclusões obtidos apontam que os objetivos da pesquisa foram alcançados, porém levam a uma série de questões importantes que ainda carecem de resposta em trabalhos futuros.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Embora o crescente uso do ferro fundido vermicular principalmente na fabricação de blocos de motores diesel, sua estrutura e composição são de difícil usinabilidade, tornando-se um fator limitante de seu uso. Dessa forma, o campo para a pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas na usinagem do ferro fundido ainda é grande. As sugestões para trabalhos futuros são as seguintes:

- Estudar o efeito da variação da microestrutura na usinagem com diferentes velocidades de corte;
- Estudar o efeito da variação da microestrutura no desgaste e vida de ferramentas de CBN;
- Estudar o efeito da variação da velocidade de corte na usinagem do ferro fundido com as ferramentas fabricadas pelo IPEN;
- Verificar se a geometria das ferramentas de corte fabricadas pelo IPEN tem influência no tempo de vida das ferramentas;
- Estudar a variação das forças de corte e da temperatura na interface cavaco/ferramenta em função do aumento da nodularidade na usinagem de ferro fundido vermicular;
- Estudar os efeitos da utilização de fluido de corte na usinagem de ferro fundido vermicular;
- Estudar a variação na microestrutura do ferro fundido nodular e comparar com o ferro fundido vermicular.
- Estudar a interação química do ferro fundido vermicular com as diferentes ferramentas de corte, principalmente com as cerâmicas.
- Estudar o comportamento dos metais-duros e cerâmicas na usinagem do ferro fundido vermicular em condições de corte idênticas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELE, E., SAHM, A., SCHULZ, H. **Wear Mechanism when Machining Compacted Graphite Iron.** University of Technology, Darmstadt, Germany, CIRP, 2002, p 53-56.

ALVES, E.D. **Processo de Torneamento.** Disponível em: [www.em.pucrs.br/~edir/Oficina/torno/Torneamento.htm](http://www.em.pucrs.br/~edir/Oficina/torno/Torneamento.htm) , Acesso em Junho 2006.

AMORIM, H. **Apostila da Disciplina de processos de Fabricação por Usinagem.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ANDRADE, C. **Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN.** Florianópolis, 2005. Dissertação-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

ANDRADE, C. **Vantagens da Aplicação do Ferro Fundido Vermicular e seus Desafios na Usinagem.** Tupy Fundições, Apresentação no I Seminário de Manufatura Automotiva do ITA, Abril 2006.

ASM HANDBOOK, **Properties and Selection Irons, Steels and High Performance Alloys.** Metal Handbook, 10<sup>a</sup> Edição, 1990.

BATES, C.E., GRIFFIN, R.D., LI, H.J., ELEFThERIOU, E. **Machinability of Gray Cast Iron.** AFS Transactions, 159, 2002, p 1-17.

BATES, C.E. **Study Examines Influences on Machinability or Iron Castings.** Modern Casting, out 1996, p 36-39.

BOFF, C.R. **Metodologia de Análise de Blocos de Motores - Aplicação em Blocos de Motor Diesel de Ferro Fundido Vermicular.** Florianópolis, 2003 a. Dissertação-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

CIMM. **Material Didático sobre Usinagem.** Disponível em: <http://www.cimm.com.br/materialdidatico/usinagem.shtml> , Acesso em Junho de 2006.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7<sup>a</sup> Edição, 2002.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Materiais de Construção Mecânica.** Pearson Education do Brasil, 2<sup>a</sup> Ed, vol 3, 1986.

COHEN, P.H., VOIGT, R.C. **Influence of Section Size on Machinability of Ductile Irons.** Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, 2003.

DAWSON, S. **Controlling The Production of Compacted Graphite Iron.** Modern Casting, Dezembro 1998.

DAWSON, S. **Controlling the Production of Compacted Graphite Iron.** SinterCast, Inc, Auburn Hills, Michigan, 2001.

DAWSON, S. **Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design.** Werkstoff und automobylantrieb (Materials in powertrain), VDI (Verein Deutscher Ingenieure. Dresden, Germany, 1999.

DAWSON, S., WURTEMBERG, M.V. **Experiências Práticas com Ferro Fundido de Grafita Compacta como Material para Componentes Automotivos.** Baseado no trabalho apresentado no 26º ISATA, 1993, Aachen, Alemanha, 1994.

DAWSON, S. **Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron.** 106<sup>th</sup> AFS Casting Congress, Kansas City, 4-7 Maio 2002.

DAWSON, S., SCHROEDER, T. **Practical Applications for Compacted Graphite Iron.** AFS Transactions, , Des Plaines, USA: Paper 04-047, 2004, p.1-9.

DESCHAMPS, F. **Contribuições para o Desenvolvimento de um sistema de Visão Aplicado no Monitoramento do Desgaste de Ferramentas de Corte – O Sistema Toolspy.** Florianópolis, 2004. Dissertação-Departamento de Engenharia Elétrica, UFSC.

DILÇO, C.JUNIOR., AGUIAR, C.G., GUESSER, W., BOEHS, L. **Maquinado de Perfis .Contínuos en Hierro Fundido Nodular FE-50007.** CIT Información Tecnológica, v-11, n 6, 2000, p 173-180, Chile.

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

DZIERWA, R. **Cutting CGI: PQD.** Cutting Tool Engineering Magazine, Vol 55, No 2, Fevereiro 2003.

ECOB, C.M., HARTUNG, C. **An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons.** Elkem ASA, Foudry Products, Noruega, Agosto 2004.

ELEFTHERIOU, E. & BATES, C.E. **Effect of Inoculation on Machinability of Gray Cast Iron.** AFS Transactions, 1999, p 659-669.

GASTEL, M., KONETSCHNY, C., REUTER, U., FASEL, C., SCHULZ, H., RIEDEL, R. **Investigation of the Wear Mechanism of Cubic Boron Nitrate Tools Used for the Machining of Compacted Graphite Iron and Grey Cast Iron.** International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 18, 2000, p 287-296.

GASTEL, M., REUTER, U., SCHULZ, H., ORTNER, H.M. **SIMS Analysis of the Wear of Boron Nitride Tools for the Machining of Compacted Graphite Iron and Grey Cast Iron.** Fresenius Journal Anal Chem, 365, Junho 1999, p 142-146.

GEORGIU, G. **Compacted Graphite Iron is the Top Prospect.** Revista Tooling & Production, Setembro 2003, p 26-27.

GEORGIU, G. **CGI High Speed Machine Tool Solutions.** In: Compacted Graphite Iron Machining Workshop, 5.,2002, Darmstadt. Annals...Darmstadt, 2002.

GUESSER, W., DURAN, P.V., KRAUSE, W. **Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Cylinder Blocks.** Congrès Le Diesel: Aujourd'hui et Demain, Ecole Centrale Lyon, maio 2004.

GUESSER, W. **Compacted Graphite Iron – a New Material for Diesel Engine Cylinder Blocks.** II Encontro da SBPMat Brazilian MRS Meeting, 2003.

GUESSER, W, GUEDES, L. C. **Desenvolvimentos Recentes de Ferros Fundidos Aplicados a Indústria Automobilística.** Trabalho apresentado no Seminário da Associação de Engenharia Automotiva - AEA, São Paulo, 1997.

GUESSER, W., MASIERO, I., MELLERAS, E., CABEZAS, C. **Fatigue Strength of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Engine Cylinder Blocks.** Society of Automotive Engineers, Inc, 2004.

GUESSER, W. **Ferro Fundido com Grafita Compacta.** Metalurgia & Materias: Junho 2002. p.403-405.

GUESSER, W., SCHROEDER, T., DAWSON, S. **Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components.** AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA: Paper 01-071, 2001, p.1-11.

GUESSER, W., MASIERO, I., CABEZAS, C. **Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads.** Revista Matéria, vol 10, n. 2, Junho 2005, p 265-272.

HEISSER, C., STURM, J.C., **Casting Process Simulation of Compacted Graphite Iron.** AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA: Paper 03-025, 2003, p.1-8.

KLINK, U., FLORES, G. **O Uso da Grafita Vermicular em Cilindros Fundidos.** Revista Máquinas e Metais, Fevereiro de 2001.p 38-47.

KUMAR, A.S., DURAI, A.R., SORNAKUMAR, T. **Wear Behaviour of Alumina Based Ceramic Cutting Tools on Machining Steels.** Tribology International, 39, 191-197, 2006.

LABMAT-UFSC. Microscópio Eletrônico de varredura. Em [www.materiais.ufsc.br/lcm](http://www.materiais.ufsc.br/lcm), acesso em Dezembro de 2006.

LUCAS, E.O., WEINGAERTNER, W.L., BERNARDINI, P.A.N. **Como o Cavaco se Forma no Torneamento de Fofa Nodular Ferrítico.** Revista Máquinas e Metais, outubro de 2005, p 152-163.

LUCHNER, C., LUDWIG, P. **Usinagem do Ferro Fundido com Grafita Vermicular.** Revista Máquinas e Metais, Outubro de 2004. p 34.

MALISKA, A.M. **Microscopia Eletrônica de Varredura.** Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

MALUF, O. **Influência do Roletamento no Comportamento em Fadiga de um Ferro Fundido Nodular Perlítico.** São Carlos, 2002, Dissertação - Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo.

MARWANGA, R.O., VOIGT, R.C., COHEN, P.H. **Influence of Graphite Morphology and Matrix Structure on Chip Formation During Machining of Gray Irons.** AFS Transactions, 80, 1999a, p 595-607.

MARWANGA, R.O., VOIGT, R.C., COHEN, P.H. **Influence of Graphite Morphology, Matrix Structure on Gray Iron Maching.** Article adapted from an AFS transactions, 080, 1999b.

MARWANGA, R.O., VOIGT, R.C., COHEN, P.H. **Influence of Graphite Morphology and Matrix Structure on Chip Formation During Machining of Continuously Cast Ductile Irons.** AFS Transactions, 33, 2000, p 651-661.

MELLERAS, E., BERNARDINI, P., GUESSER, W.L. **Coletores de Escape em Nodular SiMo.** Congresso SAE BRASIL, 2003.

MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação.** Florianópolis, 2002a. Dissertação – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

MOCELLIN, F., et al. **Study of Machinability of Compacted Graphite Irons for Drilling Process.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering: vol 26, 2004.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 4 ed, 1996.

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Tradução Profa. Verônica Calado, Editora LTC, 2º ed, 2003.

OATHOUT, R.R. **Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Castings**. Metal Process, v.113, n° 5, p 54-58, 1978.

PEREIRA, A.A. **Influência do teor de Enxofre na Microestrutura, nas Propriedades Mecânicas e na Usinabilidade o Ferro Fundido Cinzento FC 25**. Florianópolis, 2005. Dissertação-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

PEREIRA, A.A., et al. **The Influence of Sulfur on the Machinability of Grey Cast Iron FC25**. Journal of Materials Processing Technology, p 1-7, 2006.

REUTER, U., SCHULZ, H. **CGI Machinability and Developments Towards Production**. CGI Design and Machining Workshop, PTW TU-Darmstadt, 1999c.

REUTER, U., SCHULZ, H. **Economic Machining of CGI**. Presentation in Engine Expo, Hamburg, 1999a.

REUTER, U., SCHULZ, H., DAWSON, S., HOLLINGER, I., ROBBINS, M., DAETH, J. **The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron**. Society of automotive engineers, Inc, Alemanha, 2001, p 1-18.

REUTER, U., SCHULZ, H., KONETSCHNY, C., GASTEL, M., McDONALD, M. **Wear Mechanisms in High-Speed Machining of Compacted Graphite Iron**. CGI Design and Machining Workshop, PTW TU-Darmstadt, 1999b.

ROTARY TECH. **Rotary milling cutter**. Em [www.rotarytech.com](http://www.rotarytech.com) , Acesso em Dezembro de 2006.

SANDVIK COROMANT. **CoroPak - Suplemento do Catálogo de Ferramentas Rotativas e do Catálogo de Ferramentas para Torneamento**. Catálogo Sandvik Coromant Brasil, 2005, pg 79.

SANDVIK COROMANT. **Produtos para Usinagem de Metais – Ferramentas Rotativas**. Catálogo Sandvik Coromant Brasil, 2004, pg A254.

SCUOR, N., LUCCHINI, E., MASCHIO, S., CASTO, S., SERGO, U. **Wear Mechanisms and Residual Stresses in Alumina Based Laminated Cutting Tools**. Wear, 258, 1372-1378, 2005.

SERBINO, E.M. **Um Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar**. São Paulo, 2005. Dissertação – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo .

SERGEANT, G.F.; EVANS, E.R. **The Production and Properties of Compacted Graphite Irons**. British Foudryman, London, v.75, n° 5, p 115-124, 1978.

SILVA, J.G., ABRÃO, A.M. **Comportamento da Cerâmica e do Metal-Duro Revestido no Torneamento de Fofo Nodular**. Revista Máquinas & Metais, Julho de 2006, p 38-49.

SINTERCAST. **Graphite Shape from Start to End: Process Control for CGI**. SinterCast S.A, Suécia, Junho 2001a.

SINTERCAST. **Material Data Sheet: Compacted Graphite Iron**. SinterCast S.A, Suécia, Junho de 2001.

SINTERCAST. **What is CGI**. Em [www.sintercast.com](http://www.sintercast.com) , Acesso Maio de 2006.

SOUZA, A.J. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento**. Florianópolis, 2004. Tese - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

SRIVASTAVA, A.K., FINN, M.E. **Machinability of Cast Iron**. TechSolve – The Manufacturing Solutions Center, Cincinnati, Ohio, 2005.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte I**. Edidora da UFSC, 6ª Ed, Florianópolis, 2005.

VACCARI, J. **How to Machine Compacted Graphite Iron**. Revista Machine Shop Guide, Novembro de 2000.

XAVIER, F.A. **Aspéctos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN**. Florianópolis, 2003. Dissertação- Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

WEINGAERTNER, W.L., SCHROEDER, R.B. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – Parte I**. Tradução do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen” de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis, 2002.